Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Ярославский государственный
технический университет»

ЯРОСЛАВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Семьдесят девятая всероссийская
научно-техническая конференция
студентов, магистрантов и аспирантов
с международным участием

НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ И ИНЖЕНЕРНЫЕ КАДРЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЛИДЕРСТВА РОССИИ

Полету Юрия Гагарина в космос – 65 лет!

22 апреля 2026 г., Ярославль

Сборник материалов конференции

Часть 1

Ярославль
2026

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ярославский государственный технический университет»

Семьдесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием

«НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ И ИНЖЕНЕРНЫЕ КАДРЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЛИДЕРСТВА РОССИИ»

Полету Юрия Гагарина в космос – 65 лет!

22 апреля 2026 г., Ярославль

Сборник материалов конференции

Часть 1

Электронное издание

Ярославль
2026

© Ярославский государственный технический университет, 2026

ISBN 978-5-9914-11117-2

УДК 378:001.891
ББК 74.58
С30

С30 Семьдесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием «Научные разработки и инженерные кадры для технологического лидерства России»: Полету Юрия Гагарина в космос – 65 лет. (22 апреля 2026 г., Ярославль): сб. материалов конференции. В 2 ч. Ч. 1. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2026. – 889 с. – 1 CD-ROM. – Текст: электронный.

В первую часть сборника вошли материалы, представляющие результаты научно-исследовательской деятельности студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых по направлениям: архитектура и дизайн, градостроительство, новые материалы и химия, современные производственные технологии, средства производства и автоматизация, цифровая трансформация и экономика данных.

Предназначен научно-педагогическим работникам и обучающимся организаций высшего и среднего профессионального образования, а также широкой научной общественности.

Редакционная коллегия: Е.О. Степанова, Д.В. Наумов, В.А. Голкина, А.Б. Капранова, Т.Н. Фуникова, Д.Д. Бахаева, С.Ю. Бойков, А.М. Геннадьева, В.Н. Ершов, С.А. Логинова, С.В. Расторгуев, М.О. Татаров, Л.Г. Приятелева, Д.И. Трошин, А.А. Фирстова, С.В. Шкиотов

Минимальные системные требования:
PC PentiumIV, 512 Мб ОЗУ, Microsoft Windows XP,
Adobe Acrobat Reader, дисковод CD-ROM, мышь

© Ярославский государственный технический университет, 2026

Научное издание

Семьдесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием «Научные разработки и инженерные кадры для технологического лидерства России»: Полету Юрия Гагарина в космос – 65 лет (22 апреля 2026 г., Ярославль)

Сборник материалов конференции

Часть 1

Текстовое электронное издание

Программное обеспечение:
Microsoft Office Word, Adobe Acrobat

Программное обеспечение для воспроизведения электронного издания:
Adobe Acrobat Reader, браузеры Google Chrome, Yandex

Ответственный за издание Д.Д. Бахаева

Редактор М.А. Канакотина

Ответственная за электронные издания: М.А. Канакотина

Подписано к использованию: 25.08.2026

Объем издания: 54,7 Мб

Комплектация издания 1 CD-ROM

Тираж 50 экз.

Ярославский государственный технический университет
150023, г. Ярославль, Московский пр., 88
http://www.ystu.ru

Контактный телефон: 8 (4852) 44-15-19

СОДЕРЖАНИЕ

Направление 1. АРХИТЕКТУРА И ДИЗАЙН, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

1 **Агабалян А.С.** АРХИТЕКТУРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ РЕКРЕАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА……. 14

2 **Андреева О.А., Расторгуев С.В.** КОНТЕКСТ КАК ПРОИЗВОДЯЩАЯ СИСТЕМА: ИКОНИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА КАК СИМПТОМ ТРАНСФОРМАЦИИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ THE SHARD, РЕНЦО ПЬЯНО)……. 17

3 **Аристова П.А., Белявчина Е.А.** РЕВИТАЛИЗАЦИЯ ТАБАЧНОЙ ФАБРИКИ ИМ. ДУНАЕВА ≪БАЛКАНСКАЯ ЗВЕЗДА≫ В ЯРОСЛАВЛЕ: БАЛАНС ИСТОРИЧЕСКОГО КОНТЕКСТА И СОВРЕМЕННОЙ ЗАСТРОЙКИ…… 22

4 **Барышева П.Е.** АРХИТЕКТУРА ВАЛЬДОРФСКИХ ШКОЛ…….. 26

5 **Богомолов М.О.** СПЕЦИФИКА ФУНКЦИОНАЛЬНО ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ АВТОСПОРТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ…… 30

6 **Брагина У.А., Сивкова Ю.А.** СОХРАНЕНИЕ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ДЕРЕВЯННОГО ЗОДЧЕСТВА РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ…… 36

7 **Волкова Н.Д., Расторгуев С.В.** ПРОЕКТ НАУЧНОГО ЦЕНТРА ИССЛЕДОВАНИЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА…… 39

8 **Герасимова А.А., Конух Е.А.** АРХИТЕКТУРНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТУРИСТИЧЕСКОГО ПОСЕЛКА ПОРТ-ВЛАДИМИР НА ОСТРОВЕ ШАЛИМ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ……. 43

9 **Говорова В.Д., Буров С.А.** РАЗМЕЩЕНИЕ ОТЕЛЯ В СТРУКТУРЕ ТЕРРИТОРИИ РЕНОВАЦИИ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ - ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ…….. 48

10 **Гордеев М.Д., Расторгуев С.В.** АВТОНОМНЫЕ ОКЕАНИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ КАК РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ОЧИСТКИ МИРОВОГО ОКЕАНА…….. 51

11 **Журавлева Е.Ю., Расторгуев С.В.** ПОСТМОДЕРНИСТСКАЯ АРХИТЕКТУРА В КИНЕМАТОГРАФЕ…… 54

12 **Завьялова П.А., Расторгуев С.В.** ГЕНЕРАЦИЯ ЭСКИЗНЫХ РЕШЕНИЙ ПАРКОВ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА……. 62

13 **Запевалова А.Р.** АРХИТЕКТУРНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЕНСОРНОЙ СРЕДЫ РЕТРИТ-ЦЕНТРОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ≪ТОЧКА РОСЫ≫ НА РЕКЕ ШАКША)……. 70

14 **Киселев М.М., Кудряшов М.Н.** РЕНОВАЦИЯ ПАНЕЛЬНОЙ ЗАСТРОЙКИ ДЗЕРЖИНСКОГО РАЙОНА ГОРОДА ЯРОСЛАВЛЯ…….. 75

15 **Волкова Е.А., Клешнина Е.Д., Расторгуев С.В.** БОРЬБА МОДЕРНИЗМА И ПОСТМОДЕРНИЗМА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ…….. 80

16 **Клюкина М.Л.** ТРАДИЦИОННАЯ КВАРТАЛЬНАЯ ЗАСТРОЙКА VS МОДЕРНИСТСКИЙ ХАОС…….. 83

17 **Клягин Т.И.** РЕГЕНЕРАЦИЯ ГОРОДСКИХ ПЛОЩАДЕЙ В ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ…… 86

18 **Корнев И.А.** АРХИТЕКТУРА ТИШИНЫ: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЕРАРХИЯ И АКУСТИЧЕСКИЙ КОМФОРТ ПО КРИСТОФЕРУ АЛЕКСАНДЕРУ……. 89

19 **Корочкина В.А.** ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ.. 92

20 **Кочетова Д.Д.** АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА В СЕВЕРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ…….. 96

21 **Крюкова Д.Е.** АРХИТЕКТУРА ОТСУТСТВИЯ: МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ УТРАЧЕННОГО САКРАЛЬНОГО НАСЛЕДИЯ…… 100

22	**Кузнецов А.Д., Расторгуев С.В.** АДАПТИВНАЯ АРХИТЕКТУРА……	106
23	**Кульмаирова В.А.** РЕГЕНЕРАЦИЯ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ПОШЕХОНЬЯ…….	109
24	**Менькова С.А.** ПРИНЦИПЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ИСТОРИЧЕСКИХ КВАРТАЛОВ ГОРОДОВ: БАЛАНС СОХРАНЕНИЯ НАСЛЕДИЯ И СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ……..	113
25	**Новикова Е.К.** АРХИТЕКТУРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ НОВОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ГОРОДСКОГО ПАРКА В ГОРОДЕ ШУЯ……..	117
26	**Осипова Д.М., Одинцова М.А., Волков А.М.** АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННОГО ДЕТСКОГО КРУГЛОГОДИЧНОГО ЛАГЕРЯ: АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ АРХИТЕКТУРЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В РОССИИ И ПРОЕКТНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИРОВАННОЙ СРЕДЫ ДЛЯ АКТИВНОГО И ТВОРЧЕСКОГО ОТДЫХА ДЕТЕЙ РАЗНЫХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП……	121
27	**Осокина А.В.** ФОРМИРОВАНИЕ КОМФОРТНОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ В МАЛЫХ И СРЕДНИХ ГОРОДАХ РОССИИ……...	127
28	**Плюснина Д.А.** АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БАЗЫ ОТДЫХА В УСЛОВИЯХ ПРИБРЕЖНОГО ЛЕСНОГО ЛАНДШАФТА…….	132
29	**Пряничникова Е.А.** РЕНОВАЦИЯ ЧАСОВОЙ ЗАВОД “ЧАЙКА” Г. УГЛИЧ….	136
30	**Селедцов Е.А., Горнушкин Д.А.** АРХИТЕКТУРНЫЙ АНСАМБЛЬ ЯРОСЛАВСКОГО ЭЛЕКТРОВОЗОРЕМОНТНОГО ЗАВОДА: СИНТЕЗ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ЗОДЧЕСТВА И ТРАДИЦИЙ КИРПИЧНОГО УЗОРОЧЬЯ……..	139
31	**Сизова А.А.** РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕРРИТОРИИ АНСАМБЛЯ ВОЗНЕСЕНСКИХ КАЗАРМ: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ И СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ……...	145
32	**Силантьева И.С.** АРХИТЕКТУРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЗАГОРОДНОГО ЦЕНТРА ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ С ИНТЕГРАЦИЕЙ ТРАДИЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ И ВОСТОЧНЫХ ПРАКТИК……..	150
33	**Сильвестрова А.Р., Смирнов Н.В**. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЧНОГО ВОКЗАЛА В г. УГЛИЧ……..	154
34	**Смирнова А.С., Павлов Е.А., Смирнов Н.В.** СИНТЕЗ МЕМОРИАЛЬНОЙ И ОБЩЕСТВЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В АРХИТЕКТУРЕ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРА АКТИВНОЙ ПАМЯТИ АРСЕНАЛ В АРГЕНТИНЕ…….	158
35	**Соловьева А.А**. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВОРЦОВ КУЛЬТУРЫ: ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ……...	161
36	**Терехина Ю.С.** РЕГЕНЕРАЦИЯ СТАРИННОЙ УСАДЬБЫ……	165
37	**Титов Д.С., Расторгуев С.В.** ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ ПОСТМОДЕРНИЗМА В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ……...	171
38	**Федоренко П.Р.** ФОРМИРОВАНИЕ ВЫРАЗИТЕЛЬНОГО АРХИТЕКТУРНОГО ОБРАЗА ДВОРЦОВ БРАКОСОЧЕТАНИЯ: ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ……..	175
39	**Шахова С.Д., Буров С.А.** РЕКОНСТРУКЦИЯ АНСАМБЛЯ ВОЗНЕСЕНСКИХ КАЗАРМ В ЯРОСЛАВЛЕ: СОХРАНЕНИЕ НАСЛЕДИЯ ЧЕРЕЗ СОВРЕМЕННЫЕ АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ……	181
40	**Юрьева А.А.** АРХИТЕКТУРА ПАВИЛЬОНА КАК МАНИФЕСТ НАЦИОНАЛЬНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ……...	185
	Направление 2. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ХИМИЯ	
41	**Ануфриева Г.Б., Терешко А.Е.** СИНТЕЗ КЕРНОГО ПИГМЕНТА НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ С МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОРТОФОСФОРНОЙ КИСЛОТОЙ……	193

42 **Бажан Е.А., Аникина М.Д., Шенцева А.М.** РАЗРАБОТКА СИНТЕЗА 4-АЦЕТИЛФЕНИЛЦИКЛОАЛКАН-1,2-ДИКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ И ПРОИЗВОДНЫХ НА ИХ ОСНОВЕ……. 196
43 **Бакунин Д.О., Ильин А.А.** УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ……. 199
44 **Варгасова С.В., Терешко А.Е., Ильин А.А.** СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОГО ПИГМЕНТА ИОНООБМЕННОГО ДЕЙСТВИЯ……. 202
45 **Волков Е.В., Макарова Е.С., Чиркова Ж.В.** СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЗАМЕЩЕННЫХ ХРОМЕНО[4,3-*d*]ПИРИМИДИН-2-ТИОНОВ…….. 205
46 **Жишкевич П.В.** ЛЕГКОПЛАВКИЕ ГЕРМАНАТНЫЕ СТЕКЛА…… 209
47 **Журавлева Е.Е., Карпов И.Д., Овчинников К.Л.** ВОССТАНОВЛЕНИЕ 3-НИТРО-3,4-ДИГИДРО-2*H*-ТИОПИРАНОВ ДО 3-АМИНО-3,4-ДИГИДРО-2*H*-ТИОПИРАНОВ……... 212
48 **Карабань В.Г., Грибачев И.Л., Гордейко С.А.** ВЛИЯНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ И КЛЕЕВЫХ СОСТАВОВ НА СВОЙСТВА РЕСТАВРАЦИОННОЙ БУМАГИ…… 214
49 **Карандеева А.С., Макарушко Е.Н., Самородова М.В.** СИНТЕЗ ЗАМЕЩЕННЫХ МЕТИЛ (*E*)-СТИРИЛПИРИМИДИН-5-КАРБОКСИЛАТОВ…. 218
50 **Карпов М.В., Потахин А.Г., Галактионов О.Н.** ПРИМЕНЕНИЕ ЛИСТВЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ…… 221
51 **Колосова А.Н., Терешко А.Е.** ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ АКТИВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (ПАВ)…….. 224
52 **Кольцов И.Г., Ильин А.А., Рундин А.В.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ПИГМЕНТ-СВЯЗУЮЩЕЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАФОРЕЗНЫХ ПОКРЫТИЙ…….. 228
53 **Коробицына П.А., Сиднева В.В.** СИНТЕЗ СТИРИЛПИРИДИНОВ И ПОЛУЧЕНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ *N*-ФТАЛИМИДОАЗИРИДИНОВ……. 231
54 **Крисанова В.А.** ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИЛА НА ПРОЧНОСТЬ ГРАНУЛ ПРИ ГРАНУЛИРОВАНИИ МЕТОДОМ ОКАТЫВАНИЯ…….. 234
55 **Кудрявцева К.С., Е.И. Баёв, Калачев И.С., Курганова Е.А.** ЦИКЛОАЛКИЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ *ТРЕТ*-БУТИЛБЕНЗОЛА: СИНТЕЗ И ЖИДКОФАЗНОЕ ОКИСЛЕНИЕ…….. 236
56 **Лазарева А.Г., Наметкина А.А., Сверчкова Д.Е.** СИНТЕЗ N-КОНЪЮГАТОВ ГЛУТАТИОНА С ПОТЕНЦИАЛЬНО ВЫСОКОЙ ПРОТИВОВОСПАЛИТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТЬЮ…….. 239
57 **Наметкина А.А., Сверчкова Д.Е., Орлова К.Ю.** СИНТЕЗ КАТИОННЫХ АМФИФИЛЬНЫХ (ДИАЛКИЛАМИНО)АЛКИЛАМИДОВ N-АЦИЛЗАМЕЩЕННЫХ ДИПЕПТИДОВ С ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТЬЮ…….. 242
58 **Немиров Д.М., Овчинников К.Л.** СИНТЕЗ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АФФИННОСТИ ХИНОНСОДЕРЖАЩИХ ТИОПИРАНОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ К РЕЦЕПТОРУ $GABA_{B(1)}$…….. 244
59 **Романова А.А., Терешко А.Е.** ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ……. 248
60 **Сахарова Ю.Н., Кунин А.В.** СИНТЕЗ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ЗАКИСИ АЗОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ…… 252
61 **Смурова А.А., Косицына А.В., Фролов А.С., Курганова Е.А.** МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЦИКЛОГЕКСАНОНА И ЦИКЛОГЕКСАНОЛА.. 255

62 **Старостин М.В.** ОБЗОР СПОСОБОВ СИНТЕЗА АМИДОВ 2*H*-ТИОПИРАНКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ……. 258
63 **Сундукова В.Н.** СВОЙСТВА МЕШОЧНОЙ БУМАГИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА И РАСХОДА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ… 261
64 **Урядова А.М.** МОДИФИКАЦИЯ 6-СТИРИЛЗАМЕЩЕННЫХ АДДУКТОВ БИДЖИНЕЛЛИ: СИНТЕЗ И ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ…… 264
65 **Хабаров А.М., Бухалин В.В., Баклагин В.Л.** СИНТЕЗ *ОРТО*-ДИЦИАНО-ЗАМЕЩЁННЫХ ДИБЕНЗО[*b,f*]ИМИДАЗО[1,2-*d*][1,4]ОКСАЗЕПИНОВ……... 269

Направление 3. НОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

66 **Бобышкин Ю.А., Власов В.В.** АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ МОДИФИКАЦИИ РЕЦЕПТУР РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЬ…… 272
67 **Васильева С.С., Терешко А.Е.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ДИСПЕРСИЙ…….. 275
68 **Величко К.В., Куликова Н.О., Локтева Ю.Н.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАТЕКСОВ КАРБОКСИЛСОДЕРЖАЩИХ ПРИВИТЫХ СОПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КИШЕЧНОРАСТВОРИМЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ОБОЛОЧЕК ТАБЛЕТОК……. 281
69 **Корсакова А.В., Ануфриева Г.Б.** НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИТРАТА НАТРИЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ……... 284
70 **Кудрявцев Я.В., Терешко А.Е.** ВЛИЯНИЕ ПИГМЕНТА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ОТХОДА, НА СТЕПЕНЬ СШИВКИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ……... 288
71 **Орандаренко Д.Д., Касьянова Е.А.** ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ…….. 290
72 **Саражинский Д.С., Варгасова С.В.** ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ФОСФАТА ЦИНКА В ПРИСУТСТВИИ РАЗЛИЧНЫХ ПАВ……. 293
73 **Севринова К.М., Касьянова Е.А.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛАЙНЕР-СИСТЕМ……. 295
74 **Стельмах А.Н.** ТЕРМОГЕНЕЗ ПРИ ПРЕПАРИРОВАНИИ ЗУБОВ: КАК АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ВЛИЯЮТ НА ПЕРЕГРЕВ ПУЛЬПЫ И МЕТОДЫ ЕГО ПРОФИЛАКТИКИ…….. 302
75 **Стельмах А.Н.** МАТЕРИАЛЫ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ БРЕКЕТ-СИСТЕМ…….. 312
76 **Фролова А.В.** МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИЯ И ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВЫХ ПРОТЕТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ: ТРЕБОВАНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ…….. 323
77 **Фахрутдинова Д.А., Хачатурова И.А., Гамлицкий Ю.А.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ЖЁСТКОГО КАУЧУКОВОГО СЛОЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ АКТИВНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ УСИЛЕНИЯ…… 327
78 **Чернов Л.А., Дмитриев К.Е., Коротнева И.С.** ВЛИЯНИЕ СТИМУЛЯТОРА БИОРАЗЛОЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАКАНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТЕКЛОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ……. 329
79 **Чистякова В.А., Иванова В.А.** ПРОБОПОДГОТОВКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА…….. 332

80 **Шишкин А.М., Панов А.Г.** ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЧУГУНА….. 337
81 **Шорохова К.Е.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ. МЕРЫ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ПРОФИЛАКТИКУ ПЕРИИМПЛАНТИТА…… 342
82 **Шорохова К.Е.** ТЕХНИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ БОРОВ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ…….. 361
83 **Яковлева А.Б., Семенова Н.А., Смирнов А.В., Терентьев А.А., Кольцов Н.И.** ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА РЕЗИНЫ НА ОСНОВЕ СИЛОКСАНОВОГО КАУЧУКА…….. 369

Направление 4. СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Секция 1. Материаловедение, техническое регулирование и метрологическое обеспечение в промышленности

84 **Дербенев Д.И., Чирков А.П.** ПРОБЛЕМЫ МЕТОДИК ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ……. 373
85 **Дратцева А.Э., Копылова У.А., Синицына А.В.** ЭВОЛЮЦИЯ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В РАЗРЕЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ…….. 376
86 **Зуев А.Е.**, **Тюкин И.В.** ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ АСУ ТП КАК ОСНОВА ФОРМАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ И ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ……. 382
87 **Канин В.В.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ PLM-ПЛАТФОРМ IPS И ЛОЦМАН.. 390
88 **Каныгин И.В.** СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ……... 393
89 **Кириченко А.А., Смолинова Е.М.** НОВЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И РИСКОВ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА……. 399
90 **Крюкова Т.А.** АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБЛАСТИ РЕМОНТА КОЛЕСНЫХ ПАР ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА…….. 406
91 **Леон К.С.** ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА…….. 409
92 **Мельничук Д.В.** ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ СПЕЦИАЛЬНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА…….. 414
93 **Мизгирев Д.Н.** МОДУЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАЛАДКИ В ЦИФРОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ. МОДУЛИ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ…… 421
94 **Никонорова А.В.** АДАПТАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕГЛАМЕНТОВ К ОБЪЕКТАМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С УЧЁТОМ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ……. 427
95 **Никулина К.В., Казюлина Д.И.** СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА В ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ……. 430
96 **Омельченко В.Д.** НЕСООТВЕТСТВИЕ МОСТОВЫХ КРАНОВ НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ ДЕЙСТВУЮЩИМ НОРМАТИВНЫМ ТРЕБОВАНИЯМ……. 434
97 **Платонова А.Д., Фуртова Е.Н.** НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ВИДЫ КОНТРОЛЯ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ……. 447
98 **Платонова А.Д., Фуртова Е.Н.** КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПЕСЧАНО-ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ BINDER JETTING…….. 440

99 **Родин А.В.**, **Наумов Д.В.** ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ…….. 443
100 **Сапцов М.А., Соловьева С.А.** СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ……...…… 446
101 **Тележкина К.И.** МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ МАССЫ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В РЕДУКТОРЕ…… 451
102 **Тугаринова А.А., Иванова В.А.** СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ…… 456
103 **Удалов Д.В.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕТОЧКИ ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА……. 461
104 **Шастина Е.М.** РОЛЬ ВУЗОВ В ЭПОХУ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ: ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И КАЧЕСТВО ……... 464
105 **Щетинников И.О., Иванова В.А.** СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СТРУЙНОГО НАНЕСЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО (BINDER JETTING): ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ…… 468
106 **Эгги Л.И., Чирков А.П.** ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПРОДУКЦИИ ЧЕРЕЗ ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ…….. 474

Секция 2. Оборудование, подсистемы и энергетические установки наземных транспортно-технологические средств

107 **Афанасьев М.А., Тюремнов И.С.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ И ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛЫ ОДНОМАССНОЙ ВИБРОПЛИТЫ НА ОСОБЕННОСТИ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ…….…… 479
108 **Белов О.Д., Гречин А.А., Князев Е.Ю.** УПРАВЛЯЮЩАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ KUKA, KAWASAKI И FANUC……. 483
109 **Гуськова А.С., Сафронов Е.В.** АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПАЛЛЕТЫ ПО РОЛИКУ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ…. 488
110 **Емелин А.М.** ОСОБЕННОСТИ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ПОГРУЗОЧНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ…….. 493
111 **Князев Е.Ю., Гречин А.А., Белов О.Д.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАНИПУЛЯТОРА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА…….. 496
112 **Наурбиев М.-Х.Х.** РОБАСТНАЯ ОЦЕНКА ЗЕМСНАРЯДОПРОИЗВОДСТВА: ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПОД КОНТРОЛЕМ……. 507
113 **Петухов В.Р., Проворов А.В.** ЧИСЛЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ МЕТАЛЛОЁМКОСТИ КОРПУСА БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ БСК-100…….. 511
114 **Разживина А.Р.** РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ДЕТАЛИ ВЕРХНЯЯ ПЛИТА ВАФЕЛЬНИЦЫ……... 514
115 **Салюкова К.С., Шапошников А.М.** ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЯГОВОЙ ЦЕПИ КОНВЕЙЕРА НА ОСНОВЕ CAD/CAE-ТЕХНОЛОГИЙ…… 517
116 **Салюкова К.С., Шапошников А.М.** МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЯГОВОЙ ЦЕПИ…… 521

117 **Смирнов А.Б.** ИННОВАЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ ПРОИЗВОДСТВА ООО «ЗАВОД «ДОРОЖНЫХ МАШИН»…….. 525
118 **Тихомиров С.Я.** РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА УСТАНОВКИ ДЛЯ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ ЗЕРНА…… 529
119 **Тихонов Н.А.** ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО НОЖА ПЛЯЖЕУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА……. 537
120 **Трескин Н.А.** РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ НАСТРОЙКИ, ИСПЫТАНИЯ И РЕМОНТА ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ…… 541
121 **Тюремнов А.И., Тихонов Д.Н.** К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ОСЦИЛЛЯТОРНОГО КАТКА…….. 550
122 **Федотов А.В.** ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НАГРУЗКИ К ИЗМЕНЕНИЮ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРАНА МОСТОВОГО ТИПА……... 554
123 **Фомин Н.А., Хлопков В.П., Носко А.Л.** УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИВОДНЫХ И НАКОПИТЕЛЬНЫХ РОЛИКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ПАЛЛЕТ…….. 558
124 **Шмелев М.В., Шамахов Л.М.** ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГУСЕНИЧНОГО БУКСИРА НА ДИСТАНЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ ДЛЯ МАЛЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ…….. 564

Секция 3. Энерго- и ресурсосберегающие процессы и аппараты химической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности

125 **Воронцов А.А., Егоров В.С., Капранова А.Б.** МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СЫПУЧЕЙ СМЕСИ…… 567
126 **Грызунов А.В., Верлока И.И., Капранова А.Б.** СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ В РЕГУЛИРУЮЩИХ КЛАПАНАХ……... 570
127 **Дышлевой Д.В., Лебедев А.Е., Гуданов И.С.** ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА В КЛАПАНЕ С ПРУЖИННЫМ ЗАПИРАЮЩИМ ОРГАНОМ…… 574
128 **Егоров В.С., Фёдорова Д.В., Воронцов А.А.** МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВЫХ СРЕД……... 582
129 **Иванов А.М., Волков М.В., Смирнова А.В.** МЕТОДИКА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПЛУНЖЕРНОГО ЗАТВОРА С ЛИНЕЙНОЙ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ …… 586
130 **Иванов К.Д.** МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГЕНЕРАТОРОВ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА……. 590
131 **Королев И.П.** СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕШАЛОК РАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ФИКСИРОВАННЫХ ПАРАМЕТРАХ ПРОЦЕССА……... 593
132 **Крутилов Д.А., Ермолов А.В., Капранова А.Б.** ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ ПОГРУЖНОГО ТИПА……. 595
133 **Наумов Д.А., Чистяков Н.А., Гуданов И.С.** ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИДЕАЛЬНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ТРУБЧАТОГО РЕАКТОРА……... 599
134 **Смирнова А.В., Грызунов А.В., Иванов А.М.** ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ: АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ……... 603
135 **Тихомиров В.А., Ермолов А.В., Капранова А.Б.** ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОТОРА БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ……... 607
136 **Федорова Д.В.**, **Егоров В.С., Капранова А.Б.** ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЫПУЧЕЙ СМЕСИ…….. 611

137 **Филинков Л.И., Смирнов П.М., Таршис М.Ю.** НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕСИТЕЛЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ БАРАБАННОГО ТИПА……. 615
138 **Хапов, А.А. Ефимов А.Е., Стенько Д.В.** ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА НА КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ СПИРАЛЬНОГО КОНТУРА, ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИУРЕТАНА……. 619
139 **Холодкова А.И., Лебедев А.Е.** ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОЙ ФАЗЫ, СОЗДАВАЕМЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ РАСПЫЛИТЕЛЯМИ …… 622
140 **Чаленко А.М.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ УСТОЙЧИВЫХ ЭМУЛЬСИЙ……... 627
141 **Щелокова А.О., Басалов И.С.** РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ МЕТАЛЛО-ПОЛИМЕРНОГО ГРАНУЛЯТА ПОСЛЕ ЕГО ОБРАБОТКИ В СТРУЙНОМ РЕАКТОРЕ…… 631
142 **Яковлева Е.А.** ФОРМИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В РУБАШКЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СМЕСИТЕЛЯ АЛЮМИНИЕВОЙ СУСПЕНЗИИ…….. 635

Направление 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В УПРАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

143 **Аверьянов И.С.** МОБИЛЬНЫЕ ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ТЕСТИРОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ……. 645
144 **Алексеев В.В., Шамахов Л.М.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИВОДОВ ШАГАЮЩЕГО МИНИ КРАНА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ…….. 650
145 **Алиев К.Э., Язев В.А.** РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО РАНЖИРОВАНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ТЕМ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ……. 653
146 **Баданов А.Е.** ИНТЕРАКТИВНАЯ КАРТА КАМПУСА УНИВЕРСИТЕТА КАК ЭЛЕМЕНТ ЦИФРОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ…… 661
147 **Воеводина Е.И., Наумов Д.В**. ОТ ЦИФРОВОГО СЛЕДА К УПРАВЛЕНИЮ КОМПЕТЕНТНОСТНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ: ИНЖЕНЕРИЯ ЗНАНИЙ И ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПЛАТФОРМАХ…... 665
148 **Герасимова А.К., Тюкин И.В.** ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА И ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ПРОЦЕССОВ….. 671
149 **Головкин С.М., Раухваргер А.Б.** АДАПТИВНОЕ УСИЛЕНИЕ КОНТРАСТА В ЛОКАЛЬНО-ФРАГМЕНТАРНОЙ СХЕМЕ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ……. 679
150 **Гончарова В.В., Марьясин О.Ю.** АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВОПРОС-ОТВЕТНЫХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ С ХУДОЖЕСТВЕННЫМИ ТЕКСТАМИ……. 684
151 **Григорьев В.А., Никитенко А.В.** ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ РИДА-СОЛОМОНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КАНАЛАМ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ БПЛА…….. 688
152 **Гурчиани Г.В., Тюкин И.В.** АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОДХОДОВ К ФОРМИРОВАНИЮ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ АСУТП НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА……. 692
153 **Евдокимов И.А.** ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ YOLOV8X ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ…….. 701

154 **Ерофеев С.Д., Раухваргер А.Б.** ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ФОРМУ И СТАТИСТИКУ ПЯТЕН…….. 708
155 **Ерофеевский М.А.** ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УЧЕБНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ…….. 711
156 **Есин Е.А.** ИССЛЕДОВАНИЕ ИИ-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ 3D-ПЕЧАТИ……... 716
157 **Жомова А.Р., Личак Н.А.** УМНЫЙ ГОРОД: КАК ИИ УПРАВЛЯЕТ ГОРОДСКИМ ТРАНСПОРТОМ…… 726
158 **Зайнагутдинов А.Р., Иванов А.В.** АДАПТИВНАЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА КАК МЕХАНИЗМ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНОСТЬЮ МОДЕЛИ…… 729
159 **Зорина Э.А., Аничкина О.А.** ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РАЗРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ: ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ……. 732
160 **Карпунин А.О.** АЛГОРИТМ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СОПЕРНИКА В ИГРЕ ≪КОРИДОР≫……... 739
161 **Каспирович Д.Р., Тюкин И.В.** ТРАНСЛЯЦИЯ НОТИРОВАННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ГРАФОВЫХ СТРУКТУР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ В СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПАКТНОЙ МОДЕЛИ T5……. 743
162 **Кокуева Ю.А., Борисова Ю.С., Воеводина Е.И.** СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ…… 750
163 **Копанев Е.А.** РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ЦЕЛОСТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВ ДОКУМЕНТОВ…… 757
164 **Красоткин К.С.** ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОРПОРАТИВНЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ АДАПТАЦИИ ITSM-ПОДХОДА…….. 763
165 **Крутов А.А., Бычков Е.А., Воеводина Е.И.** ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ…… 766
166 **Кузьменко И.М., Язев В.А.** МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДРЕЙФА ДАННЫХ В ПОТОКОВЫХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕТРИК…… 769
167 **Кухарчук А.А., Кухарчук Д.С.** АНАЛИЗ УГРОЗ И ОГРАНИЧЕНИЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ……... 777
168 **Кухарчук Д.С., Кухарчук А.А.** МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕЗИНФОРМАЦИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ…… 782
169 **Мельникова Е.Н., Раченко С.Е.** АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА И БАРЬЕРОВ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ…….. 789
170 **Милославов Н.А.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ МЕЛ-СПЕКТРОГРАММ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ЖАНРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ…….. 796
171 **Молотков И.Ю.** РАЗРАБОТКА ЧАТ-БОТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДОГОВОРОВ И КОНТРОЛЯ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ В СИСТЕМЕ 1С: ДОКУМЕНТООБОРОТ 3.0... 799
172 **Неволина С.Е., Киселев А.А.** ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКИ В 2026 ГОДУ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА…….. 804

173 **Пузанкова А.В.** СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ERP-СИСТЕМ В УПРАВЛЕНИИ НЕДВИЖИМОСТЬЮ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ……... 809
174 **Смирнов А.Л., Раухваргер А.Б.** ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ЧИСЛА RETRY-ЗАПРОСОВ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ БЭКЕНДА С ВНЕШНИМИ СЕРВИСАМИ ГЕНЕРАТИВНОГО ИИ……. 815
175 **Соколова Ж.С., Скецын А.А., Никитенко А.В.** КРИПТОАНАЛИЗ ЛЕГКОВЕСНОГО АЛГОРИТМА ASCON……... 819
176 **Старостин И.В., Харитонов А.П.** АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЛАМИНИРОВАННОГО СТЕКЛА……... 826
177 **Сурков А.А., Марьясин О.Ю.** СТРАТЕГИИ ОРКЕСТРАЦИИ АГЕНТОВ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТА……... 830
178 **Трохинский А.С.** ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO_2) В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CONVLSTM И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАУССОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ……... 835
179 **Угрюмов А.С.** ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ АППАРАТА ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСЕЙ: ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СМЕСИ ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ И ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ ПРОЦЕССА…... 840
180 **Филимонов А.С., Королев Л.В.** ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА СМЕСИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА…….. 848
181 **Чернявский К.А., Раухваргер А.Б.** ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ВЕБ-СЕРВИС ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СРАВНИТЕЛЬНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И СВЕДЕНИЯ АУДИОДАННЫХ……. 854
182 **Шарыгина Е.А., Смирнова А.А.** ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ…… 857
183 **Шахов И.М.** ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНЫХ ЗНАНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МОШЕННИЧЕСКИХ ТРАНЗАКЦИЙ…….. 866
184 **Ломейко А.И., Швец А.О.** ИИ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ СУБЪЕКТИВНОСТИ…….. 869
185 **Шиханов И.А., Горовой Ю.М.** РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ ФИНАНСОВЫХ ТРАНЗАКЦИЙ…….. 873
186 **Шулева Ю.Н., Соловьев М.Е., Чернюк А.И.** ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЛОПАТКИ-ИМИТАТОРА ГТД……. 879
187 **Щербаков В.А., Раухваргер А.Б.** ИСПОЛЬЗОВАНИЕ RAG В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРОВ ПРИЁМНОЙ КОМИССИИ……... 883
188 **Яковлев К.М.** КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ В УСЛОВИЯХ МЕЖДУНАРОДНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ……..... 887

Направление 1. АРХИТЕКТУРА И ДИЗАЙН, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 725.51

АРХИТЕКТУРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ РЕКРЕАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

А.С. Агабалян

Научный руководитель – **Н.Н. Кудряшов**, канд. архитектуры, профессор

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается архитектурная концепция рекреационного комплекса на берегу реки Юхоть в Ярославской области. Актуальность темы обусловлена растущим спросом на экологический туризм и необходимостью создания комфортной среды загородного отдыха. Проект направлен на рациональное использование природных ресурсов при сохранении уникального ландшафта.

Ключевые слова: *архитектурная концепция, рекреационный комплекс, генеральный план, интеграция в ландшафт, общественное здание*

ARCHITECTURAL CONCEPT OF THE RECREATION COMPLEX

A.S. Agabalyan

Scientific Supervisor – **N.N. Kudryashov**, Candidate of Architecture, Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the architectural concept of a recreational complex on the banks of the Yukhot River in the Yaroslavl region. The relevance of the topic is due to the growing demand for ecotourism and the need to create comfortable conditions for outdoor recreation. The project aims to effectively use natural resources while preserving the unique landscape.

Keywords*: architectural concept, recreational complex, master plan, integration into the landscape, public building*

Введение. Проект посвящен разработке рекреационного комплекса, расположенный на берегу реки Юхоть в Большесельском районе Ярославской области. Основной целью является создание современного, экологически ориентированного рекреационного комплекса, гармонично вписанного в природный ландшафт и отвечающего требованиям комфортного отдыха.

Актуальность темы обусловлена растущим спросом на экологический туризм и загородный отдых, а также необходимостью рационального использования природных ресурсов. Проект направлен на сохранение природной среды при одновременном развитии туристической инфраструктуры.

Характеристика участка.

Территория проектирования расположена в живописной природной зоне на берегу реки. Участок обладает рядом значительных преимуществ, таких как наличие природного водоема, выразительный рельеф, панорамные виды и благоприятная экологическая обстановка.

Важным фактором является развитая транспортная доступность (рис. 1). Вблизи расположены такие города, как Мышкин, Рыбинск, Тутаев, Ярославль, Углич и Борисоглебский. Также относительно недалеко находится Москва, что делает объект привлекательным для туристов из столицы.

Инженерная инфраструктура участка уже частично сформирована. На территории имеются две скважины, обеспечивающие водоснабжение, собственная электрическая подстанция, а также проведено оптоволоконное подключение к сети интернет. Это существенно упрощает реализацию проекта и снижает затраты на инженерную подготовку территории.

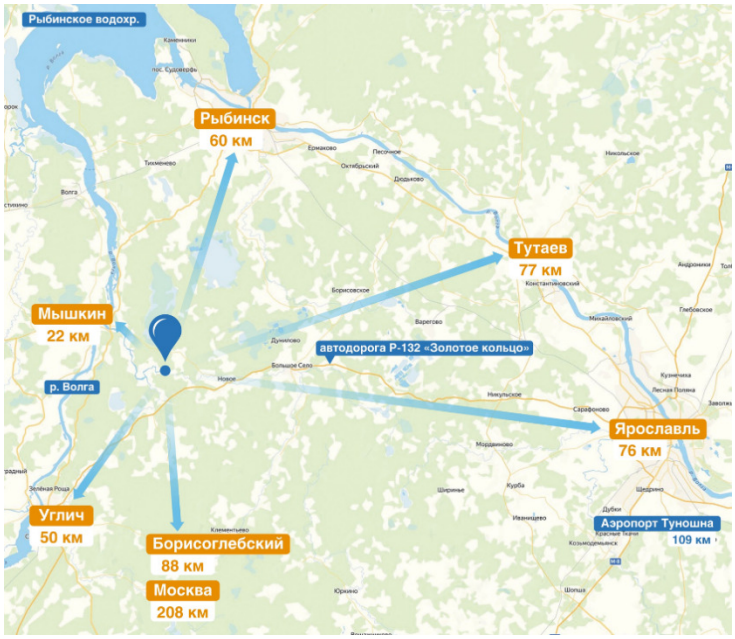


Рис. 1. Транспортная доступность

Концепция проекта

Основная концепция заключается в создании комфортной среды отдыха с минимальным воздействием на окружающую природу. Архитектурные решения ориентированы на использование природных материалов, интеграцию зданий в существующий ландшафт.

Проект предусматривает демонтаж части существующей застройки, представленной устаревшими домиками, не отвечающими современным требованиям. На их месте формируется новая структура размещения, включающая 18 жилых домиков различной этажности.

Жилая застройка

Проектируемые домики рассчитаны на индивидуальное и семейное размещение. Они имеют различную этажность — от одного до двух этажей, что позволяет разнообразить силуэт застройки и избежать монотонности.

Каждый домик оснащен собственной зоной барбекю, что способствует формированию приватного пространства для отдыха гостей. Размещение домиков выполнено с учетом ориентации на природные виды, а также с сохранением необходимой дистанции между объектами для обеспечения уединенности.

Общественные пространства

Важным элементом проекта является общественный центр, включающий конференц-зал с кафе-баром и универсальным залом для занятия спортом (рис. 2). Данный объект выполняет функцию центра притяжения для гостей, обеспечивая возможности как для делового общения, так и для отдыха.

Рис. 2. Общественный центр

Кроме того, на территории предусмотрена детская площадка, что делает комплекс универсальным и ориентированным на различные категории посетителей.

Рекреационная инфраструктура

Особое внимание уделено развитию рекреационной инфраструктуры. Проектом предусмотрено строительство живописного моста, соединяющего берега реки. Это решение не только улучшает пешеходную связанность территории, но и формирует выразительный архитектурный акцент.

Также предусмотрено устройство пристани, что позволяет использовать водный транспорт и развивать дополнительные виды отдыха, такие как прогулки на лодках.

Значимым элементом композиции является смотровая башня (маяк) высотой около 30 метров. На верхнем уровне располагается смотровая площадка, откуда открываются панорамные виды на окружающий ландшафт. Данный объект выполняет как функциональную, так и символическую роль, становясь доминантой всей территории.

Планировочная организация

Генеральный план территории разработан с учетом существующего рельефа и природных особенностей. Застройка имеет радиально-дуговую структуру, что позволяет максимально использовать видовые характеристики участка.

Дорожно-тропиночная сеть обеспечивает удобное перемещение между функциональными зонами. Основные пешеходные маршруты связывают жилую застройку с общественным центром, спортивной зоной и рекреационными объектами.

Экологические аспекты

Проект ориентирован на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Предусматривается использование энергоэффективных технологий, а также рациональное использование природных ресурсов.

Заключение

Таким образом, разработанный проект представляет собой комплексное решение, сочетающее современные архитектурные подходы и принципы устойчивого развития. Реализация проекта позволит создать привлекательный туристический объект, способствующий развитию региона и повышению качества отдыха посетителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. – М.: Минстрой России, 2016.

2) СП 118.13330.2022. Общественные здания и сооружения. – М.: Минстрой России, 2022.

3) СП 257.1325800.2020. Здания гостиниц. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2020.

4) СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. – М.: Минстрой России, 2020.

5) СП 82.13330.2016. Благоустройство территорий. – М.: Минстрой России, 2016.

6) Нефёдов, В.А. Ландшафтный дизайн и устойчивое развитие территорий. – СПб.: Архитектон, 2019.

7) Тетиор, А.Н. Экологическая инфраструктура городов. – М.: Академия, 2020.

8) Дмитриев, В.В. Экологический туризм и рекреационное проектирование территорий. – М.: Юрайт, 2021.

9) Ярославская область: инвестиционный и туристический потенциал региона. – Ярославль: Правительство Ярославской области, 2023.

10) Генеральный план развития туристско-рекреационного комплекса Ярославской области. – Ярославль, 2022.

11) Администрации Большесельского муниципального округа Ярославской области: официальный сайт. – URL: https://bolshoeselo-r78.gosweb.gosuslugi.ru/

УДК 7.038.06

КОНТЕКСТ КАК ПРОИЗВОДЯЩАЯ СИСТЕМА: ИКОНИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА КАК СИМПТОМ ТРАНСФОРМАЦИИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ THE SHARD, РЕНЦО ПЬЯНО)

О.А. Андреева, С.В. Расторгуев

Научный руководитель – **С.В. Расторгуев,** ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается городская среда как динамическая система, способная генерировать иконическую архитектуру. На примере The Shard рассматриваются условия формирования высотной доминанты в гибридном контексте района Southwark. Показано, что здание возникает как результат инфраструктурного, экономического и морфологического давления и выступает одновременно как отражение и усиление внутренних противоречий городской ткани. Проведено сопоставление с другими кейсами.

Ключевые слова: *городской контекст, иконическая архитектура, регенерация, урбанистика, Shard, сложные системы, морфология города, капитал, высотное строительство*

CONTEXT AS A PRODUCTIVE SYSTEM: ICONIC ARCHITECTURE AS A SYMPTOM OF URBAN TRANSFORMATION (CASE STUDY OF THE SHARD)

O.A. Andreeva, S.V. Rastorguev

Scientific Supervisor – **S.V. Rastorguev**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article examines the urban environment as a dynamic system capable of generating iconic architecture. Using The Shard as a case study, it analyzes the conditions that led to the emergence of a vertical dominant within the hybrid context of Southwark. The study shows that the building results from infrastructural, economic, and morphological pressures and simultaneously reflects and intensifies internal urban contradictions. Comparative cases are also considered.

Keywords*: urban context, iconic architecture, urban regeneration, complex systems, Shard, morphology, capital, high-rise development*

Небоскреб «Шард» вызывал острую полемику. Критики обвиняют его в разрыве исторической ткани Лондона и своём «монументе власти». Так, English Heritage заявляло, что здание – «осколок стекла, пронзающий сердце исторического Лондона». Архитекторы-консерваторы называли Шард «алтарём корпоративной элиты», «сигналом разросшегося социального неравенства». Перенасыщенность башен уже вначале ассоциировалась с элитарностью: смотровая галерея Шарда установила плату £25, что вызвало вопросы о её «доступности» для простых жителей.

В ответ автор проекта Ренцо Пьяно апеллирует к романтической риторике. Он подчёркивал образ «осколка стекла» и «маяка Лондона»: «при движении вокруг города вы видите новый ориентир. Он является своего рода маяком Лондона… дающим удивление и восхищение».

По его задумке, Шард – это «вертикальный город», который «не закрывает двери вечером, живёт 18 часов в сутки». Он называл Шард «датчиком Лондона», который «будет меняться вместе с погодой, отражая настроение». При этом Пьяно признавал риски: «люди говорят, что он слишком заметен, мешает виду на собор. Но в сущности: плохое ли это присутствие или хорошее? Я думаю, здание быстро станет частью Лондона, и оно не будет

мешать. Я не говорю, что оно как Собор Святого Павла… но это способ заявить о своём присутствии».

Таким образом, вокруг Шарда разворачиваются два полюса: скептики, видящие в нём агрессивную доминанту и символ элиты, и защитники, провозглашающие его знаковым «биением» города («маяком»). Эти противоположные оценки уже указывают на нелинейность восприятия: здание одновременно хочется обожествлять и ругать. В дальнейшем мы покажем, что такая двойственность продиктована самим контекстом района.

Мы основываемся на представлении о городе как сложной системе взаимоотношений. Анри Лефевр вводит идею города как «социального производства пространства»: городское пространство образуется не стихийно, а как результат исторических, социальных и экономических сил. Джейн Джейкобс подчёркивает важность многообразия и плотности взаимодействий: города живы благодаря «глазам на улице», смешению функций и свободным потокам людей. «Город – это не диаграмма, а живой организм», – утверждала она, критикуя механистическое планирование.

Христофер Александер в статье «Город не – древовидная структура» поясняет, что городские сети пересекаются и переплетаются, а не строятся по иерархической схеме. Эти теории согласны: нет единой шкалы для оценки города. Любой архитектурный объект одновременно попадает во множество «операционных систем» – экономику, социальную среду, визуальное восприятие и т.д. – где даёт свои, часто противоречивые, эффекты.

В рамках этих теорий объект архитектуры неотделим от контекста. Мы полагаем, что небоскрёб оказывается «симптомом» более глубоких процессов: он выявляет уже существующие напряжения в районах, а не сам эти напряжения создает. Архитектура, в данном случае, – результат работы всех этих систем, объединённых в городской ткани. Для анализа использованы качественные методы: морфологический анализ (отмечаем размеры и формы застройки), функциональный (разбиваем районы на типы использования), анализ потоков (оценка транспортного трафика и пешеходов) и сравнительный метод (исследование параллельных кейсов).

Проект The Shard начался в 1998 году, когда предприниматель Ирвайн Селлар приобрёл участок с устаревшей башней Southwark Towers. В 2000 году он привлёк Renzo Piano, который предложил образ «осколка стекла», давший название проекту.

После общественных слушаний 2002–2003 годов, несмотря на критику со стороны организаций по охране наследия, проект был одобрен как объект «исключительного дизайна». Строительство стало возможным после привлечения инвестиций: в 2008 году катарский консорциум приобрёл 80% проекта. Работы велись в 2009–2012 годах, открытие состоялось в июле 2012 года.

Здание задумано как «вертикальный город» с офисами, гостиницей, жильём и общественными функциями. Архитектурный образ вдохновлён контекстом: железнодорожной инфраструктурой, шпилями города и живописными силуэтами. Стеклянный фасад изменяется в зависимости от погодных условий.

Пьяно рассматривал проект как «маяк» и «сенсор города», акцентирующий его центр. Несмотря на критику, он предполагал, что здание со временем станет органичной частью Лондона.

Морфология. Улицы представляют собой смешение старой и новой застройки. Вокруг Шарда встречаются низко- и средне этажные здания (5–8 этажей), часто кирпичные и исторические (особенно южнее – район Borough Market). Крупными и ровными кварталами можно назвать лишь северо-восточную часть (напротив Мёрти-стрит/Гайд-стрит), где шли модернизации. По факту доминируют плотные, разнородные структуры. Сквозь них проложены улицы, пересекающиеся под разными углами, образуя «живую» ткань.

Транспортный узел. Здесь расположен главный южный вокзал – Лондон-Бридж. Это старейшая терминальная станция Лондона и одна из самых загруженных. До пандемии она обслуживала около 50 млн пассажиров в год (четвёртое место по загрузке среди лондонских вокзалов. Кроме пригородных поездов, это пересадочный узел метро (Линии Джубили и

Северная). Множество туристов пересаживается здесь, направляясь к достопримечательностям. Наличие таких потоков создаёт «горизонтальное давление»: вокруг станции много людей, работающих и гуляющих, что создаёт спрос на коммерцию и жильё на ограниченной площади.

Общественные пространства. Примером является знаменитый Borough Market – один из крупнейших уличных продовольственных рынков Лондона (существует со Средневековья, теперь занимает крытые галереи 19 века). Сегодня это аутентичный исторический рынок, популярный у горожан и туристов.

Культурные точки. В 1990–2000-х годах рядом обновили старые здания: Арт-объект Тейт-Модерн (преобразована электростанция), сектора креативной индустрии и пр. Это формирует среду «мягкой» регенерации (где старое сохраняется и находит новую функцию).

Экономика и земля. Территория быстро выросла в цене. Ещё в начале 2000-х Southwark Towers была ветхой «убитой» построечной, сейчас же вложены миллиарды фунтов. Крупные сделки: покупка англо-катарским консорциумом (привлечение катарского капитала позволило запустить проект). По неофициальным данным, к 2012 году стоимость квадратного метра набережной существенно выросла – несколько раз выше лондонского среднего (особенно благодаря проекту “London Bridge Quarter” стоимость участка взлетела). Данные о конкретных цифрах требует подробного сбора (агентства недвижимости, земельные реестры).

Район London Bridge получил статус Opportunity Area (в рамках стратегий городской регенерации Southwark и Greater London). Официальные документы позволяли высокие дома на прибрежных участках, чтобы «сбалансировать энергию финансового Сити на другой стороне реки».

Итак, Southwark – это не однородный исторический ландшафт, а гибрид. Тут сочетаются узкие улицы и оживлённый рынок, дворики и современный транспортный узел. Такая среда изначально нестабильна: нет единого «человеческого масштаба». Здесь же создались условия и «вызовы»: потребность в коммерческой и жилой нагрузке вблизи узла, большой земельной стоимости и одновременный гостеприимный дух центра города (рынки, музеи).

На основе описанных фактов выделяем основные пути влияний:

Инфраструктурное давление → вертикализация. Механизм: огромные пассажиропотоки Лондон-Бридж требуют концентрации функций рядом (рабочие места, жильё, сервисы). Горизонтальное расширение города чрезмерно дорого и неустойчиво (высказывание Пьяно: «перспектива городов 21 века – не застраивать полянами, а расти изнутри»). Увеличивая плотность в центре, градостроители «перераспределяют» загруженность на вертикаль.

Экономическое давление → уплотнение. Механизм: при высоких ценах на землю (особенно в зоне с ограниченным предложением) выгоднее строить ввысь. Заключение инвесторов (катарцев, Bank) в проект было обусловлено ожиданиями отдачи от премиальной недвижимости. Эти вложения подтвердили инвестиционную привлекательность района.

Гибридность ткани → «терпимость» иконического здания. Механизм: если в районе уже смешаны функции (историческое рядом с современным), люди менее категоричны. Например, рядом с Шардом стоит Кровавый Пороховой филиал Тейт-Модерна: когда в 2000-х его реконструировали, речь шла об «адаптивной регенерации». Неоднородная среда «готовит» город к радикальным решениям, создавая прецедент, что старое и новое могут уживаться. В случае Шарда к этому прибавляется общая тенденция централизованного роста: London Bridge указан как «ошибка бедной стороны Лондона», требующая притока инвестиций (выражение Ренцо Пьяно: «освежить энергию Сити, поставив сильный объект на южном берегу»).

В совокупности эти механизмы конвертировали давление контекста в появление Шарда. Как показывает теория сложных систем, здесь присутствует нелинейность: небольшой толчок (стратегия трамвайных линий и красная зона) дал «огромный» эффект

(310 м небоскрёб). Но также, как он возник не «в вакууме», его влияние на среду распадается на разные плоскости.

Для усиления аргументации рассмотрим параллельные примеры высотной застройки:

Лахта Центр (СПб) – построен как штаб-квартира Газпрома (462 м). В отличие от Шарда, Лахта «выпадает» из города: нет исторической застройки вокруг, а единственный высотный объект превращён в местный ориентир. Морфологический разрыв минимален: соседние районы не имели устойчивой низкой застройки. Этот случай показывает: внешняя регенерация (создание высотки на окраине) часто проходит без конфликта с контекстом. (Примечание: ранее планировавшийся проект «Охта Центр» у центра Северной столицы (подняться до 400 м у Смольного) был отвергнут городом ради сохранения исторической доминанты).

Canary Wharf (Лондон) – специально выделенная зона доков, на которой в 80–90-х годах с нуля поставили бизнес-центр. Морфология изначально формировалась под небоскрёбы (изначально требовались канатоходцы мостов, станции DLR). Контекст — вовсе не смешанный: зона «закрытого» финансового кластера. Из этого следует, что конфликт минимален, поскольку высотность вписывается в изначальную стратегию.

Shanghai, Pudong – созданный с нуля финансовый район, в котором правительство распланировало высотные здания (东方明珠塔, 金茂大厦, 上海中心 и др.). Контекст отсутствует: бывшие сельхозугодия стали небоскрёбами за несколько лет. Это подчеркивает: когда контекст целенаправленно готовится для иконической, восприятие противоречий отсутствует – по сути, новшество соответствует ожиданиям и считается символом прогресса.

В целом сравнительная панорама показывает: конфликт между иконой и контекстом возникает там, где контекст не был подготовлен к такой доминанте. В Southwark контекст развивался стихийно, поэтому Шард воспринимают и как дестабилизацию, и как толчок к развитию.

Полученные данные позволяют обобщить: один и тот же объект (The Shard) создаёт многослойные, противоречивые последствия.

Морфологический эффект. Шард резко увеличивает вертикальный разрыв с окружающими зданиями (306 м против типичных 5–15 м). С одной стороны, он формирует новый силуэт Лондона; с другой — нарушает спокойную ритмику улицы и затеняет низкие дома. Следовательно, с точки зрения традиционного «человеческого масштаба» Шард — негатив («разрушает контекст»).

Экономический эффект. Небоскрёб привлекает инвестиции и создаёт новые рабочие места (офисы, гостиницу, сервисы). Открытие смотровой площадки, магазинов и ресторанов увеличивает туризм и потребительский спрос. Сегмент жилья поднимает локальную стоимость недвижимости. В этой плоскости Шард – позитив (район обретает дополнительные доходы и востребованность).

Визуальное/перцептивное воздействие. Для прохожего Шард – аттракция: он «играет» в отражения неба и становится удобной меткой на навигационных картах. С другой стороны, его монолитность и блеск многих раздражают (некоторые жалуются на «забрали воздух» у соседей). Пьяно говорил, что здание «меняет свой вид» с погодой, но скептики говорят: «мы ничего не сканируем в нём, кроме яркого блеска и собственных тёмных мыслей».

Все вышеперечисленные оценки противоречат друг другу. Если бы существовала единая метрика «значимости для города», Шард не поместился бы в один промежуток. Это демонстрирует «нелинейность»: эффект целого не сводится к сумме простых хороших/плохих компонентов. Важно подчеркнуть, что архитектуру можно критиковать и хвалить, но уже исходя из выбранных шкал.

В этой статье мы показали: иконическая архитектура как The Shard рождается в динамической среде, а не просто вставляется в город «сверху». Городской контекст выступает производителем таких объектов: давления от инфраструктуры, рынка и смешанных функций выливаются в «вертикальные решения». Шард же, в свою очередь,

концентрирует внутренние противоречия Southwark, усиливая одни тенденции (экономические) и обостряя другие (социальные, визуальные).

Вывод можно сформулировать так: архитектурный объект вырывается за рамки линейной «хорошо/плохо» оценки, ибо он интегрирован в многоуровневую систему». Здание выступает одновременно и эффектом среды, и её фактором. Это объясняет, почему дискуссии вокруг «икон» зачастую безрезультатны: критики говорят о затенении и классовом разделении, поклонники – о знаковости и развитии, но оба видят только часть целого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Лефевр, А. Производство пространства / А. Лефевр; пер. с фр. – М.: Strelka Press, 2015. – 432 с.

2) The Death and Life of Great American Cities. – New York: Random House, 1961. – 458 p.

3) The Condition of Postmodernity. – Oxford: Blackwell, 1989. – 378 p.

4) Roberts, P. Urban Regeneration: A Handbook / P. Roberts, H. Sykes. – London: SAGE Publications, 2000. – 320 p.

5) The New Urban Frontier. – London: Routledge, 1996. – 288 p.

6) The Shard // Architectural Record. – 2013. – № 7. – P. 120–129.

7) The Shard Review // RIBA Journal. – 2013. – Vol. 120, № 9. – P. 56–63.

8) The Shard and London Bridge Place // Archisearch. – 2012. – URL: https://www.archisearch.gr (дата обращения: 10.04.2026).

9) The Shard: triumph or travesty // The Guardian. – 2012. – URL: https://www.theguardian.com (дата обращения: 10.04.2026).

УДК 711.523

РЕВИТАЛИЗАЦИЯ ТАБАЧНОЙ ФАБРИКИ ИМ. ДУНАЕВА «БАЛКАНСКАЯ ЗВЕЗДА» В ЯРОСЛАВЛЕ: БАЛАНС ИСТОРИЧЕСКОГО КОНТЕКСТА И СОВРЕМЕННОЙ ЗАСТРОЙКИ

П.А. Аристова, Е.А. Белявчина

Научный руководитель – **Д.А. Турбин**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье представлена концепция ревитализации территории бывшей табачной фабрики «Балканская звезда» в историческом центре Ярославля. Авторы предлагают трансформацию промышленной зоны в многофункциональный жилой комплекс. Особое внимание уделено формированию общественных пространств — пешеходной улицы и площади по принципу «зала под открытым небом». Проект направлен на ликвидацию «пространственного разрыва» городской ткани и адаптацию индустриального наследия под современные нужды города.

***Ключевые слова**: ревитализация, промышленное наследие, исторический центр Ярославля, многофункциональный жилой комплекс, объект культурного наследия, общественные пространства, городская среда*

REVITALIZATION OF THE DUNAEV TOBACCO FACTORY "BALKANSKAYA ZVEZDA" IN YAROSLAVL: BALANCING HISTORICAL CONTEXT AND MODERN DEVELOPMENT

P.A. Aristova, E.A. Belyavchina

Scientific Supervisor – **D.A. Turbin**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article presents a concept for the revitalization of the former "Balkanskaya Zvezda" tobacco factory in the historical center of Yaroslavl. The authors propose the transformation of the industrial zone into a mixed-use residential complex. Special attention is paid to the formation of public spaces – a pedestrian street and a square designed as an "open-air hall." The project aims to eliminate the "spatial gap" in the urban fabric and adapt the industrial heritage to the modern needs of the city.

***Keywords:** revitalization, industrial heritage, historical center of Yaroslavl, mixed-use residential complex, cultural heritage site, public spaces, urban environment*

Современные города сталкиваются с необходимостью переосмысления промышленных территорий, утративших своё первоначальное назначение. Ревитализация таких объектов – не просто снос и застройка, а сложный процесс интеграции исторического наследия в современную городскую ткань.

Ярославль, обладающий статусом города ЮНЕСКО, сталкивается с проблемой «серых зон» – заброшенных промышленных территорий в историческом ядре. Табачная фабрика им. Дунаева «Балканская звезда» в Ярославле – яркий пример объекта, требующего ревитализации. Расположенная в исторической части города, фабрика представляет собой сочетание зданий разных эпох, часть из которых не имеет культурной ценности, а другие – несут отпечаток промышленной архитектуры прошлого.

Территория бывшей табачной фабрики им. Дунаева «Балканская звезда» является важным узлом в планировочной структуре центра Ярославля. На протяжении десятилетий этот квартал функционировал как закрытый промышленный анклав, что привело к разрыву городской ткани.

Среди ключевых проблем можно выделить: возведение за годы эксплуатации территории хаотичных пристроек, нарушивших историческую морфологию квартала; отсутствие связи с окружающей застройкой; деградация территории, снижающая визуальное и функциональное качество городского пространства; изолированность от пешеходных маршрутов и общественной жизни города.

Ревитализация данной территории — это не просто строительство жилья, а хирургическое восстановление целостности исторического центра. Также важно сохранить элементы, имеющие историческую ценность, подчеркнуть связь с прошлым через архитектурные решения и интегрировать новые постройки в существующую городскую среду.

Цель проекта — трансформировать промышленную зону в многофункциональный жилой комплекс (МФК), сохранив гармонию с окружающей средой и подчеркнув исторический контекст места.

Основная идея проекта — восстановить фронт улицы, нарушенный в результате деградации промышленной зоны. Вместо точечной застройки предполагается создание МФК с замкнутой структурой, что обеспечит приватность внутренних дворов и создаст удобные пешеходные маршруты. Это обеспечит гармоничное сочетание старой и новой застройки и предложит жителям разнообразную инфраструктуру. Часть построек на территории фабрики не представляет культурной ценности — их демонтаж освободит пространство для новой застройки, улучшит визуальное восприятие территории и оздоровит городскую среду.

Новые здания будут выполнены в стилистике характерной для традиционной архитектуры Ярославля: комбинированное использование кирпича и натуральных материалов отделки; умеренная этажность (3–5 этажей); декоративные элементы, отсылающие к историческому наследию. При этом новые постройки не будут доминировать над сохранившимися историческими зданиями фабрики. Высота новых зданий будет сопоставима с историческими объектами, фасады – сдержанными, без ярких акцентов, что позволит сохранить визуальную связь между старой и новой застройкой. Использование штукатурной отделки для новых объёмов, созвучной дому И. Н. Дунаева и окружающим зданиям, позволит расширить контекст проекта: комплекс интегрируется не только в промышленную, но и селитебную среду Ярославля, создавая гармоничный переход от производственной эстетики к традиционной архитектуре города.

Комплекс будет включать жилые дома, коммерческие помещения на первых этажах (магазины, кафе, сервисы), открытые общественные пространства (пешеходные зоны) и подземные парковки для минимизации нагрузки на улицы.

Особое внимание в проекте уделяется раскрытию исторического облика фабрики. Использование арок и разрывов в композиции новых корпусов позволит открыть исторические фасады фабрики для горожан. Ранее закрытая промышленная территория превратится в часть публичного пространства, где архитектурное наследие станет доступным для осмотра и использования.

Здания фабрики, имеющие культурную ценность (ОКН), будут реставрированы. Планируется восстановить фасады с сохранением оригинальных деталей и адаптировать внутренние помещения под современные нужды – например, под офисы, музеи или творческие пространства.

Ключевой особенностью проекта станет создание пешеходной улицы и площади — это задаст новый вектор развития территории и сформирует ядро общественной жизни района. Пешеходная улица соединит разные части комплекса, станет местом для прогулок и повседневного общения жителей, а также послужит площадкой для локальных мероприятий – ярмарок, фестивалей, сезонных выставок.

В центре квартала формируется открытая площадь, которая служит ядром композиции. Уникальность и психологический комфорт проектируемой площади базируются на принципе пространственной замкнутости. Согласно градостроительным теориям К. Зитте, успешная площадь должна восприниматься человеком как «зал под

открытым небом», где небо служит потолком, а фасады зданий – стенами. В проекте этот эффект достигается за счёт:

Тектоники «стен»: Фасады исторических корпусов и новых жилых блоков формируют чёткий, непрерывный периметр. Разнообразие отделки создаёт интерьерный уют, превращая площадь в «городскую гостиную».

Масштаба и пропорции: Соотношение высоты зданий (стен «комнаты») к ширине площади выбрано таким образом, чтобы человек чувствовал себя защищённым, но не подавленным. Это создаёт ощущение сопричастности и камерности, характерное для лучших европейских и старых русских площадей.

Визуальных пауз: Сквозные арки и пешеходная улица воспринимаются не как разрывы, а как «двери» в этот зал, обеспечивая связь с внешним миром без утраты чувства уединения внутри квартала.

Такой подход позволяет превратить территорию жилого комплекса в место длительного пребывания, где фасады зданий становятся художественным обрамлением для повседневной жизни города.

Площадь организует пространство вокруг ОКН, позволяя рассмотреть их фасады с оптимальных точек обзора. Она становится местом социальной активности — проведения ярмарок, выставок или отдыха жителей. Это решение превращает МФК из закрытой территории в полноценную часть городского общественного пространства, формируя единый ансамбль старого и нового.

Пространство площади будет спроектировано с учётом всесезонного использования: летом здесь можно будет проводить открытые кинопоказы и мастер-классы, зимой — организовать новогодний городок с ёлкой и ярмаркой.

Таким образом, ревитализация фабрики имеет ряд преимуществ и в отношении всего района. С экономической точки зрения будут привлечены инвестиции в развитие территории. Появятся новые рабочие места, и увеличится налоговая база города. В социальном плане проект улучшит качество жизни жителей района, поспособствует развитию инфраструктуры и сохранению исторического наследия. С экологической стороны – озеленение территории и снижение нагрузки на транспортную сеть за счёт многофункциональности комплекса положительно скажется на окружающей среде.

Создание единого ансамбля на стыке старого и нового доказывает, что современное жилье может не только соседствовать с памятниками архитектуры, но и служить инструментом их сохранения и популяризации. Такой подход обеспечивает органичное включение промышленного наследия в современную жизнь исторического города.

Ревитализация территории бывшей табачной фабрики «Балканская звезда» в Ярославле – это не просто смена функции промышленного объекта на жилую, а создание качественно новой городской экосистемы, основанной на трёх фундаментальных принципах:

Архитектурная синергия: Проект доказывает, что органичное сосуществование ОКН (жирный контур) и современной застройки (тонкий контур) достигается через метод контекстуального планирования. Использование комбинированных материалов – аутентичного кирпича и штукатурки, созвучной дому И.Н. Дунаева, – позволяет сформировать единый архитектурный ансамбль, который не имитирует старину, а ведёт с ней уважительный диалог.

Пространственный интерьер: Ключевым достижением планировки является создание внутренней пешеходной улицы и центральной площади, спроектированной по принципу «зала под открытым небом». Благодаря замкнутости контура и сомасштабности фасадов общественное пространство приобретает интерьерный уют и камерность, превращая бывшую закрытую зону в «городскую гостиную», безопасную и комфортную для человека.

Градостроительная регенерация: Реализация данного МФК позволяет ликвидировать «пространственный разрыв» в центре Ярославля, восстанавливая квартальную структуру и связность пешеходного каркаса города. Метод «подземного урбанизма» (вынос парковок под

землю) освобождает территорию для благоустройства, превращая индустриальное наследие из депрессивного пустыря в драйвер устойчивого развития исторического центра.

Предложенная модель ревитализации является оптимальным сценарием для будущего развития исторического центра Ярославля, так как она соблюдает баланс между требованиями охраны наследия ЮНЕСКО и потребностями современного горожанина в комфортной, многофункциональной и эстетически ценной среде. Такой подход к переосмыслению промышленных территорий может стать примером для других городов России, где заброшенные фабрики и заводы занимают ценные участки в исторической части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Зитте, К. Художественные основы градостроительства: пер. с нем. / К. Зитте. – Москва: Стройиздат, 1993. – 255 с.

2) Кудряшов, Н.Н. Формула эстетической массы. Формула красоты города. Ярославль, 2022.

3) Кудряшов, Н.Н. Анализ объектов Всемирного наследия в условиях регенерации исторической среды / Н.Н. Кудряшов, М.Н. Кудряшов // Реставрация крупных архитектурных комплексов – путь к восстановлению исторической городской среды: Международная научно-практическая конференция 1-3 июля 2017 г.: сб. докладов. – Ростов, 2021. – С. 55-65.

4) Щенков, А.С. Ревитализация исторических промышленных территорий: учеб. пособие / А. С. Щенков. – Москва: Архитектура-С, 2012. – 160 с.

УДК 727

АРХИТЕКТУРА ВАЛЬДОРФСКИХ ШКОЛ

П.Е. Барышева

Научный руководитель – **С.А. Буров**, доцент

Ярославский государственный технический университет

Проектом рассматривается влияние антропософских идей Рудольфа Штайнера на архитектуру современной школы

Ключевые слова: *вальдорфская школа, архитектура вальдорфских школ, гётеанум*

ARCHITECTURE OF WALDORF SCHOOLS

P. E. Barysheva

Scientific Supervisor – **S.A. Burov,** Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The project examines the influence of Rudolf Steiner's anthroposophical ideas on the architecture of a modern school.

Keywords: *Waldorf school, architecture of Waldorf schools, Goetheanum*

Архитектура вальдорфских школ представляет собой симбиоз гармонии пространства и образования

Вальдорфские школы возникли в начале 20 века по инициативе Рудольфа Штайнера, основателя антропософии. Антропософия (от греч. ἄνθρωπος — «человек» и σοφία — «мудрость») — учение о духовной природе человека и мира и методах их постижения. Главной идеей стало создание образовательной среды, которая поддерживает свободу и целостность ребенка: развитие воображения, творческого мышления и устойчивого отношения к миру. Архитектура здесь выступает не просто фоном, а активной педагогической средой, цель которой – формировать образ жизни, соответствующий антропософскому взгляду на человека и развитие его пяти чувств, двигательных и творческих способностей.

Штайнер не устанавливал никаких догм для языка архитектурных форм. Он считал, что искусство невозможно объяснять, его нужно сопереживать. Штайнер, как и Гёте, утверждал, что все виды искусства, в том числе и архитектура, выражают то, что другим путем выразить невозможно. Архитектура не относится к свободным видам искусства, ее задачей является создание пространственных “оболочек” для жизни людей. Поэтому цель антропософской архитектуры – создавать активизирующую жизненную среду, особая атмосфера которой может влиять на конкретную деятельность людей.

Ключевые принципы архитектуры вальдорфских школ:

Естественность и тепло материалов: дерево, камень, гипс, натуральные краски. Материалы создают здоровую и уютную атмосферу, снижают стресс и поддерживают внимание.

Многофункциональность и гибкость: пространства адаптируются под разную деятельность – уроки, мастерские, музыкальные и художественные занятия, игры на свежем воздухе.

Интеграция с природой: внутренние дворы, сады, площадки. Природа выступает партнёром в обучении, вдохновляя детей и усиливая ощущение связи с окружающим миром.

Эстетика формы и ручной труд: свет, линии, пропорции рассчитаны на создание

спокойствия и благоприятной для концентрации среды.

Социальная архитектура: открытые, светлые классы способствуют сотрудничеству и взаимному уважению между учениками и педагогами. Часто применяются ситуативные зоны для самостоятельной работы и совместных проектов.

Интеграция искусства и ремесел: пространства для ручного труда, рисования, музыки и театра – не отдельные помещения, а неотъемлемые части учебного процесса.

Примером воплощения принципов образовательной архитектуры, выведенных Штайнером, стало здание Гётеанума.

Гётеанум – это одно из ключевых зданий в истории архитектуры вальдорфских школ и антропософии в целом. Оно стало духовным и культурным центром движения, заложив философские и эстетические принципы, которые позже нашли воплощение в педагогике и архитектуре вальдорфских школ.

Рис. 1. Первое здание Гётеанума

Получил свое название в честь поэта и драматурга Иоганна Вольфганга фон Гёте, чьё учение о гармонии духа и искусства оказало влияние на развитие антропософии.

Первый Гётеанум (рис. 1) был построен в1913-1919 годах и расположен в Ваймаре, Германия. Он олицетворял собой гармоническое сращение различных видов искусства («гезамткунстверк»). Все элементы имели символическое значение. Здание, словно вырастающее из холма, было спроектировано без прямых и заостренных углов, оно отличалось и от построек эпохи модерна, имитирующих природные формы, и от строгих геометрических конструкций. Из особенностей форм, здание не имеет прямых углов и каждая его часть наделена мистическим смыслом, которую стоит воспринимать как одну большую идею становления и развития человека. Первый Гётеанум сгорел в ночь с 31 декабря 1922 на 1 января 1923 года. Новое здание (рис. 2) было построено в городе Дорнах близ Базеля (Швейцария). Новый Гётеанум был построен из литого бетона. Визуально здание заметно отличается от предшественника - новый материал дал новые возможности, позволив создать в архитектурном масштабе скульптурные формы с выраженными изгибами и переходами, вогнутыми и выпуклыми деталями, но по-прежнему без прямых углов. Согласно замыслу автора, все элементы декора - необходимая часть целого, а форма фасада органически связана с внутренним пространством. Интерьеру уделили большое внимание: породы древесины для отделки подбирались, как для музыкальных инструментов, чтобы были ощутимы «вибрации» всех искусств. Оно представляло собой многопрофильный центр: место собраний, художественных мероприятий, театральных постановок и

философских дискуссий. Оба здания можно назвать своеобразной трактовкой органической архитектуры.

Рис. 2. Второе здание Гётеанума

Впоследствии при возведении новых вальдорфских школ и других зданий, связаных с учением Штайнера архитекторы, опирались на образ Гётеанума и идеи антропософской архитектуры.

Рис. 3. Вальдорфская школа в Пренцлауэр-Берге

Вальдорфская школа в Пренцлауэр-Берге (рис. 3), Архитектура: Kersten + Kopp. Включает детский сад, клуб продлённого дня, школу, образовательный центр и спортзал. Все построенные здания оснащены зелёными крышами, удерживающими дождевую воду. Ландшафтные курганы с дикой растительностью создают игровые площадки по краям открытых пространств.

Рис. 4. Вальдорфская школа в округе Акеслунд в Бромме

Вальдорфская школа в округе Акеслунд в Бромме (рис. 4) была разработана в 1966 Эриком Асмуссеном. У здания есть несколько характеристик, которые характеризуют вдохновленную антропософией архитектуру, как с точки зрения формы, так и цветовой гаммы. Вокруг школьного двора есть несколько небольших павильонов с классами для младших классов.

Рис. 5. Антропософский культурный центр в Ярне

Антропософский культурный центр в Ярне (рис. 5), Швеция, разработан Эриком Асмуссеном. Является скандинавским антропософским центром и состоит из школы, студенческих домов, библиотеки, мастерских, концертных залов, магазинов, больниц, пекарни и эвритмеума. Объект состоит из большого количества зданий, которые были построены между 1968 и 1992 годами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) After-School Care Centre Waldorf School / MONO Architekten. – URL: https://www.archdaily.com/932433/after-school-care-centre-waldorf-school-mono-architekten (дата обращения: 31.03.2026)

2) Kulturhuseti Ytterjärna Erik "Abbi" Asmussen. – 02.11.2013. – URL: https://vk.ru/wall-59008461_26602?w=wall-59008461_26602&ysclid=msei38v61289847867

3) Steiner, R. Das architektonische Werk I: Das Goetheanum und seine Vorläufer. – Roland Halfen, 2022. – 488 p.

4) Рудольф Штейнер и Гётеанум: самое необычное сооружение Швейцарии. – URL: https://www.interior.ru/architecture/6571-rudolf-shtejner-i-g-teanum-samoe-neobychnoe-sooruzhenie-shvejtsarii.html (дата обращения: 31.03.2026)

5) Гётеанум: Путь зерна. – URL: https://www.putzerna.ru/pedagogika/rudolf-steiner/goetheanum/?ysclid=mnoxe1fkki240299432 (дата обращения: 31.03.2026)

УДК 725.826

СПЕЦИФИКА ФУНКЦИОНАЛЬНО ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ АВТОСПОРТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ

М.О. Богомолов

Научный руководитель – **Н.В. Хомутова**, канд. архитектуры, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается трансформация современных гоночных треков в многофункциональные комплексы, которые помимо автоспортивных соревнований принимают крупные музыкальные фестивали, концерты мировых звёзд, корпоративные мероприятия и другие массовые события. В статье анализируются архитектурные решения, обеспечивающие быструю адаптацию пространства. Рассмотрены экономические преимущества круглогодичной загрузки, влияние на расширение аудитории и перспективы устойчивого развития гоночных комплексов

Ключевые слова: *гоночный трек, многофункциональный комплекс, архитектура трека, устойчивое развитие, функциональные решения гоночных комплексов, архитектура авто спортивных комплексов*

SPECIFIC FEATURES OF FUNCTIONAL AND PLANNED ORGANIZATION OF AUTO SPORTS COMPLEXES

M.O. Bogomolov

Scientific Supervisor — **N.V. Khomutova**, Candidate of Architecture, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article examines the transformation of modern racing tracks into multifunctional complexes that, in addition to motorsport competitions, host major music festivals, concerts by world stars, corporate events and other mass events. The article analyzes architectural solutions that ensure rapid adaptation of the space. The economic advantages of year-round loading, the impact on the expansion of the audience and the prospects for the sustainable development of racing complexes are considered.

Keywords: *racing track, multifunctional complex, track architecture, sustainable development, functional solutions of racing complexes, architecture of auto sports complexes*

За последние годы автодромы заметно изменили свою роль. Если раньше они воспринимались прежде всего как специализированные спортивные арены, живущие по ритму нескольких гоночных уик-эндов в сезон, то сегодня речь всё чаще идёт о многоформатных площадках с почти непрерывным календарём. На одной и той же территории теперь соседствуют этапы Formula 1, NASCAR и MotoGP, большие музыкальные open-air, корпоративные форумы, отраслевые выставки, массовые городские события и семейные программы.

Решающим фактором в эволюции автодромов становится не только спортивная функция, сколько сама пространственная логика объекта. Сегодня такие комплексы все чаще задумываются не как трасса в привычном смысле, а как многослойная среда, где гонки занимают лишь одну из возможных ролей. По сути, речь идет об архитектурной модели: площадка должна одинаково уверенно работать и в дни крупных чемпионатов, и в периоды между ними, когда на первый план выходят концерты, деловые мероприятия, выставки и массовый досуг.

Эта гибкость закладывается еще на стадии проектирования. Трибуны делают не просто вместительными, а адаптируемыми под разные сценарии использования; в ряде случаев их конфигурация позволяет интегрировать сценические конструкции, медиаэкраны и временные павильоны без сложной перестройки. Пространства паддока, VIP-блоки и нередко проектируются по принципу двойного назначения: в гоночные дни они

обслуживают команды, партнеров и гостей, а в остальное время работают как площадки для форумов, презентаций и корпоративных программ.

Особое значение приобретает и окружающая территория. Ландшафт здесь давно перестал быть декоративным дополнением. Внутренние поля, внешние периметры и буферные зоны используются как самостоятельные площадки для кемпинга, гастрономических фестивалей, семейных активностей и временных общественных пространств. На практике это проявляется в том, что объект начинает притягивать аудиторию не только как место соревнований, но и как полноценная точка культурного и социального взаимодействия.

Не менее важна скрытая от глаз инженерная основа. Подъездные маршруты, парковочные массивы, энергоснабжение, дренаж, санитарные узлы, системы контроля доступа, безопасность и внутренняя логистика проектируются с расчетом на быстрый переход от одного режима работы к другому. Если раньше для смены формата требовались существенные затраты и длительная подготовка, то сейчас многие комплексы способны менять функциональный сценарий за несколько дней. В ряде случаев это сокращает организационные издержки на 15-20% и делает эксплуатацию заметно устойчивее. Именно поэтому современный автодром можно рассматривать не как статичную спортивную арену, а как архитектурно выверенную платформу, где каждая зона заранее подчинена идее трансформации, а сама среда работает на экономическую эффективность не меньше, чем на зрелищность.

Логика такой трансформации хорошо работает: посетитель покупает уже не отдельное действие, а насыщенный сценарий присутствия. В случае автодрома это особенно заметно. Зритель едет не только на гонку, а на событие, где спорт, музыка, гастрономия, кемпинг, фан-активности и развлекательная среда собираются в единый продукт. К этому стоит добавить чисто экономический фактор. Крупная гоночная арена эксплуатируется по прямому назначению ограниченное число дней в году; всё остальное время она либо простаивает, либо требует затрат без достаточной отдачи. По оценкам консультантов в сфере управления и координации деятельности площадок, которые предоставляют пространства для мероприятий, у крупных комплексов от 25 до 40% сопутствующей выручки уже формируется за пределами собственно спортивного календаря. На практике это проявляется в том, что концертный и событийный блоки становятся не дополнением, а одним из ключевых источников устойчивости.

Выгода здесь двусторонняя. Организатор получает пространство, где уже решены самые сложные вопросы массового мероприятия: подъездные пути, парковки, санитарные зоны, системы безопасности, трибунная инфраструктура, точки питания, технические мощности, логистика сцены и персонала. Сам объект, в свою очередь, расширяет аудиторию. К традиционным поклонникам автоспорта добавляются любители живой музыки, корпоративные клиенты, туристы и семьи с детьми.

Рис. 1. Silverstone Circuit

Один из наиболее показательных примеров – Silverstone в Великобритании (рис. 1). Во время British Grand Prix площадка фактически перестраивается в формат четырёхдневного фестиваля. Днём центр внимания удерживают заезды и гоночная программа, вечером на первый план выходит музыка. В 2026 году на M&S Mainstage заявлены David Guetta, Richard Ashcroft, Chase &Status и Rag'n'Bone Man; их выступления дополняют Anne-Marie, Fatboy Slim и другие популярные артисты. В результате спортивный уик-энд превращается в многослойное событие, где посетитель получает не один повод для поездки, а сразу несколько. Эффект усиливают кемпинг, фан-зоны и вечерняя развлекательная среда. При том, что посещаемость британского этапа Formula 1 в отдельные годы приближается к 450-480 тыс. человек за несколько дней, музыкальная программа здесь работает уже не как декоративное приложение, а как самостоятельный фактор спроса.

Важно и то, что Silverstone не ограничивается одним главным стартом сезона. Отдельно проводится Silverstone Festival – мероприятие, соединяющее исторический автоспорт и живую музыку. В 2025 году на нём выступали Natasha Bedingfield, Craig David и Ministry of Sound Classical. Можно заметить, что площадка использует собственную архитектуру предельно гибко: крупные трибуны, внутреннее поле, паддок и временные сцены легко объединяются в разные конфигурации. Именно эта трансформируемость делает объект привлекательным для событийного рынка (рис. 2).

Рис. 2. Silverstone Festival

Ещё дальше в сторону универсального развлекательного центра продвинулся Circuit of the Americas в Остине (рис. 3). Формально это трасса Formula 1, но по сути – автономный комплекс площадью около 600 гектаров. Уже одно это меняет масштаб восприятия: речь идёт не о стадионе в узком смысле, а о пространстве, которое можно программировать десятками способов. На территории работает Germania Insurance Amphitheater – одна из крупнейших открытых концертных площадок Техаса, вмещающая до 18 тыс. зрителей (рис. 4). Вне гоночных дат здесь выступают KidCudi, MGK, Godsmack, KaliUchis, HilaryDuff, Muse и другие артисты, то есть музыкальная афиша живёт собственной жизнью и не привязана к Формуле-1.

Во время United States Grand Prix развлекательный слой становится ещё плотнее. В 2025 году в программу были включены выступления Kygo, GarthBrooks и Turnpike Troubadours непосредственно на территории автодрома. Но и этим дело не ограничивается: здесь проходят X Games, этапы MotoGP, картинговые сессии, деловые конференции, дрон-шоу, частные мероприятия. Пространства Grand Plaza и PaddockLoft позволяют собирать события очень разного масштаба – от массового open-air до камерного делового формата. В ряде случаев наблюдается именно та конфигурация, о которой говорят специалисты по

событийной урбанистике: объект начинает функционировать как «город в городе», где каждая зона имеет собственную коммерческую логику. Для инвестора это особенно важно, поскольку зависимость от одного-двух крупных стартов заметно снижается.

Рис. 3. Circuit of the Americas

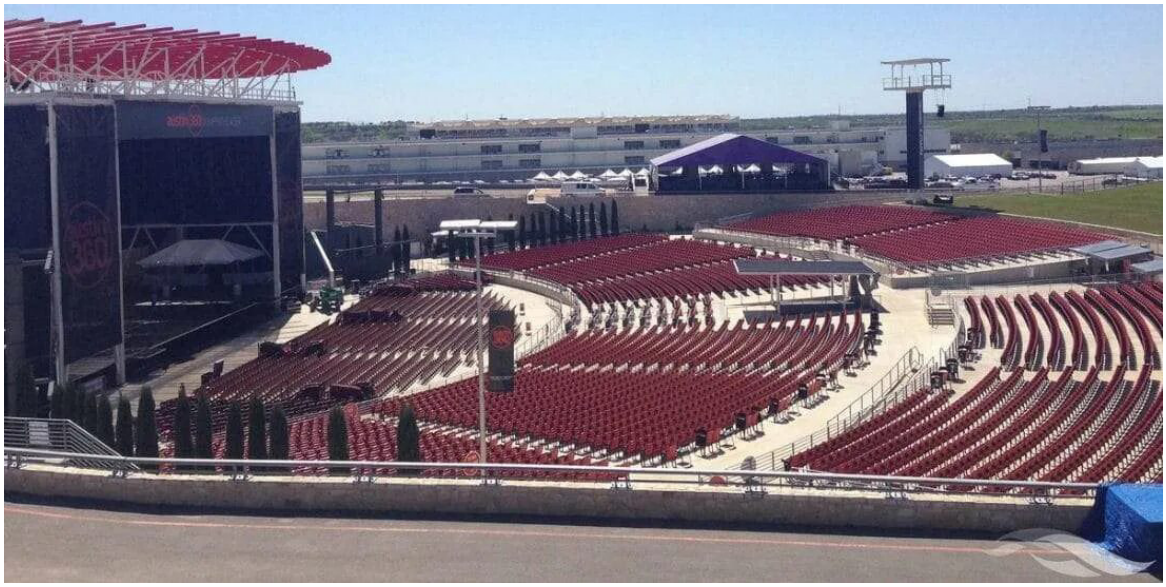


Рис. 4. Germania Insurance Amphitheater

Немецкий Nürburgring демонстрирует другой, но не менее убедительный вариант той же стратегии (рис. 5). Здесь спортивная идентичность не размывается, а, напротив, усиливается за счёт культурного слоя. Каждое лето трасса принимает Rock am Ring – один из самых известных рок - и метал-фестивалей Европы (рис. 6). В 2026 году он запланирован на 5-7 июня; в афише фигурируют Linkin Park, Iron Maiden, Volbeat, LimpBizkit, PapaRoach и другие крупные коллективы. На несколько дней паддок, трибуны и прилегающие зоны превращаются в территорию масштабного музыкального события с многодневным кемпингом, несколькими сценами и особой атмосферой, в которой спортивное прошлое места не исчезает, а становится частью общего образа. Аудитория фестиваля в разные годы

приближалась к 80-90 тыс. человек, и это показатель того, насколько органично гоночная инфраструктура может работать в логике массовой культуры.

Рис. 5. Nürburgring

Рис. 6. Rock am Ring

Если смотреть на эти примеры в совокупности, становится очевидным: гоночную арену воспринимали прежде всего как территорию редких, но громких стартов, то сейчас у нее появляется совсем иной статус. Все чаще это не специализированный спортивный объект, а круглогодично работающий центр событийной активности. И ключ к такой трансформации лежит не только в коммерческой стратегии, но и в том, как устроено само пространство. В выигрыше оказываются те комплексы, которые изначально задуманы как гибкая среда: сегодня здесь ревут моторы, через два дня собирают сцену, еще через неделю открывают деловой форум или городской праздник. Фактически трасса, зрительские сектора, паддок, сервисные зоны и прилегающий ландшафт начинают функционировать как единый организм, способный быстро менять сценарий без капитальной переделки.

Эта универсальность не возникает сама собой. Ее обеспечивает тщательно продуманная пространственная организация: модульные трибуны, трансформируемые зоны приема гостей, мобильные сервисные блоки, усиленные инженерные сети, логистические

маршруты для техники и посетителей, а также открытые территории, пригодные и для массового концерта, и для выставки, и для фестиваля под открытым небом. На практике это проявляется в том, что одна и та же площадка способна за 72 часа перейти из режима спортивного уикенда в формат музыкального шоу на 40-60 тыс. зрителей. Архитектура здесь работает не как декоративная оболочка, а как полноценный инструмент управления потоками, эмоцией и экономикой.

Можно заметить, что уже сейчас соперничество между гоночными комплексами все отчетливее смещается из чисто спортивной плоскости в культурно-экономическую. Важна не только скорость трассы и престиж календаря, но и способность территории стать точкой притяжения для города и региона. Побеждает тот, кто умеет превратить автоспортивную арену в место постоянного действия: сегодня здесь проходит этап международной серии, завтра – концерт, через месяц – фестиваль технологий или массовый городской праздник. В результате легендарное пространство перестает жить от старта к старту и постепенно занимает новое положение – не как узкопрофильная площадка, а как полноценный центр общественной, туристической и культурной жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Rock am ring. – URL: https://www.rock-am-ring.com/
2) Silverstone. – URL: https://www.silverstone.co.uk/events/formula-1-british-grand-prix/tickets
3) Formula 1. – URL: https://www.formula1.com/en/racing/2025/united-states
4) United States Grand Prix Plaza. – URL: https://www.travelandtourworld.com/news/article/grand-prix-plaza-the-ultimate-formula-1-experience-reopens-in-las-vegas-get-ready-for-the-most-thrilling-f1-adventure-yet/
5) Grand Prix Plaza. – URL: https://www.grandprixplaza.com/plan-your-visit/
6) Germania Insurance Amphitheater . – URL: http://germaniaamp.com/events
7) Nürburgring. – URL: https://www.nuerburgring.de/?locale=en
8) Circuit of the Americas. – URL: https://circuitoftheamericas.com/
9. MotoGP. – URL: https://www.motogp.com/en
10) ElectricDaisyCarnival. – URL: https://lasvegas.electricdaisycarnival.com/
11) Сильверстоун: гонка, которая стала фестивалем. – URL: https://www.rutage.com/silverstone-british-grand-prix-2026-guide/?ysclid=mr96xwnvm 6407858611
12) RACERVIEWS.COM. – URL: https://www.racerviews.com/tag/silverstone-festival/
13) СпортсURL. – URL: https://www.sports.ru/automoto/blogs/3362384.html
14) Drive2.ru. – URL: https://www.drive2.ru/l/649279209461519934/

УДК 72.025.3

СОХРАНЕНИЕ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ДЕРЕВЯННОГО ЗОДЧЕСТВА РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ

У.А. Брагина, Ю.А. Сивкова

Научный руководитель – **Т.А. Гаврилов**, канд. техн. наук, доцент

Петрозаводский государственный университет

Работа посвящена актуальному вопросу сохранения историко-культурного наследия деревянного зодчества Республики Карелия. Рассмотрена проблема микологического разрушения памятников деревянного зодчества в процессе их эксплуатации. Предложена методика мониторинга состояния памятников и оборудование для его реализации. В процессе их апробации выявлено, что их применение позволяет обеспечить раннее выявление участков микологического разрушения памятников, повысить точность и снизить трудозатраты выявления микологического разрушения, снизить разрушающее воздействие на целостность памятника.

Ключевые слова: *памятники, деревянное зодчество, микологическое разрушение, мониторинг*

PRESERVATION OF THE WOODEN ARCHITECTURE HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE IN THE REPUBLIC OF KARELIA

U.A. Bragina, Yu.A. Sivkova

Scientific Supervisor – **T.A. Gavrilov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Petrozavodsk State University

This paper addresses the pressing issue of preserving the historical and cultural heritage of wooden architecture in the Republic of Karelia. The problem of mycological deterioration of wooden architectural monuments during their use is examined. A methodology for monitoring the condition of monuments and equipment for its implementation are proposed. Testing revealed that their use enables early detection of areas of mycological deterioration of monuments, increases the accuracy and reduces the labor costs of detecting mycological deterioration, and reduces the destructive impact on the integrity of the monument.

Keywords: *monuments, wooden architecture, mycological destruction, monitoring*

Издревле в Республике Карелия основным материалом для строительства являлась древесина. Это обусловлено обилием лесоматериалов. Так, в Республике Карелия лесами покрыто более 50% всей ее территории [1], что составляет около 1,2% территории Российской Федерации или 1,1% лесного фонда России.

Из древесины строили жилища, культовые сооружения, лодки и др. [2]. Многие сохранившиеся до наших дней исторические постройки из древесины имеют важное культурное значение и отнесены к памятникам деревянного зодчества и объектам всемирного наследия ЮНЕСКО. Например, в Республике Карелия расположен Кижский архитектурный ансамбль, включающий в себя церковь Преображения Господня, церковь Покрова Пресвятой Богородицы, колокольню и ограду (время постройки конец XVII, материал конструкций – сосна, ель, осина) [3, 4].

Недостатком древесины как строительного материала является ее невысокая стойкость к микологическому разрушению. Основной причиной микологического разрушения является жизнедеятельность дереворазрушающих и деревоокрашивающих грибов [5], которые образуют в древесине пустоты и неоднородности, и ведут к полной или частичной утрате памятников деревянного зодчества. Так, за последние 50 лет в России утрачено около 30% существующих памятников деревянного зодчества [6], что является серьезной проблемой, т. к. памятники деревянного зодчества хранят в себе историю,

традиции и быт людей предыдущих поколений, являются отражением и документальным подтверждением прошлого, информацию о котором необходимо сохранять и передавать следующим поколениям.

Перспективным путем защиты памятников деревянного зодчества от микологического разрушения является мониторинг их состояния. В настоящее время применяется различные методики мониторинга [3], но они имеют ряд критических недостатков, к которым относятся: позднее выявление участков микологического разрушения древесины, низкая точность их выявление, высокие трудозатраты, большое разрушающее воздействие на целостность памятников деревянного зодчества.

В связи с чем, в Петрозаводском государственном университете на кафедре ЮНЕСКО «Изучение и сохранение деревянной архитектуры» был разработан новый метод мониторинга состояния памятников деревянного зодчества, лишенный перечисленных недостатков, а также оборудование для его реализации. Новизна метода подтверждена патентом RU № 2796510 на изобретение. Метод включает дистанционное измерение и анализ комплекса параметров, характеризующих состояние древесины памятников деревянного зодчества и окружающей среды. К таким параметрам относятся:

– влажность древесины;
– кислотность древесины;
– концентрация углекислого газа у поверхности древесины;
– температура воздуха;
– влажность воздуха;
– концентрация углекислого газа в воздухе.

Измерение и анализ параметров осуществляется посредством электронных модулей, состоящих из микроконтроллеров и системы датчиков. Общий вид электронного модуля показан на рис. 1.

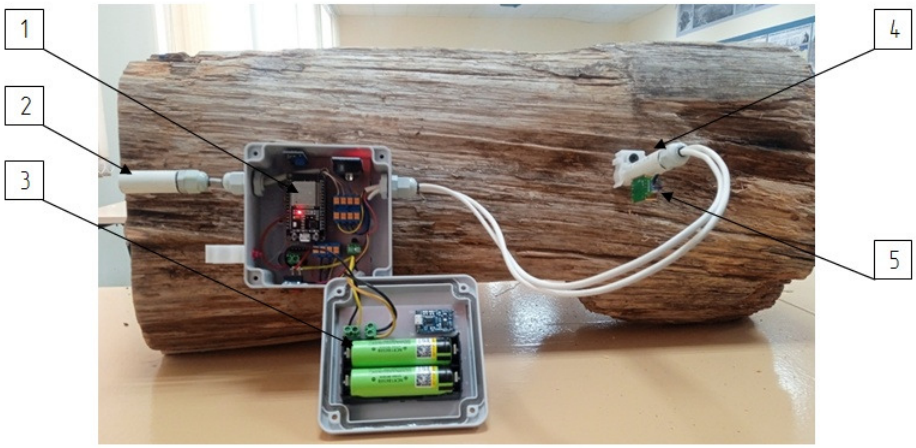


Рис. 1. Электронный модуль для измерения и анализа параметров состояния древесины памятников деревянного зодчества:
1 – микроконтроллер с интегрированным модулем Wi-Fi;
2 – цифровой датчик измерения температуры и относительной влажности воздуха;
3 – аккумуляторные батареи; 4 – цифровой датчик измерения абсолютной влажности древесины;
5 – цифровой датчик измерения содержания углекислого газа

Модули устанавливаются на деревянные конструкции памятников и непрерывно измеряют и анализируют значения контролируемых параметров. Далее по сотовой сети или локальной сети Wi-Fi передает их оператору на компьютер (или мобильное устройство) подключенные к сети Интернет.

Метод был апробирован на ряде памятников деревянного зодчества Республики Карелия и показал свою высокую эффективность. Так, например, на рис. 2 показан процесс

апробации предложенного метода и оборудования для его реализации на деревянных конструкциях Корпуса психиатрической губернской земской больницы (г. Петрозаводск, Республика Карелия). Корпус относится к объектам культурного наследия регионального значения.

Рис. 2. Апробация метода мониторинга и оборудования для его реализации на деревянных конструкциях Корпуса психиатрической губернской земской больницы (г. Петрозаводск, Республика Карелия)

В ходе апробации выявлено, что предложенный метод мониторинга состояния памятников деревянного зодчества и оборудование для его реализации позволяют обеспечить раннее выявление участков микологического разрушения древесины памятников деревянного зодчества, повысить точность выявления микологического разрушения, снизить трудозатраты на выявление микологического разрушения древесины, снизить разрушающее воздействие на целостность памятника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Ананьев, В.А. Структура и динамика лесного фонда Республики Карелия / В.А. Ананьев, С.А. Мошников // Лесной журнал. – 2016. – № 4. – С. 19–29.

2) Бодэ, А.Б. Традиционное строительство из дерева и плотницкое мастерство / А.Б. Бодэ, О.А. Зинина, А.Ю. Косенков, В.А. Попов. – М.: Институт Наследия, 2019. – 316 с.

3) Кистерная, М.В. Система комплексного профилактического обслуживания памятников деревянного зодчества: научно-методические рекомендации / М.В. Кистерная, А.Ю. Любимцев. – Петрозаводск: Издательский центр музея-заповедника «Кижи», 2016. – 70 с.

4) Чебан, А.Н. Исторические и современные методы сохранения деревянного зодчества / А.Н. Чебан, А.П. Мячин // Architecture and Modern Information Technologies. – 2023. – № 4 (65). – С. 134–145.

5) Kisternaya, M. Biodeterioration of historic timber structures: A comparative analysis / M. Kisternaya, V. Kozlov // Wood Material Science and Engineering. – 2014. – Vol. 9 (3). – P. 156–161.

6) Незвицкая, Т.В. Руководящие принципы сохранения церкви преображения господня кижского погоста, объекта всемирного наследия ЮНЕСКО / Т.В. Незвицкая // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 6. –С. 88–99.

УДК 727(98)

ПРОЕКТ НАУЧНОГО ЦЕНТРА ИССЛЕДОВАНИЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Н.Д. Волкова, С.В. Расторгуев

Научный руководитель – **С.В. Расторгуев**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается проект создания Научного центра Северного Ледовитого океана в городе Полярный Мурманской области. Центр выступает как исследовательское учреждение с лабораторным комплексом и кампусом, как демонстрационная технологическая площадка устойчивого развития и как экологический оператор региона с системами мониторинга.

Ключевые слова: *научный центр, архитектура, устойчивое развитие, экология, гидрология и геология, Арктика*

THE PROJECT OF THE ARCTIC OCEAN RESEARCH CENTER

N.D. Volkova, S.V. Rastorguev

Scientific Supervisor – **S.V. Rastorguev,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The paper examines a project of a Scientific center for the Arctic Ocean in the city of Polyarny, Murmansk region. The Center acts as a research institution with a laboratory complex and a campus, as a demonstration technological platform for sustainable development and as an environmental operator of the region with monitoring systems.

Keywords: *scientific center, architecture, sustainable development, ecology, hydrology and geology, Arctic*

Северный Ледовитый океан – это один из ключевых регионов глобального значения, где пересекаются интересы науки, экологии, геополитики и экономики. Быстрое таяние льдов, рост промышленной активности, усиление международного присутствия и изменение климата превращают Арктику в стратегически важную зону, требующую комплексного и системного научного подхода. На фоне стремительно нарастающих изменений, Россия – обладая самой протяжённой арктической береговой линией – до сих пор не имеет единого центра, способного координировать исследования Северного Ледовитого океана.

Для освоения Арктики необходимы новые технологии и специализированные кадры. Научный центр может стать платформой подготовки нового поколения исследователей, инженеров и экологов, способных работать в экстремальных условиях.

Проект научного центра было решено делать в городе Полярный, Мурманской области. Место было выбрано не случайно, т.к. ранее там располагалась одна из первых научных станций в СССР – Мурманская биологическая станция. Это одно из старейших научных учреждений российского Севера. Она была основана в 1899 году в Мурманске (тогда – у губы Александровской) по инициативе зоолога Льва Зенкевича и при поддержке Русского гидрографического общества. Позднее станцию перенесли в Полярный, где условия оказались более подходящими для полевых исследований Баренцева моря.

Основное направление работы станции – изучение морской флоры и фауны Арктики, экологии северных морей и влияния климата на морские экосистемы. Здесь впервые в России начали систематические наблюдения за температурой, солёностью и биологической продуктивностью северных вод. Исследования, начатые в Полярном, легли в основу современных программ по охране морских экосистем Арктики.

Город Полярный – один из самых северных населённых пунктов России, расположен в Мурманской области, на берегу Полярной губы Кольского залива, который соединяется с Баренцевым морем. Город находится примерно в 30 километрах к северо-западу от Мурманска. Полярный лежит на побережье Кольского полуострова, окружённом холмами и тундровыми ландшафтами. Береговая линия изрезана бухтами и заливами, что делает её удобной для размещения портов и военно-морских баз. Вокруг города преобладает арктическая тундра. Создание единого научного центра именно здесь позволит не только развивать технологии и кадры, но и выполнить функцию «экологического оператора» региона. Центр может взять на себя мониторинг состояния Кольского залива, организовать системы фонового экологического мониторинга (которые сейчас фрагментарны) и инициировать программы по ликвидации накопленного экологического ущерба, что станет образцом для устойчивого развития арктических территорий.

Проектное решение

Здание имеет сложную геометрическую форму, напоминающую айсберг или ледяную глыбу. Расположено на воде, что подчеркивает его связь с исследуемой средой – океаном. Центр располагается на полуострове и окружен водой, что создает эффект плавающего объекта. Вокруг здания расположены пирсы и причалы, которые позволяют удобно подходить к зданию на лодках и катерах. Это важно для проведения научных экспедиций и доставки оборудования.

Проект представляет собой единый кампус, который включает в себя сам научный центр, общежитие для студентов и вариант размещения для научных сотрудников — таунхаус (рис. 1).

Рис. 1. Вид на главный корпус научного центра

Форма основного здания научного центра динамичная, напоминающая айсберги или ледяные глыбы. Это создает визуальную ассоциацию с арктическими пейзажами и подчеркивает тематику центра. Структура здания состоит из двух уровней, что позволяет эффективно использовать пространство и создавать различные функциональные зоны. Внутри расположены современные лаборатории, оборудованные для проведения исследований в области океанографии, экологии, климатологии, биологии и геологии. Ниже представлен их список:

1. Лаборатория морской биологии, оборудованная для изучения морской флоры и фауны, экосистемных процессов, биоразнообразия;

2. Лаборатория климатических исследований. Метеорологическая станция, оснащенная датчиками температуры, влажности, атмосферного давления для мониторинга и моделирования климатических изменений;

3. Лаборатория гидрологии. В ней должно быть оборудование для измерения температуры, солености, течений для изучения свойств и динамики водных масс, их влияния на ледовые процессы;

4. Лаборатория геологии и геофизики. Исследует морское дно, геологическую структуру, процессы формирования рельефа. Оснащена сейсмическим оборудованием, георадарами, образцами пород;

5. Лаборатория спутниковых и дистанционных технологий, для мониторинга ледового покрова, анализа изменений поверхности океана. Оборудована для обработки спутниковых данных радиолокационными системами.

В центре также предусмотрены пространства для образовательных программ и выставок, где посетители могут узнать больше о Северном Ледовитом океане и его экосистемах. Это способствует повышению осведомленности общественности о важности охраны арктических регионов.

Основные материалы, использованные в строительстве, – это стекло и бетон. Стеклянные фасады-планары обеспечивают естественное освещение внутренних помещений и открывают вид на окружающий пейзаж. Цветовая гамма нейтральная, с преобладанием белого цвета, что подчеркивает научную направленность центра.

Для проживания студентов научного центра предусмотрены три корпуса общежитий, в которых расположены комнаты на 2 студента с общей кухней и раздельным санузлом. На первых этажах также возможно размещение общественных пространств, таких как столовые, зоны отдыха и спортивные залы. Вариант проживания для сотрудников центра — таунхаус. Все корпуса соединены между собой стеклянными переходами. Это позволяет им жить и работать в одном месте, что способствует более эффективному проведению исследований.

Соединение корпусов научного центра отапливаемыми (или частично пассивно нагреваемыми) стеклянными галереями выполняет несколько функций: комфортное перемещение персонала между зданиями без выхода на открытый воздух (температуры зимой могут опускаться до -30 °C и ниже), создание дополнительного буферного пространства для теплосбережения, а также размещение зимних садов с арктическими и субарктическими растениями. Для сохранения тепла используется двойное остекление с низкоэмиссионным покрытием и заполнением аргоном. В дневное время (даже полярной зимой при наличии солнечной радиации) стеклянные переходы нагреваются, аккумулируя тепло в бетонных полах или фазопереходных материалах. Зимние сады выполняют функцию естественной рекреации для сотрудников, улучшая микроклимат и психоэмоциональное состояние в условиях полярной ночи. Плюсом данного решения является увеличение площади озеленения в застроенной среде без изъятия земель из естественной тундры, а также создание экспериментальной площадки для изучения арктической флоры.

В центре также планируется разместить ветроэнергетические установки с системами аккумулирования энергии. В условиях Кольского полуострова, где среднегодовые скорости ветра составляют 6–9 м/с, а зимой преобладают штормовые ветры, ветрогенерация является наиболее эффективным источником возобновляемой энергии. Проект предусматривает установку ветряков малой и средней мощности (возможно, гибридного типа — вертикально-осевых, устойчивых к обледенению), дополненных системой накопления энергии (литий-ионные или натрий-серные батареи, а также водородные накопители в перспективе). Плюсы данной технологии: снижение выбросов CO_2 за счет замещения дизельной генерации, которая широко используется в арктических населенных пунктах; уменьшение шумового загрязнения и отсутствие выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и акваторию Кольского залива; обеспечение энергетической автономности научного центра, критически важной при штормовых отключениях централизованного электроснабжения.

Технологические решения, апробированные в Полярном (ветрогенерация в условиях обледенения, интеграция зелёной инфраструктуры в режимный город), могут быть тиражированы на другие арктические территории РФ – от Новой Земли до Чукотки.

Таким образом, проектируемый Научный центр Северного Ледовитого океана в городе Полярный выступает не просто как исследовательское учреждение, а как демонстрационная площадка устойчивого развития Российской Арктики, где принципы природосовместимости, энергоэффективности и научной деятельности интегрированы в единую экологически ответственную систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Горяшко, А. Биостанция уходит на север… / А. Горяшко. – URL: https://www.littorina.info/Aleksandrovsk/statia.html (дата обращения: 07.04.2026)

2) Snøhetta / The Norwegian Ocean Technology Centre: офиц. сайт. – URL: https://www.snohetta.com/projects/the-norwegian-ocean-technology-centre (дата обращения: 07.04.2026)

УДК 711.4-163

АРХИТЕКТУРНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТУРИСТИЧЕСКОГО ПОСЕЛКА ПОРТ-ВЛАДИМИР НА ОСТРОВЕ ШАЛИМ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

А.А. Герасимова, Е.А. Конух

Научный руководитель – **М.Н. Кудряшов**, канд. искусствоведения

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается Проект туристического посёлка на острове Шалим (на месте упразднённого Порт-Владимира) для восстановления территорий и создания инфраструктуры в Арктике. Приведены архитектурные решения с учётом энергоэффективности и сохранения культурной идентичности.

Ключевые слова: *туристический поселок, восстановление территории, инфраструктура в Арктике, архитектурные решения*

ARCHITECTURAL PRINCIPLES OF DESIGNING THE TOURIST VILLAGE OF PORT-VLADIMIR ON SHALIM ISLAND IN THE MURMAN REGION

A.A. Gerasimova, E.A. Konuh

Scientific Supervisor − **M.N. Kudryashov**, Candidate of Art Criticism

Yaroslavl State Technical University

The project of a tourist village on the island of Shalim (on the site of the abolished Port-Vladimir) is being considered for the restoration of territories and the creation of infrastructure in the Arctic. Architectural solutions are presented, taking into account energy efficiency and the preservation of cultural identity.

Keywords: *tourist village, territory restoration, infrastructure in the Arctic, architectural solutions*

Введение

Арктический туризм в Мурманской области демонстрирует устойчивую положительную динамику, что связано с ростом спроса на внутренний туризм и потребностью в уникальных туристических продуктах. Однако удаленность туристических точек притяжения друг от друга, дефицит связных туристических маршрутов и износ существующей инфраструктуры не позволяют региону в полной мере реализовать свой потенциал. В этом контексте проектирование туристического поселка на острове Шалим, на месте упраздненного населенного пункта Порт-Владимир, приобретает особую актуальность как пример ревитализации деградирующих территорий и создания новой туристической инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации.

Остров Шалим, расположенный в Ура-Губе на территории ЗАТО Видяево, обладает богатой историей. Здесь существовало саамское становище Еретики, позже преобразованное в поселок Порт-Владимир, который в советский период функционировал как центр рыбной обработки, а с 1969 по 1994 год — как военно-морская база Северного флота. В 2007 году поселок был официально упразднен. В настоящее время на острове отсутствует постоянное население и развитая инфраструктура, однако в 2024 году был анонсирован инвестиционный проект по созданию ретрит-центра с объемом инвестиций около 23 миллионов рублей. Проект реализуется при поддержке режима Арктической зоны Российской Федерации, что предоставляет инвесторам налоговые преференции.

Данная статья представляет анализ архитектурных решений, применимых при проектировании туристического поселка на острове Шалим, с учетом современных подходов

к арктическому строительству, включая принципы энергоэффективности и методы сохранения культурно-исторической идентичности.

Архитектурно-планировочная концепция

Типологическая принадлежность объекта

Согласно современной типологии туристических комплексов Мурманской области проектируемый объект на острове Шалим, может быть отнесен к категории экологического ретрит-центра локального типа (рис. 1). Экологическая направленность обусловлена уникальным природным окружением – остров расположен в акватории Баренцева моря, в зоне субарктического климата с характерными ландшафтами. Локальный тип определяется изолированностью территории и ограниченным масштабом застройки.

Функциональная программа объекта включает гостевые модули для размещения туристов, общественный центр с зоной питания и отдыха, банный комплекс, музей военно-морского флота, причальную инфраструктуру, жилые дома для местного населения и хозяйственные постройки. Такая номенклатура объектов соответствует принципу формирования многофункциональных комплексов, позволяющих обеспечить автономное функционирование поселка в условиях транспортной изоляции.

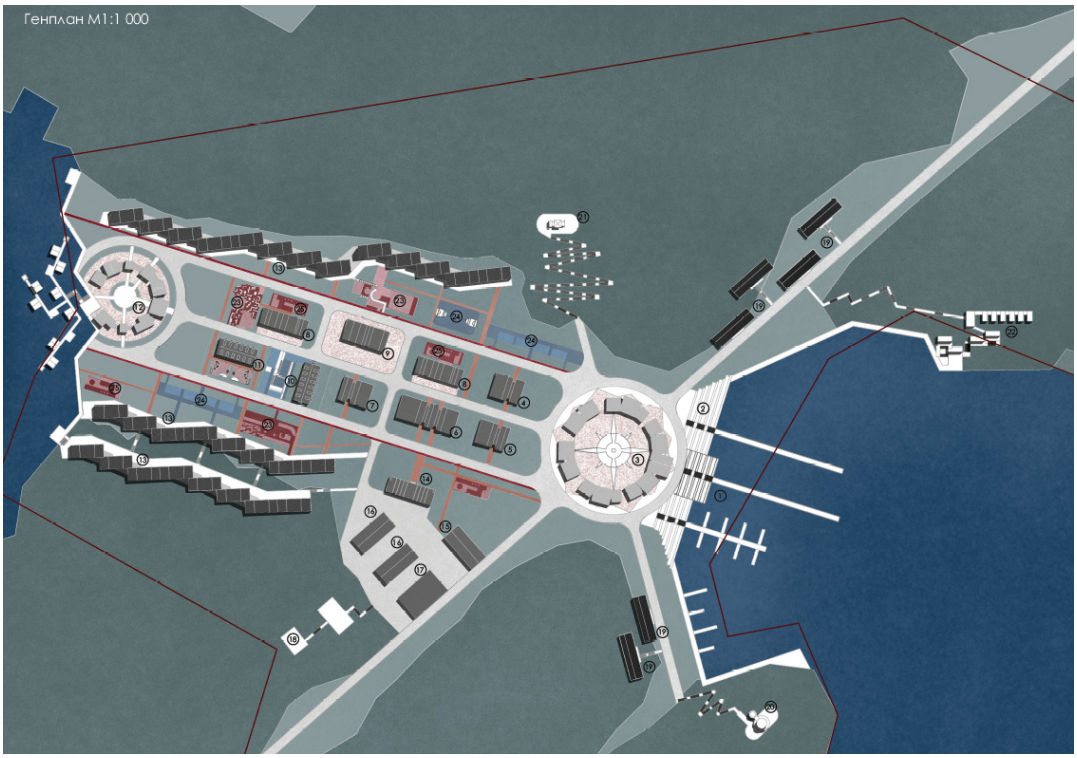


Рис. 1. Предложение по генеральному плану с экспликацией:
1 − Порт с причалом – 3500 м^2; 2 – Набережная – 1700 м^2; 3 – Информационный центр (администрация, почта, кафе, банк, проживание обслуживающего персонала) − 2185 м^2; 4 – Рыболовный магазин – 350 м^2; 5 – Винная лавка – 350 м^2; 6 – Продуктово-хозяйственный магазин – 880 м^2; 7 – Мастерская – 350 м^2; 8 – Гостиницы на 400 человек – 485 м^2; 9 – Клуб – 575 м^2; 10 – Школа – 400 м^2; 11 – Детский сад – 400 м^2; 12 – СПА комплекс – 1200 м^2; 13 – Жилая застройка – 9400 м^2; 14 – Больница − 480 м^2; 15 – Гаражи – 495 м^2; 16 – Склады – 495 м^2; 17 – МЧС – 715 м^2; 18 – Вертолетная площадка – 450 м^2; 19 – Гостиницы на 250 человек – 350 м^2; 20 – Маяк – 200 м^2; 21 – Часовня – 60 м^2; 22 – Музейный комплекс – 600 м^2; 23 – Детские игровые площадки − 2700 м^2; 24 – Спортивные площадки – 2600 м^2; 25 – Зона барбекю – 1200 м^2

Пространственная организация и композиционные решения

Пространственная организация туристического поселка должна учитывать сложный рельеф острова и необходимость минимизации воздействия на природную среду. Композиция застройки предлагается на основе радиальной схемы, формирующей

внутренние защищенные дворы и обеспечивающей оптимальную инсоляцию помещений. Такое решение позволяет создать ветрозащищенные пространства для кратковременного пребывания на открытом воздухе, что особенно важно в условиях частых штормовых ветров, характерных для Баренцева моря.

Здания размещаются на свайных фундаментах с высоким ростверком — проверенном решении для арктических территорий, которое минимизирует тепловое воздействие на многолетнемерзлые грунты и позволяет адаптироваться к перепадам высот. Пространство под зданиями (техническое подполье) может быть использовано для размещения инженерных систем, включая автономные источники жизнеобеспечения.

При проектировании общественного центра целесообразно применение пирамидальных или призматических объемов, обеспечивающих снижение ветровой нагрузки и создающих выразительный архитектурный образ (рис. 2).

Рис. 2. Вид на общественный центр

Конструктивные и инженерные решения

Материалы и конструкции

Выбор строительных материалов для арктического объекта определяется требованиями энергоэффективности, долговечности и минимального воздействия на окружающую среду. Фасадные решения предлагается выполнять с использованием мореной лиственницы — материала, обладающего высокой стойкостью к гниению и атмосферным воздействиям. Со временем древесина приобретает благородный серебристый оттенок, что позволяет зданиям органично сливаться с каменистым ландшафтом. Для несущих конструкций рекомендуется применять клееный брус или стальной каркас, обеспечивающие необходимую жесткость при ветровых нагрузках (рис. 3).

Теплоизоляция должна соответствовать повышенным требованиям для арктического климата. Современные исследования рекомендуют использование многослойных ограждающих конструкций с эффективным утеплителем (например, пенополиуретан или минераловатные плиты повышенной плотности) и пароизоляционными слоями, исключающими промерзание и образование конденсата.

Рис. 3. Использование мореной лиственницы на фасадах

Энергоснабжение и инженерные системы

В условиях автономного расположения поселка на острове особое значение приобретают вопросы энергоснабжения. Использование только солнечных панелей в Мурманской области ограничено низкой инсоляцией в зимний период и наличием полярной ночи. Оптимальным решением является гибридная система, комбинирующая несколько источников энергии.

Ветроэнергетический потенциал острова Шалим, расположенного на открытом побережье Баренцева моря, оценивается как высокий, что делает целесообразным использование ветрогенераторов малой и средней мощности. В качестве резервного источника предлагается использование дизель-генераторов, работающих на привозном топливе. Дополнительным источником тепла могут служить геотермальные тепловые насосы, использующие разницу температур грунта и воздуха.

Системы водоснабжения и водоотведения требуют особого внимания ввиду отсутствия централизованных сетей. Предлагается использование систем замкнутого водоснабжения с очисткой сточных вод до степени, позволяющей их сброс в природную среду без негативного воздействия (принцип «нулевого сброса»). Сбор и накопление пресной воды может осуществляться из атмосферных осадков с последующей фильтрацией и обеззараживанием.

Защита от экстремальных климатических воздействий

Архитектурные решения должны учитывать комплекс климатических факторов: низкие температуры, сильные ветры, снежные заносы, полярную ночь. Для снижения ветровой нагрузки фасады зданий предлагается выполнять обтекаемыми, с минимальным количеством выступающих элементов. Входные группы должны быть оборудованы тамбурами-шлюзами, предотвращающими проникновение холодного воздуха внутрь помещений.

Особое внимание следует уделить световой организации среды в условиях полярной ночи. Искусственное освещение должно выполнять не только утилитарную, но и психологическую функцию, создавая ощущение тепла и безопасности. Предлагается использование цветовой навигации – выделение входных групп и путей движения яркими, теплыми цветами, что предотвращает дезориентацию и снижает психологический дискомфорт, связанный с длительным отсутствием естественного света.

Архитектурная идентичность и работа с контекстом

Сохранение исторической памяти

Одной из ключевых задач архитектурного проектирования на острове Шалим является сохранение и актуализация исторической памяти места. Поселок Порт-Владимир имеет сложную многослойную историю – от саамского становища до военно-морской базы. На территории сохранились остатки зданий рыбозавода, военных сооружений, пирсов, а также памятный знак, посвященный 20-летию бригады кораблей охраны водного района.

Предлагается частичное сохранение и адаптация существующих построек под новые функции при условии их удовлетворительного технического состояния. Такой подход соответствует принципу «архитектуры как сохранения контекста». Включение исторических объектов в новую функциональную структуру позволяет создать уникальную аутентичную среду, отличающую проект от типовых туристических комплексов (рис. 4).

Архитектурный образ и стилистика

Архитектурный облик поселка должен отражать его морскую и индустриальную идентичность. Предлагается использование стилизованных элементов, отсылающих к морской тематике: формы маяков, причальных сооружений, элементов корабельной архитектуры. При этом стилизация должна быть современной, без прямого цитирования исторических прототипов.

Цветовое решение фасадов предлагается строить на контрасте естественных природных оттенков (серебристо-серый, охристый, цвет выветренного камня) и акцентных цветов, используемых для навигационных элементов (терракотовый, охра, глубокий синий).

Такой подход позволяет достичь визуальной выразительности без нарушения природной гармонии.

Рис. 4. Историческая фотография

Заключение

Проектирование туристического поселка на острове Шалим представляет собой комплексную архитектурную задачу, требующую учета климатических, ландшафтных, исторических и инфраструктурных факторов. На основе проведенного анализа могут быть сформулированы следующие ключевые принципы архитектурных решений:

1. Минимальное воздействие на ландшафт, достигаемое за счет свайных фундаментов, сохранения естественного рельефа и использования экологически чистых материалов.
2. Энергоэффективность и автономность, реализуемые через гибридные системы энергоснабжения, геотермальное отопление и замкнутые системы водоснабжения.
3. Сохранение исторической идентичности через частичную адаптацию существующих построек и стилистическую интерпретацию морского и индустриального наследия.
4. Психологический комфорт, обеспечиваемый световой навигацией, цветовыми акцентами и созданием ветрозащищенных рекреационных пространств.

Реализация данных принципов позволит создать туристический объект, соответствующий современным стандартам качества и безопасности, при этом органично вписанный в уникальный природный и культурный контекст острова Шалим. Проект может служить примером ревитализации деградированных территорий Арктической зоны и развития экологического туризма в Мурманской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Орешета, М. Порт-Владимир: незабытая родина // Полярная правда. – 2007. – Вып. № 106. – URL: https://web.archive.org/web/20150923181807/http://www.b-port.com/smi/8/2960/56312.html

2) Михова, А. Мёртвые поселки Мурманской области // АИФ. – 2010. – №47. – URL: https://web.archive.org/web/20100120201632/http://sz.aif.ru/society/article/9313

3) Самарина, В.П. Опыт и перспективы использования альтернативных источников энергии в энергоизбыточном регионе России / В.П. Самарина, Т.П. Скуфьина // Север и рынок. – 2017. – № 5 (56). – URL: https://vivaldi.mgounb.ru/stat%60qi/sever-i-rynok_2017_n5_s190198.pdf/view/?#page=1

4) Бежан, А.В. Разработка алгоритма управления энергокомплексом, состоящим из котельной, ветроэнергетической установки и теплового аккумулятора / А.В. Бежан // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – 1 (8), вып. 14 – URL: http://kolanord.ru/html_public/periodika/Trudy-KNC/2017/Trudy_KNC_Vyp8_2017_%E2%84%961_Energetika_vyp14/109/index.html#zoom=z

5) Василенко, А.Б. Современная энергетика и энергетика будущего: технологии производства, нетрадиционные источники, экологическая безопасность / А.Б. Василенко, В.В. Тетельмин. – Москва: URSS: ЛЕНАНД, 2018.

УДК 728.51

РАЗМЕЩЕНИЕ ОТЕЛЯ В СТРУКТУРЕ ТЕРРИТОРИИ РЕНОВАЦИИ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ - ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В.Д. Говорова, С.А. Буров

Научный руководитель – **С.А. Буров**, доцент

Ярославский государственный технический университет

В данной статье рассматривается вопросы о размещении отеля на территории объекта культурного наследия – промышленного предприятия в г. Ярославле. Рассматриваются архитектурно-планировочные, функциональные и нормативные аспекты преобразования промышленных зон в современные гостиничные комплексы с сохранением исторического облика и уникальных особенностей индустриальной архитектуры. Приводятся примеры успешной реновации промышленных объектов в России и за рубежом.

Ключевые слова: *Реконструкция промышленного предприятия, объект культурного наследия, реновация, благоустройство, отель*

PLACEMENT OF A HOTEL IN THE STRUCTURE OF THE TERRITORY OF THE RENOVATION OF A CULTURAL HERITAGE SITE – AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

V.D. Govorova, S.A. Burov

Scientific Supervisor – **S.A. Burov**, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This article discusses the issues of hotel accommodation on the territory of a cultural heritage site – an industrial enterprise in Yaroslavl. It examines the architectural, planning, functional, and regulatory aspects of transforming industrial zones into modern hotel complexes while preserving the historical appearance and unique features of industrial architecture. The article provides examples of successful renovation of industrial facilities in Russia and abroad.

Keywords: *Reconstruction of an industrial enterprise, a cultural heritage site, renovation, landscaping, and a hotel*

Реновация – это комплекс мероприятий, направленных на обновление городских территорий, улучшение условий проживания граждан, а также преобразование строительных объектов, сопутствующей инфраструктуры и окружающего городского пространства [1].

Территория объекта культурного наследия, являющегося достопримечательным местом – земельные участки, части земельных участков, земли, непосредственно занятые объектом культурного наследия и связанные с ним исторически и функционально [2].

В современной архитектурной практике всё большее значение приобретает реновация промышленных территорий, особенно если они обладают статусом объекта культурного наследия. Бывшие заводы и другие индустриальные объекты становятся площадками для создания новых общественных, жилых и коммерческих пространств. Одним из перспективных направлений такой трансформации является размещение отелей и гостиничных комплексов на территории промышленных предприятий.

Для выявления эффективных архитектурно-планировочных методов интеграции гостиничной функции в историческую индустриальную среду был проанализирован ряд успешных реализованных проектов в России и за рубежом (табл. 1).

Промышленные зоны часто располагаются в черте города, обладают развитой инфраструктурой и уникальными архитектурными особенностями. Их реновация способствует:

- устойчивому развитию городской среды;
- сохранению индустриального наследия;

- формированию новых точек притяжения для жителей города и туристов;
- эффективному использованию земельных ресурсов.

Таблица 1. Примеры реализованных объектов

№ п.п.	Проект	Город	Особенности
1	Отель «Сент-Панкрас Ренессанс»	Лондон	Отель в здании бывшего вокзала. Неоготические фасады и исторические интерьеры были полностью отреставрированы, что позволило перевести объект из категории утилитарных в категорию элитной недвижимости.
2	B2 Отель	Цюрих, Швейцария	Архитекторам удалось полностью сохранить сложную пространственную структуру завода. Главной фишкой проекта стало использование бывших пивных погребов со сводчатыми потолками для размещения термальных ванн.
3	Культурный квартал «Брусницын» и «Севкабель Порт»	Санкт-Петербург	Комплексное развитие прибрежной промышленной зоны. Особенности планировки (длинные цеховые пространства) диктуют создание коридорной системы для небольших бутик-отелей.
4	Хостел «Фабрика»	Москва	Внедрение функций происходило без изменения исторических габаритов и фасадов фабричных корпусов. Пространства бывших цехов с высокими потолками и ленточным остеклением были разделены на двухуровневые номера.

В данной статье рассматривается реновация с размещение отеля на территории ликероводочного завода в городе Ярославле. Завод основан 1 июля 1901 года. Корпуса завода являются памятниками промышленной архитектуры начала XX века и объектами культурного наследия регионального значения. На данный момент предприятие, действующее и в рамках дипломного проектирования, предлагается частично вынести производство продукции за черту города и оставить на территории небольшую часть производства.

Концептуальное предложение по реновации территории ликероводочного завода с интеграцией гостиничного комплекса. При разработке концепции были применены различные градостроительные и объемно-пространственные решения.

Территория не ограничена исключительно гостиничной функцией. Отель выступает неким «якорем» проекта. При этом он интегрирован в единую систему с торговыми рядами, выставочными павильонами и ландшафтным озеленением, что обеспечивает жизнь квартала круглогодично.

Сохранен исторический краснокирпичный «каркас» завода. Заводская труба оставлена в качестве главной вертикальной доминанты, сохраняющая «дух места» (рис. 2). В качестве контрастного приема с красным кирпичом использовано внедрение легких светопрозрачных конструкций, которые визуально облегчают массивную промышленную застройку и обеспечивают комфортный микроклимат для общественных зон отеля. Между корпусом отеля и историческими корпусами организованы торговые павильоны, которые выполняют роль связующего звена между приватной зоной отдыха гостей отеля и шумной ярмарочной площадью.

Также, в проекте уделено большое внимание ландшафтному дизайну. На месте бывших производственных дворов и складских помещений разбит сад камней и уделено

много внимания озеленению, что способствует улучшению экологического фона и создает тихие зоны отдыха для постояльцев отеля в условиях плотной городской застройки.

Рис 1. Визуализация фасада проектируемого отеля

При размещении отеля на территории объекта культурного наследия – промышленного объекта в городе Ярославле, учитываются следующие факторы:

- санитарные и противопожарные нормы;
- требования к инсоляции, шумоизоляции, безопасности и энергоэффективности;
- возможности модернизации инженерных систем;
- зонирование по Градостроительному кодексу Российской Федерации;
- использование реставрационных технологий при работе с историческими конструкциями;

Таким образом, реновация промышленных объектов играет ключевую роль, как в деятельности отдельных предприятий, так и в развитии строительной отрасли и экономики страны в целом. Размещение отеля в структуре регенерируемой промышленной территории — это комплексная задача, требующая не только творческих, но и аналитических навыков [3].

Проведенный анализ и концептуальное предложение доказывают, что успешная реновация требует отказа от создания закрытой монофункциональной зоны в пользу формирования проницаемого общественного квартала. Размещение отеля в совокупности с рекреационными, торговыми и культурными пространствами не только обеспечивает экономическую жизнеспособность проекта, но и возвращает промышленную территорию в активную ткань города.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батоева, Э.В. Реновация объекта как научная категория и вид градостроительной деятельности / Э.В. Батоева, Е.С. Зорина // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2023. – Т. 13, № 5А. – С. 479-488

2. О методических рекомендациях по отнесению историко-культурных территорий к объектам культурного наследия в виде достопримечательного места: Письмо Министерства культуры РФ от 28 февраля 2017 г. № 49-01.1-39-НМ. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71524352/?ysclid=mqj8h8rcp9491696821

3. Мустафаев, А.М. Анализ целесообразности проведения реконструкции промышленных зданий // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2021. – Т. 11, № 12А. – С. 505-515.

4. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01- 89*. – Москва: Росстандарт, 2016. – 125 с.

УДК 72.01:504

АВТОНОМНЫЕ ОКЕАНИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ КАК РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ОЧИСТКИ МИРОВОГО ОКЕАНА

М.Д. Гордеев, С.В. Расторгуев

Научный руководитель - **С.В. Расторгуев**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Проектом рассматриваются возможности формирования автономной океанической архитектуры на примере платформы для сбора и переработки пластиковых отходов. Объект представлен как элемент распределённой инфраструктуры, размещённой в зонах океанических течений и обеспечивающей экологическую очистку при сохранении комфортной среды проживания.

Ключевые слова: *океаническая архитектура, автономные платформы, переработка пластика, экологическая инфраструктура*

AUTONOMOUS OCEAN PLATFORMS AS A DISTRIBUTED INFRASTRUCTURE FOR GLOBAL OCEAN CLEANUP

M.D. Gordeev, S.V. Rastorguev

Scientific Supervisor – **S.V. Rastorguev**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The project examines the potential for the development of autonomous oceanic architecture, using a platform for the collection and processing of plastic waste as a case study. The object is presented as an element of a distributed infrastructure located within ocean current zones, providing environmental purification while maintaining a comfortable living environment.

Keywords*: oceanic architecture, autonomous platforms, plastic recycling, environmental infrastructure*

В статье рассматривается концепция автономных океанических платформ для сбора и переработки пластиковых отходов в зонах их концентрации. Предлагается модель распределённой сети объектов, размещённых вдоль океанических течений. Рассматриваются производственные, энергетические и водные системы, а также архитектурная организация, обеспечивающая изоляцию жилой среды. Особое внимание уделяется замкнутым ресурсным циклам и созданию условий для длительного проживания персонала. Показана роль платформ как экологической инфраструктуры с частичной экономической устойчивостью.

Проблема загрязнения Мирового океана пластиковыми отходами в настоящее время приобрела глобальный характер. Значительные объёмы пластика концентрируются в зонах океанических течений, формируя устойчивые области накопления отходов.

Существующие решения, направленные на сбор пластиковых отходов, не обеспечивают непрерывной переработки непосредственно в местах их концентрации. В связи с этим возникает необходимость перехода к системным инфраструктурным подходам, обеспечивающим автономное функционирование в условиях открытого океана.

Актуальность исследования обусловлена ростом объёмов пластиковых отходов и отсутствием эффективных решений. Целью работы является формирование архитектурно-инженерной модели автономной платформы, включённой в распределённую сеть очистки океана.

Предлагаемая система основана на принципе распределённой сети автономных платформ, размещённых в зонах действия океанических течений. Формируется цепь объектов, функционирующих как единая система сбора и переработки отходов.

Сеть платформ располагается по направлению движения океанических течений, перехватывая пластиковые отходы на пути их концентрации. Каждая платформа представляет собой локальный узел переработки, обеспечивающий непрерывность процесса.

Архитектура платформ адаптируется к климатическим условиям региона, включая волновую активность, температурный режим и ветровые нагрузки. Таким образом обеспечивается универсальность системы при вариативности конструктивных решений.

Производственный цикл включает последовательные этапы: сбор, транспортировку, подготовку, сортировку и переработку отходов.

Сбор осуществляется с использованием барьерных систем и автономных плавучих устройств. Первичная обработка включает удаление воды и органических загрязнений.

После сортировки по типам материалов осуществляется переработка — механическая или термическая. В результате формируются вторичные полимерные материалы, пригодные для использования в промышленности и строительстве.

Производственный процесс исключает прямое воздействие на окружающую среду.

Все производственные процессы размещаются в помещениях с контролируемой вентиляцией. Воздух проходит многоступенчатую фильтрацию, что исключает выбросы загрязняющих веществ.

Водоснабжение осуществляется за счёт опреснения морской воды. Внедрён замкнутый водный цикл, предусматривающий очистку и повторное использование технической и бытовой воды.

Аналогичные принципы реализованы в современных объектах переработки отходов, включая “AmagerBakke”, где промышленная функция интегрирована в общественное пространство без негативного экологического воздействия.

Энергоснабжение платформы реализуется на основе комбинированного использования возобновляемых источников. В состав системы входят солнечные панели, а также установки, преобразующие энергию волн и морских течений.

Особое значение имеют турбины, размещённые в опорных конструкциях и использующие кинетическую энергию воды.

Платформа представляет собой многоуровневую архитектурную систему с чётким вертикальным зонированием. Промышленный уровень размещается ниже, в то время как жилая среда поднимается над уровнем океана.

Ключевым принципом является формирование визуально изолированного пространства, исключающего прямой контакт пользователя с загрязнённой акваторией. Данный эффект достигается за счёт совокупности архитектурных решений: периметрального функционального пояса, вертикального озеленения, перепадов высот и размещения архитектурных объектов, формирующих контролируемые видовые коридоры.

По периметру платформы располагаются технические и производственные элементы, выполняющие роль визуального барьера. Дополнительно используется вертикальное озеленение, формирующее природный экран.

Жилая структура организована по кластерному принципу вокруг промышленного ядра, выполняющего функции входного узла и вертикальной коммуникации. В данном элементе размещаются лифты, обеспечивающие доступ к производственным уровням.

Внутреннее пространство платформы ориентировано на создание защищённой среды, визуально отделённой от внешнего океана. Поверхность платформы формируется как искусственный ландшафт с использованием грунтового слоя, газонного покрытия и древесной растительности. Применяется система подпочвенного орошения, обеспечивающая равномерное увлажнение. Избыточные осадки собираются дренажной системой и направляются на очистку с последующим повторным использованием. Формируется замкнутый водно-ландшафтный цикл.

Эксплуатация платформы осуществляется вахтовым методом с численностью персонала порядка 50–70 человек. В условиях изоляции особое значение приобретает формирование комфортной среды проживания.

Рекреационные элементы включают спортивные и общественные пространства, такие как велодорожки, бассейны и озеленённые зоны. Данные элементы направлены на поддержание физического и психологического состояния персонала.

Платформа представляет собой объект экологической инфраструктуры, не ориентированный на извлечение максимальной прибыли. Основной задачей является решение проблемы загрязнения океана.

Экономическая устойчивость достигается за счёт частичной окупаемости, обеспечиваемой переработкой отходов и производством вторичных материалов. Дополнительные источники финансирования включают государственные программы и научные исследования.

Научная новизна исследования заключается в:

- рассмотрении океанических платформ как элементов распределённой экологической инфраструктуры;
- интеграции производственных, жилых и рекреационных функций в единую архитектурную систему;
- формировании принципа визуально изолированной среды как инструмента адаптации;
- разработке замкнутых ресурсных циклов в условиях автономного функционирования.

Предложена модель автономной океанической платформы как элемента распределённой системы очистки Мирового океана. Объект объединяет функции переработки отходов, жизнеобеспечения и формирования комфортной среды проживания.

Архитектура платформы выступает инструментом адаптации человека к экстремальным условиям, обеспечивая визуальную и функциональную изоляцию от негативных факторов. Предложенная система может рассматриваться как перспективное направление развития экологической инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Lebreton, L. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal / L. Lebreton, A. Andrady // Pargrev Communications. – 2019. – URL: https://www.nature.com/articles/s41599-018-0212-7.pdf

2) Plastic waste inputs from land into the ocean / J. Jambeck [et al.] // Science. – 2015. – Vol. 347, iss. 6223. – P. 768-771.

3) Plastic pollution in the world’s oceans / M. Eriksen [et al.] // PLOS ONE. – 2014. – Vol. 9(12). – e111913.

4) Ocean Cleanup Foundation. Ocean Cleanup technologies and deployment strategies. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/The_Ocean_Cleanup

5) The New Plastics Economy // Ellen MacArthur Foundation: [site]. – URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics-and-catalysing

УДК 7.038.6:778.5

ПОСТМОДЕРНИСТСКАЯ АРХИТЕКТУРА В КИНЕМАТОГРАФЕ

Е.Ю. Журавлева, С.В. Расторгуев

Научный руководитель – **С.В. Расторгуев,** ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье анализируется роль постмодернистской архитектуры в кинематографе 2010–2020-х годов на примере фильмов «Бегущий по лезвию 2049», «Колумбус», «Бедные-несчастные», «Высотка». Архитектура здесь перестаёт быть декорацией и становится активным участником нарратива, выражая идеи фрагментации, коллажа и иронии.

Ключевые слова: *модернизм, постмодернизм, метамодернизм, архитектура XX–XXI века, рационализм, урбанистика, новая искренность, Ле Корбюзье, Роберт Вентури, реконструкция городов*

POSTMODERN ARCHITECTURE IN CINEMA

E.Y. Zhuravleva, S.V. Rastorguev

Scientific Supervisor - **S.V. Rastorguev,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article analyzes the role of postmodern architecture in the cinema of the 2010s and 2020s using the example of the films "Blade Runner 2049", "Columbus", "The Poor are Unhappy", "High-rise". Architecture here ceases to be a decoration and becomes an active participant in the narrative, expressing ideas of fragmentation, collage and irony.

Keywords*: modernism, postmodernism, metamodernism, architecture of the XX–XXI century, rationalism, urbanism, new sincerity, Le Corbusier, Robert Venturi, urban reconstruction*

Введение

Мы привыкли, что в кино главное – это герои и их истории. Мы следим за тем, что они говорят, как поступают, во что верят. А всё, что их окружает – дома, улицы, города – остаётся где-то на заднем плане. Это просто декорации, которые помогают понять, где происходит действие: в средневековом замке, в космическом корабле или в современном офисе.

Но в последние годы появилось много фильмов, где декорации вдруг выходят на первый план. Здания начинают играть не меньшую роль, чем актёры. Они создают настроение, давят на героев, пугают их или, наоборот, успокаивают. Иногда архитектура даже заменяет собой сюжет: мы смотрим на то, как герой бродит по коридорам или рассматривает фасады, и этого достаточно, чтобы понять смысл фильма.

Особенно ярко это заметно в фильмах, которые используют приёмы постмодернизма. Постмодернизм – это направление в искусстве, которое любит всё смешивать: старое с новым, серьёзное со смешным, красивое с уродливым. Постмодернистские здания выглядят как коллаж из разных эпох. У них могут быть колонны, как у древнегреческого храма, но рядом с ними – неоновая вывеска и бетонная стена с трещинами. Архитекторы-постмодернисты как будто говорят нам: «Не надо выбирать один стиль. Берите всё сразу и играйте с этим».

В кино постмодернистская архитектура работает примерно так же. Город или дом на экране – это не просто место действия. Это загадка, шутка, вызов зрителю. Это пространство, которое само рассказывает историю.

В этой статье хочу разобрать несколько самых интересных фильмов последних лет, где архитектура становится главным героем. Я расскажу, как устроены эти здания, что они значат и почему режиссёры всё чаще обращаются к архитектуре, чтобы передать свои идеи.

1. Что такое постмодернистская архитектура

Прежде чем говорить о фильмах, давайте разберёмся, что же такое постмодернизм в архитектуре. Это не просто умное слово. За ним стоит целая история.

До середины XX века главным стилем был модернизм. Архитекторы-модернисты (например, Ле Корбюзье) строили дома из бетона и стекла, без всяких украшений. Они считали, что здание должно быть прежде всего удобным. Их знаменитая фраза – «дом – это машина для жилья». Всё лишнее они убирали. Получались ровные коробки с плоскими крышами и огромными окнами. Это было красиво по-своему, но многим казалось скучным и холодным. Жить в таких домах было не очень уютно.

А потом, в 1970-х годах, появились постмодернисты. Они сказали: «Хватит серых коробок!». Они вернули в архитектуру украшения, колонны, арки, яркие цвета. Они начали цитировать старые стили – классицизм, готику, барокко – но цитировать с иронией. Например, здание может выглядеть как старинный дворец, но на крыше у него стоит пластиковая скульптура. Или фасад сделан в виде гигантской колонны, а капитель – из неоновых трубок.

Главное в постмодернизме – это смешение. Одно здание может быть одновременно и древним, и современным, и серьёзным, и смешным. Это похоже на коллаж или на суп, куда накидали всего подряд. Но у этого супа есть свой вкус и свой смысл.

В кино постмодернистская архитектура означает, что здания на экране такие же странные, смешанные, многослойные. Они не просто стоят – они с нами разговаривают, пусть и без слов.

2. Пять фильмов, где архитектура становится главным героем

2.1. «Бегущий по лезвию 2049»: город-лабиринт, в котором легко потеряться (рис. 1)

Начнём с самого известного примера. Это фильм Дени Вильнёва, вышедший в 2017 году. Он продолжает историю, начатую Ридли Скоттом ещё в 1982 году.

Рис 1. Руины Лас-Вегаса. «Бегущий по лезвию 2049»

Действие происходит в Лос-Анджелесе будущего (рис. 2). Но этот город совсем не похож на тот, который мы знаем. Он огромный, мрачный, многослойный. Внизу – грязь, старые дома, вечный полумрак. Над этим нависают гигантские бетонные башни, похожие на ульи. А ещё выше – летающие рекламные экраны с голограммами. На одном экране – японская девушка в кимоно, на другом – египетская пирамида, на третьем – кока-кола.

В одном кадре могут соседствовать самые разные стили и культуры. Китайские вывески, индийские храмы, бруталистские бетонные стены, неон, дым, дождь. Это и есть постмодернистский коллаж. Режиссёр не пытается придумать один «стиль будущего». Он смешивает всё подряд, потому что будущее – это и есть смесь.

Рис. 2. Лос-Анжелес. «Бегущий по лезвию 2049»

Но самое интересное – как работает это пространство. Город в фильме похож на лабиринт. Герои постоянно куда-то поднимаются, спускаются, переходят по мостикам, пролезают через узкие проходы. Нет никакого центра, нет главной улицы или главной площади. Есть только бесконечное переплетение уровней.

Это не случайно. Режиссёр хочет показать, что герои потерялись не только в городе, но и в собственной жизни. Главный герой – полицейский, который охотится на роботов-репликантов. Он сам не знает, кто он – человек или машина. И город своей запутанной архитектурой передаёт это чувство потерянности.

Кроме того, здания здесь кажутся живыми. Они дышат, мигают огнями, шумят. Они давят на человека, напоминают ему, какой он маленький и ничтожный. Это очень постмодернистский ход: архитектура не помогает, не защищает, а, наоборот, уничтожает личность.

2.2. «Колумбус»: разговоры с домами

А теперь – совсем другой фильм. Он называется «Колумбус», вышел в 2017 году, снял его режиссёр по имени Когонада (рис. 3). Здесь нет никаких футуристических городов. Всё происходит в маленьком американском городке, который знаменит своими зданиями в стиле модернизм. Да, это не постмодернизм, но важно то, как режиссёр показывает архитектуру.

Рис 3. Первая христианская церковь. «Колумбус»

Когонада снимает здания очень подолгу. Герои разговаривают, а на заднем плане – библиотека работы архитектора Ио Мин Пея (рис. 4). Или они сидят на скамейке, и камера долго показывает линии здания напротив. Иногда архитектура вообще заслоняет собой героев – мы видим только фасад и слышим голос за кадром.

Рис 4. Публичная библиотека Клео Роджерс Мемориал. «Колумбус»

Что это даёт? Режиссёр как будто говорит нам: «Посмотрите, как эти здания красивы и как они влияют на людей». Один из героев – сын известного архитектора. Он терпеть не может архитектуру, потому что отец вечно пропадал на стройках. Другая героиня – девушка, которая работает в библиотеке и не может уехать из города, потому что должна заботиться о больной матери. И для неё эти здания – и тюрьма, и утешение (рис. 5).

Рис. 5. Центр психического здоровья. «Колумбус»

Фильм построен так, что архитектура становится третьим персонажем. Она вступает в диалог с героями. Они смотрят на здания, обсуждают их, спорят о них. А здания в ответ молчаливо стоят – и в этом молчании есть свой смысл.

Когонада использует постмодернистский приём: он показывает не просто объекты, а сам процесс их восприятия. Мы смотрим на то, как герои смотрят на здания. И начинаем задумываться: а как я сам смотрю на архитектуру? Вижу ли я её? Понимаю ли?

Это очень умное кино. Оно не развлекает, а заставляет думать. И архитектура здесь – главный инструмент для размышлений.

2.3. «Бедные-несчастные»: мир как сумасшедший конструктор

Фильм ЙоргосаЛантимоса, вышедший в 2023 году, – это, пожалуй, самый яркий пример постмодернистской архитектуры в кино за последние годы. Он получил «Оскар» за лучшую работу художника-постановщика, и это не случайно.

Действие происходит в вымышленном мире, который похож на конец XIX века, но с приветами из прошлого и будущего. Главная героиня – Белла, женщина, которой пересадили мозг ребёнка. Она путешествует по разным городам: Лондон, Лиссабон, Париж, Александрия. И каждый город выглядит как коллаж из разных эпох (рис. 6).

Рис 6. Лиссабон. «Бедные-несчастные»

Дом профессора Бакстера, который воскресил Беллу, – это смесь викторианской гостиной, анатомического театра и детской комнаты. Стены там похожи на кожу, лестницы изогнуты, как позвоночник, повсюду уши, глаза, другие части тела, превращённые в лепнину. Это одновременно и страшно, и смешно, и красиво.

Лиссабон в фильме – это город, где трамваи летают в воздухе, как дирижабли. Все здания там необычных цветов, с причудливыми формами. Режиссёр говорит, что из этого города специально убрали синий цвет – чтобы он казался чужим и странным (рис. 7).

Рис. 7. Лиссабон. «Бедные-несчастные»

Париж показан через бордель, в котором работает Белла (рис. 8). Там всё устроено как фантазия на тему барочных дворцов: колонны, арки, лестницы, но всё это покрыто тканью, зеркалами, странными скульптурами. Архитектура здесь становится откровенно сексуальной, телесной.

Рис. 8. Белла в Париже. «Бедные-несчастные»

Александрия – это город руин. Там всё разрушено, лестницы ведут в никуда, колонны стоят вверх ногами. Это пространство разочарования, где Белла понимает, что мир не так прекрасен, как ей казалось.

Что же общего у всех этих городов? Они все – результат постмодернистского «сращивания». Художники, которые придумывали декорации, говорили, что работали как хирурги: брали кусочки разных стилей и сшивали их вместе. Получился мир, где нет единого правила, зато есть игра, удивление, юмор.

Архитектура в «Бедных-несчастных» передаёт внутренний мир Беллы. Она как ребёнок впервые видит мир, и для неё всё – новое, странное, невероятное. Здания такие же, как её ощущения: они то смешат, то пугают, то завораживают. Это и есть главная задача постмодернистской архитектуры в кино – не просто изобразить пространство, а сделать его прямым продолжением души героя.

2.4. «Высотка»: башня, которая сводит с ума

Фильм Бена Уитли 2015 года снят по роману Джеймса Балларда. Это история про одну огромную башню, в которой живут сотни людей. Архитектура здесь – не просто фон, а главный злодей.

Башня спроектирована по всем правилам модернизма: в ней есть всё, что нужно для жизни: супермаркет, бассейн, спортзал, школа (рис. 9). Архитекторы верили, что такое здание сделает людей счастливыми. Но на деле получается наоборот.

Рис. 9. Высотка. «Высотка»

Чем выше этаж, тем богаче жильцы. На верхних этажах – шикарные квартиры, на нижних – дешёвые клетушки. Постепенно начинается конфликт. Жители нижних этажей

завидуют верхним. Верхние презирают нижних. А архитектура башни только подогревает эту вражду: лестницы и лифты разделяют людей, а не объединяют их.

В конце концов всё превращается в хаос. Жители начинают драться, громить общие помещения, устраивать дикие вечеринки. Башня становится адом. Архитектура, которая должна была быть утопией, превращается в антиутопию.

Ты видишь всё, но не видишь главного – того, кто прячется прямо у тебя за спиной. В этом и заключается постмодернистская ирония фильма. Режиссёр как будто говорит архитекторам: «Вы верили, что красивые здания спасут мир? А вот вам результат – мир рухнул, и здания в этом виноваты». Конечно, это преувеличение, но в нём есть доля правды. Архитектура действительно может влиять на наше поведение, и не всегда в лучшую сторону.

2.5. Новые хорроры: страх перед стеклянными стенами

В последние годы даже фильмы ужасов начали активно использовать постмодернистскую архитектуру. Классические дома с привидениями в викторианском стиле уходят в прошлое. Им на смену приходят ультрасовременные здания из стекла и бетона.

Например, в фильме «Человек-невидимка» (2020) героиня живёт в роскошном стеклянном доме (рис. 10). Казалось бы, что может быть лучше: светло, просторно, современно. Но именно из-за прозрачных стен она постоянно чувствует, что за ней следят. Архитектура здесь создаёт паранойю

Рис. 10. Стеклянный дом «Человек-невидимка»

Другой пример – фильм «Меню» (2022). Действие происходит в ресторане на уединённом острове. Само здание – бетонный монолит, похожий на храм или на бункер (рис. 11). Внутри – длинные столы, холодный свет, идеальный порядок. Это место выглядит очень дорого и очень пугающе. Гости не могут уйти, потому что вокруг океан. Архитектура становится ловушкой.

Рис 11. Ресторан. «Меню»

В обоих фильмах здания – не просто место действия. Они – активные участники кошмара. Они такие же страшные, как маньяк или монстр. И этот страх рождается из самой архитектуры: из её прозрачности, из её замкнутости, из её холодной красоты.

3. Как отличить постмодернистскую архитектуру в кино: простой метод

Если вы хотите сами анализировать фильмы с точки зрения архитектуры, не обязательно быть искусствоведом. Достаточно задать себе несколько простых вопросов.

Вопрос первый: смешивает ли фильм разные стили в одном пространстве? Если в кадре соседствуют колонны, бетон, неон, старинные арки и футуристические экраны – это похоже на постмодернизм. Пример: «Бегущий по лезвию 2049» или «Бедные-несчастные».

Вопрос второй: есть ли в архитектуре ирония или шутка? Не относится ли режиссёр к зданиям слишком серьёзно? Если он, наоборот, подшучивает над ними (как в «Высотке», где красивая башня превращается в ад), – это тоже постмодернизм.

Вопрос третий: становится ли здание самостоятельным персонажем? Вступает ли оно в диалог с героями? Давит ли на них, пугает ли, утешает ли? Если да – значит, архитектура здесь не просто декорация. Пример – «Колумбус», где герои буквально разговаривают с домами.

Вопрос четвёртый: отражает ли архитектура внутренний мир героя? В «Бедных-несчастных» странные города отражают детское восприятие Беллы. В «Бегущем по лезвию» мрачный лабиринт отражает потерянность главного героя. Если это так – перед нами не просто стиль, а осмысленный приём.

Ответы на эти вопросы помогут вам увидеть в фильме то, что обычно ускользает от внимания.

Заключение

Мы разобрали несколько фильмов, где архитектура играет главную роль. Везде это происходит по-разному: где-то город давит и пугает, где-то здания помогают думать, где-то они веселят и удивляют. Но общее одно: архитектура перестала быть просто картинкой на заднем плане. Она стала полноправным героем.

Постмодернизм научил нас, что здания могут шутить, цитировать историю, смешивать невозможное. А кино подхватило эту идею и показало, как архитектура может рассказывать истории без единого слова.

Что дальше? Судя по последним фильмам, мы движемся к чему-то новому. Режиссёры как будто устали от иронии и цинизма. Всё чаще появляются фильмы, где архитектура не насмехается, а, наоборот, утешает. Где здания становятся не тюрьмой, а домом – тёплым, живым, хранящим память.

Это называют метамодерном – когда ирония остаётся, но добавляется искренность. Но это уже тема для следующего реферата.

А пока что можно сказать одно: без понимания архитектуры сегодня невозможно понять современное кино. И наоборот – хороший фильм меняет то, как мы смотрим на обычные здания на нашей улице. Может быть, завтра вы пройдёте мимо какого-нибудь дома и вдруг увидите в нём не просто бетон и стёкла, а целую историю. И это будет лучшая благодарность режиссёрам и архитекторам, которые научили нас так смотреть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Дженкс, Ч. Язык архитектуры постмодернизма. – М.: Стройиздат, 1985. – URL: https://djvu.online/file/TWKBMNbmbOgbK?ysclid=mnp6oy8crg622694216 (дата обращения: 23.03.2026)

2) Фуко, М. Другие пространства // Интеллектуалы и власть. – М.: Праксис, 1967. – URL: https://monoskop.org/images/b/b8/Fuko_Misel_Intellektualy_i_vlast_3.pdf (дата обращения: 27.03.2026)

3) Делёз, Ж. Ризома / Ж. Делёз, Ф. Гваттари // Философия эпохи постмодерна. – Минск, 1996. – URL: http://repository.buk.by/jspui/bitstream/123456789/20566/1/Literatura%20postmodernizma.pdf (дата обращения: 27.03.2026)

4) Интервью с художниками-постановщиками фильма «Бедные-несчастные» (Шона Хит и Джеймс Прайс) // Dezeen: [сайт]. – 2024. – 14 февраля. – URL: https://share.google/vbhHXKFT6hbRppGFM (дата обращения:1.04.2026)

5) Ллойд Б. Бедные-несчастные // Metropolis. – 2024. – Март. – URL: https://mediavision-mag.pro/uploads/03-2024/18-24%20Mediavision%2303-2024.pdf (дата обращения: 01.04.2026)

УДК 712.00

ГЕНЕРАЦИЯ ЭСКИЗНЫХ РЕШЕНИЙ ПАРКОВ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

П.А. Завьялова, С.В. Расторгуев

Научный руководитель – **С.В. Расторгуев**, старший преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В работе исследуется потенциал генеративного искусственного интеллекта для создания эскизных решений парков. Анализ проведен на базе пяти платформ: Google Labs, Whisk, JayFlow, Шедеврум, DeepAI и Kandinsky. Для этого были разработаны практические рекомендаций по формулированию промтов, ориентированных на создание рекреационных пространств. Помимо этого, предложена система критериев для сравнительной оценки качества и практической применимости генеративных ИИ-сервисов в ландшафтной деятельности.

Ключевые слова: нейронные сети, промт, генерация, парк, ландшафтное проектирование, рендеринг, эскизный проект

GENERATING SKETCH PARK DESIGNS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

P.A. Zavyalova, S.V. Rastorguev

Scientific Supervisor – **S.V. Rastorguev,** Senior Lectur

Yaroslavl State Technical University

This paper explores the potential of generative artificial intelligence for creating conceptual designs for parks. The analysis was conducted using five platforms: Google Labs, Whisk, Jay Flow, Shedevroom, DeepAI, and Kandinsky. To this end, practical recommendations were developed for formulating proposals aimed at creating recreational spaces. Furthermore, a system of criteria for comparatively assessing the quality and practical applicability of generative AI services in landscape design is proposed.

Keywords: neural networks, promt, generation, park, landscape design, rendering, draft design

Введение

Стремительная урбанизация требует новых подходов к проектированию парков, а развитие нейросетей открывает возможности для генерации эскизов.

В проанализированных нами работах вопросы использования ИИ в архитектуре и дизайне уже поднимались, однако применение этих технологий в проектировании парков остается малоизученным. Существующее противоречие между высоким технологическим потенциалом и отсутствием научных методик определило актуальность работы. Впервые предпринято системное исследование генеративных нейросетей как инструмента для генерации эскизов парковых пространств.

Гипотеза исследования состоит в том, что интеграция нейросетей на ранних стадиях проектирования способна сократить время концептуального поиска и расширить вариативность решений, но для реалистичности и функциональности проектов необходимы специализированные библиотеки промптов и обоснованный выбор платформы.

Цель работы — анализ возможностей и разработка рекомендаций по применению ИИ для генерации эскизов общественных парков на основе пяти нейросетей.

Задачи: разработать рекомендации по написанию промптов; провести экспериментальную генерацию изображений; составить критерии оценки качества изображений и удобства платформ; оценить релевантность нейросетей для проектирования парков.

Метод

Эффективность работы с нейросетями зависит не столько от понимания их устройства, сколько от умения формализовать запрос. Ниже представлен алгоритм формирования эффективного промта. Данный промт релевантен больше для ландшафтных задач учитывая свою специфику построения запроса.

1. Идентификация объекта и сценария

На первом уровне необходимо четко определить тип пространства, указав «парк» или «сквер», а также его тематическую направленность, например: детский или спортивный. Так же важно написать, куда именно направлен кадр.

2. Детализация субъектов

Для создания сюжета и соблюдения масштаба требуется прописать количество и тип людей. Допустим как полностью пустой парк, так и четко очерченная группа людей. Это помогает нейросети корректно распределить внимание и проработать взаимодействие персонажей с окружением.

3. Масштаб и площадь

Следует указать размер территории, например: небольшой сквер или обширный парк. При необходимости уточняется точная площадь и форма.

4. Колористика и материалы

Важно описать цветовую гамму и фактуру материалов.

5. Инфраструктура и благоустройство

Необходимо уточнить наличие интерактивных элементов и других функционально важных объектов.

6. Игровые и спортивные площадки

Следует конкретизировать специализированные зоны. Вместо абстрактной детской площадки лучше писать более подробно, уточняя детали (количество объектов, цвет, стиль, материал).

7. Атмосфера и стиль

Рекомендуется детально описывать погоду и время суток. Чем подробнее характеристика атмосферы, тем точнее нейросеть передаст освещение и рефлексы. При возможности стоит добавлять референсы изображений, чтобы уточнить желаемый стиль.

8. Озеленение и ландшафт

В описании нужно точно указать количество растений, используя обобщенные формулировки или конкретные цифры. При необходимости необходимо указать расположение и породы.

9. Проработка фона

Фон может служить смысловым продолжением сюжета или оставаться второстепенным элементом. Следует указать, что находится на заднем плане и определить степень детализации, глубины резкости.

10. Работа с результатом

Этот пункт относится к этапу доработки. После получения первых генераций формулируются уточняющие правки.

Результаты и их анализ

В рамках исследования мы разобрали такие нейросети, как Google Labs Whisk, JayFlow, Шедеврум, DeepAI и Kandinsky. Кратко рассмотрим их особенности.

Google Labs Whisk (Experiment) [19]. Инструмент комбинирует визуальные элементы, задаваемые через три параметра: тему, сцену и стиль. Тема определяет объекты, сцена отвечает за окружение и фон, стиль задает визуальное оформление. Все три элемента позволяют пользователям загружать собственные примеры (рис. 1).

Whisk позволяет уточнять результат, но из-за экспериментального статуса эта функция работает некорректно, так точечное редактирование искажает другие элементы. Так же сайт способен писать пояснительные записки к полученным изображениям. Анимация изображения работает стабильно и корректно.

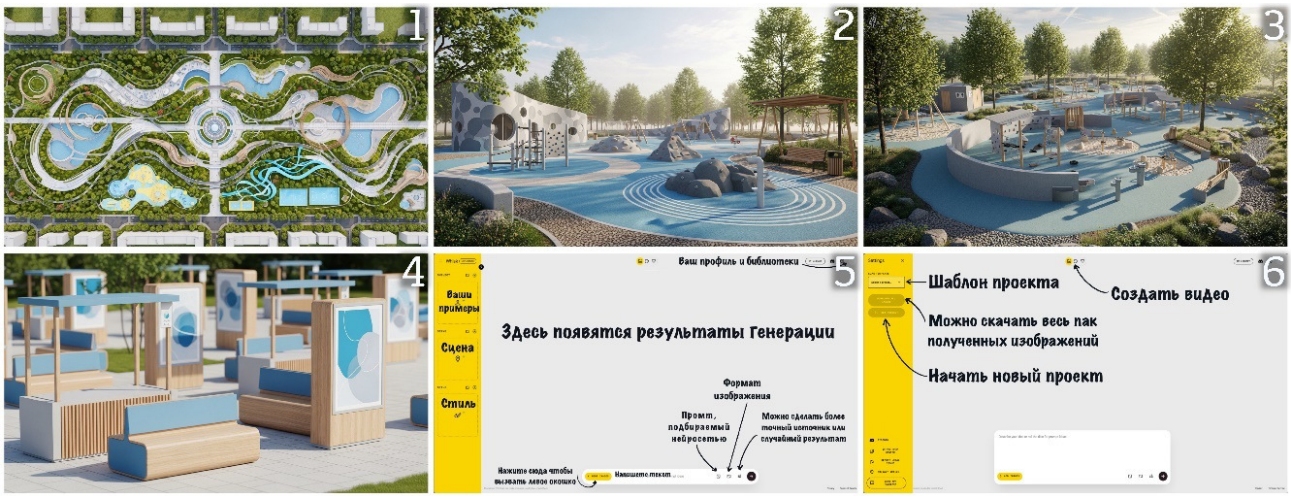


Рис. 1. Результаты эксперимента с ИИ Whisk:
1 - генерация общего плана парка; 2,3 - генерация детского парка; 4 - генерация малых архитектурных форм; 5,6 - аннотированный скриншот используемой программы

JayFlow. В блоке AUTO пользователь выбирает модель для генерации изображения, если выбор не сделан, система подбирает модель автоматически, «анализируя контекст и сложность задачи» [15]. Рядом с диалоговым окном находится панель выбора типа контента, благодаря ей можно создавать не только изображения, но и видео, презентации, веб-страницы и приложения и т.д. Для повышения точности результата можно загрузить до пяти референсов (превышение этого лимита может привести к ошибкам [15]). В расширенных настройках можно задать формат и стиль выходного файла. Главный минус данной платформы — сильно ограниченный бесплатный функционал, так на одно изображение уходит много кредитов, которые можно получить только при регистрации и раз в сутки (рис. 2).

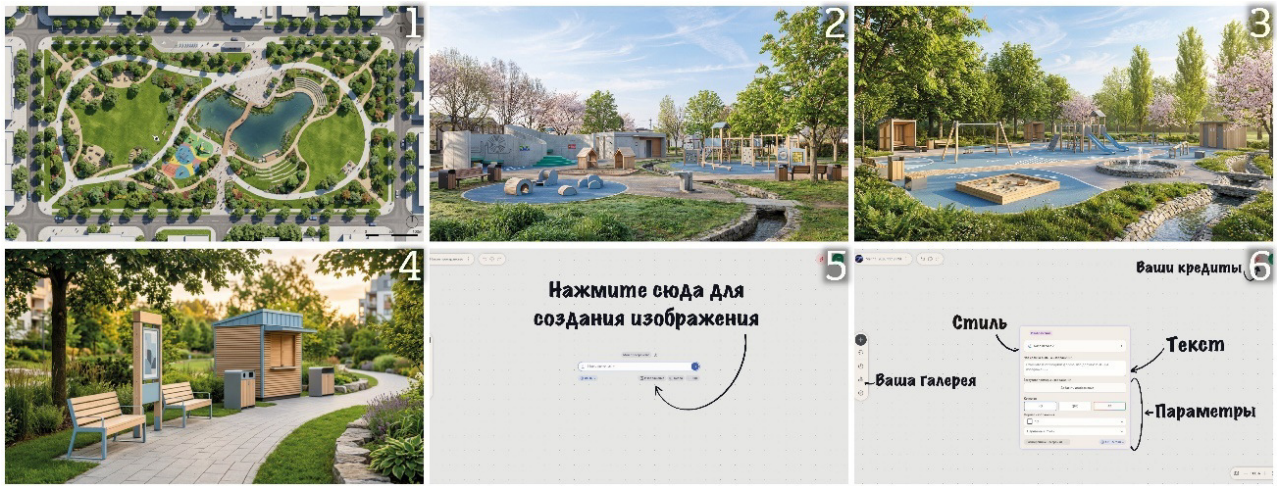


Рис. 2. Результаты эксперимента с ИИ JayFlow:
1 - генерация общего плана парка; 2,3 - генерация детского парка; 4 - генерация малых архитектурных форм; 5,6 – аннотированный скриншот используемой программы

Шедеврум [4]. Доступны бесплатные версии 1.0, 2.7 и 2.5. Главный недостаток – жёсткое ограничение длины запроса, поэтому промт необходимо многократно сокращать. Сохранить результат можно только после публикации. Если этого не сделать, доступ к изображению будет потерян навсегда. В день дается 70 бесплатных генераций на сайте, в мобильном приложении ограничений нет.

Версия 1.0 работает медленно, от пяти до десяти минут на генерацию, понимает запрос поверхностно. Версия 2.7 плохо следует промпту, часто считывает только один

элемент. Лучший результат показала версия 2.5 – она точнее понимает задачу и реже упускает детали, но качество объектов остается низким.

Нейросеть эффективнее работает с краткими запросами из одного–десяти слов. Для генерации сложных объектов, таких как детские парки, она подходит плохо. Вероятно, обучающей выборке было мало таких сюжетов. Функция генерации видео работает только по новому текстовому запросу (рис. 3).

Рис. 3. Результаты эксперимента с ИИ Шедеврум:
1 - генерация общего плана парка; 2 - генерация малых архитектурных форм;
3 – скриншот используемой программы, 4 - генерация детского парка модель v.1.0,
5 - генерация детского парка модель v.2.7, 6 - генерация детского парка модель 2.5

DeepAI [9]. Нейросеть позволяет выбирать между скоростью и качеством. Генерация длится несколько секунд, поэтому предпочтительнее выбирать качество. В бесплатном формате доступна только модель HB. Важен выбор версии: YeNewe – новая версия алгоритма, которая дает более четкие, детализированные и целостные изображения; YeOlde – устаревшая модель, выдает размытые снимки низкого качества. Рекомендуется всегда выбирать YeNewe. Стоит отметить, что, если текстовый запрос не менять, то итоговые варианты выходят стилистически похожими друг на друга. Данная версия малопригодна для задач, требующих генерации новых идей на основе одного промпта (рис. 4).

Рис. 4. Результаты эксперимента с ИИ DeepAI:
1 - генерация общего плана парка; 2 - генерация малых архитектурных форм;
3 - скриншот используемой программы, 4, 5 - генерация детского парка, модель YeNewe;
6 - генерация детского парка, модель YeOlde

Kandinsky (rudalle.ru) [17]. Генеративная нейросеть Kandinsky доступна на нескольких платформах, в исследовании мы сосредоточились на веб-ресурсе rudalle.ru. На главной странице предлагают попробовать Kandinsky 3.1 – для получения релевантных результатов стоит использовать именно эту версию, так как она позиционируется как наиболее актуальная. Применение предыдущих версий Kandinsky 3.0 и 2.2 нецелесообразно. Они дают менее релевантные решения по сравнению с актуальной моделью (рис. 5).

Рис. 5. Результаты эксперимента с ИИ Kandinsky:
1 - генерация общего плана парка; 2 - генерация малых архитектурных форм;
3 – скриншот используемой программы, 4 - генерация детского парка, модель 3.1;
5 - генерация детского парка, модель 3.0; 6 - генерация детского парка, модель 2.2

Далее была проведена оценка полученных результатов, для чего были разработаны специализированные критерии проверки сгенерированных изображений на функциональность, композиционную целостность и эргономику.

Приводим критерии оценки качества визуализации парковых пространств, сгенерированных нейросетями, в таблице 1.

Таблица 1. Критерии оценки качества визуализации

Критерий	**Описание критерия**	**Шкала оценивания**	**Балл**
1	2	3	4
1.Пространственная логика	Данный критерий оценивает соответствие сгенерированного пространства законам эргономики и базовым принципам ландшафтного проектирования.	Пространство полностью нелогично.	**0**
		Присутствуют грубые ошибки.	**1**
		В общем, пространство читаемо и логично, однако есть незначительные ошибки эргономики.	**2**
		Пространство абсолютно функционально.	**3**
2. Приближенность к выбранному стилю	Критерий измеряет способность нейросети точно идентифицировать и воспроизвести заданный пользователем стиль.	Полное игнорирование заданного стиля.	**0**
		Стиль угадывается слабо.	**1**
		Основные черты стиля соблюдены, однако присутствуют чужеродные элементы или упрощения.	**2**
		Полное и детальное соответствие выбранному стилю.	**3**
3. Корректный вид объектов	Оценка биологической и физической реалистичности объектов.	Изобилие грубых анатомических ошибок.	**0**
		Присутствуют заметные искажения.	**1**
		Основные объекты выглядят реалистично, но при детальном рассмотрении можно найти мелкие дефекты.	**2**
		Полный фотореализм.	**3**

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
4. Соответствие промпту	Точность выполнения текстового запроса пользователя.	Полное несоответствие промту пользователя.	**0**
		Слабое соответствие промту пользователя.	**1**
		Большинство пунктов промпта выполнены, однако есть незначительные расхождения или упущенные детали.	**2**
		Полное попадание в промпт.	**3**
5. Композиция	Оценка художественной целостности кадра.	Композиция отсутствует.	**0**
		Слабый баланс в количестве объектов, неестественные цвета.	**1**
		Композиция гармонична, цвета приятны и сочетаются, но изображению не хватает выразительности или акцента, оно выглядит шаблонно.	**2**
		Идеальный художественный баланс.	**3**
6. Техническая грамотность	Оценка корректности работы инженерных систем и состояния покрытий на изображении.	Отсутствие выполнения этого пункта.	**0**
		Присутствуют грубые ошибки.	**1**
		Незначительные недочеты.	**2**
		Высокая инженерная достоверность.	**3**
7. Качество изображения	Техническая оценка чистоты генерации.	Изображение непригодно к использованию.	**0**
		Низкое качество.	**1**
		Хорошее качество для веб-просмотра.	**2**
		Идеальное техническое исполнение.	**3**
8. Удобство использования	Интуитивно понятный интерфейс и продуманная логика взаимодействия, доступный функционал.	Неприятный опыт использования.	**0**
		Существует значительный дискомфорт.	**1**
		Есть незначительные трудности.	**2**
		Нейросеть, приятная для использования.	**3**

Максимальное количество баллов – 24.

Таблица 2. Сравнение 5 доступных ИИ-платформ

Название	Пункты								Итого
	Пространственная логика	Приближенность к выбранному стилю	Корректный вид объектов	Соответствие промту	Композиция	Техническая грамотность	Качество изображения	Удобство использования	
WHISK	2	3	2	3	2	2	2	3	**19**
JAY FLOW	2	3	2	3	2	2	2	2	**18**
Шедеврум	0	2	1	2	1	1	2	1	**10**
DeepAI	1	1	1	2	2	1	2	2	**12**
Kandinsky	2	2	1	3	2	1	2	2	**15**

Для оценивания мы брали самую последнею доступную версию ИИ на выбранных нами платформах.

Результаты тестирования выявили значительный разброс в качестве генерируемого контента. Лидеры исследования — нейросети WHISK и JAY FLOW, набравшие 19 и 18

баллов из 24 возможных соответственно. Данный результат подтверждает их пригодность для генерации эскизных ландшафтных решений. Напротив, низкая оценка «Шедеврума» (10 баллов), а также средние результаты Kandinsky (15 баллов) и DeepAI (12 баллов) указывают на то, что не все существующие платформы одинаково эффективно справляются с разработкой парковых пространств.

Заключение

В ходе исследования оценивался потенциал нейросетей для создания эскизов общественных парков. Искусственный интеллект показал себя эффективным инструментом быстрой генерации идей, так он позволяет прорабатывать различные видовые точки, сценарии использования и вариативные концепции.

Применение нейросетей на ранних этапах проектирования ускоряет поиск концепций и расширяет количество прорабатываемых вариантов. Однако успех сильно зависит от выбора платформы и качества промпта. Сравнительный анализ пяти сервисов показал разброс результатов, так лучшими стали Whisk и JayFlow, тогда как «Шедеврум», DeepAI и Kandinsky справились с ландшафтными задачами хуже.

К каждой платформе нужен индивидуальный подход, так где-то эффективна краткость, где-то – детализация. Излишняя конкретика в промптах, напротив, может приводить к шаблонным результатам (DeepAI). Ландшафтным архитекторам рекомендуется использовать Whisk и JayFlow для быстрой визуализации первичных идей.

Ограничения исследования состоит в том, что оценка проводилась только на бесплатных версиях нейросетей, а выборка запросов не охватывает все сценарии проектирования парков. В перспективе планируется расширить список нейросетей, привлечь профильных специалистов к оценке, интегрировать ИИ в профессиональные программы и разработать классификацию промптов для ландшафтных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Кудрявцева, В.Д. Искусственный интеллект в создании архитектурных проектов (с примерами) // Портал cih.ru: [сайт]. – URL: https://cih.ru/wp/bld/2026/01/23/искусственный-интеллект-в-создании-а/ (дата обращения: 19.03.2026).

2) Леохин, Ю.Л. Разработка методов и алгоритма формализации текстового запроса к онлайн-сервисам, генерирующим изображения посредством нейросетевых технологий / Ю.Л. Леохин, Т.Д. Фатхулин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 85. – С. 82-95.

3) Расторгуев, С.В. Символизм в ландшафтной архитектуре / С.В. Расторгуев, Е.В. Голубева // Умные композиты в строительстве. – 2025. – Т. 6, № 4. – С. 80-93. – DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-80-93. EDN: UCGAMZ. – URL: https://ystu.editorum.ru/ru/nauka/journal/238/view

4) Шедеврум – с нейросетями Яндекса для создания картинок // shedevrum.ai: [сайт]. – URL: https://shedevrum.ai/ (дата обращения: 09.03.2026).

5) Alam, A. Possibilities and Apprehensions in the Landscape of Artificial Intelligence in Education // International Conference on Computational Intelligence and Computing Applications (ICCICA). – Nagpur, India, 2021. – С. 1-8.

6) Revolutionizing visuals: The role of generative AI in modern image generation / G. Bansal, A. Nawal, V. Chamola, N. Herencsar // ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications. – 2024. – Т. 20, № 11. – С. 1-22.

7) Beyan, E.V.P. A review of AI image generator: influences, challenges, and future prospects for architectural field / E.V.P. Beyan, A.G.C. Rossy // Journal of artificial intelligence in architecture. – 2023. – Т. 2, № 1. – С. 53-65.

8) Cho, H.K. A Study on the Current Status and Qualitative Development of AI Midjourney 2d Graphic Results // The Journal of the Convergence on Culture Technology. – 2024. – Т. 10, № 5. – С. 803-808.

9) DeepAI // DeepAI: [сайт]. – URL: https://deepai.org/ (дата обращения: 09.03.2026).

10) A Comprehensive Survey on Artificial Intelligence for Complex Network: Potential, Methodology and Application / J. Ding [et al.] //arXiv preprint arXiv:2402.16887. – 2024. – С. 1-52.

11) Image generation: A review / M. Elasri, O. Elharrouss, S. Al-Maadeed, H. Tairi // Neural Processing Letters. – 2022. – Т. 54, № 5. – С. 4609-4646. – DOI: 10.1007/s11063-022-10777-x.

12) Fareed, M.W. Exploring the potentials of artificial intelligence image generators for educating the history of architecture / M.W. Fareed, A. Bou Nassif, E. Nofal // Heritage. – 2024. – Т. 7, № 3. – С. 1727-1753. DOI: 10.3390/heritage7030081.

13) Frazier, A.E. Artificial intelligence in landscape ecology: recent advances, perspectives, and opportunities / A.E. Frazier, L. Song // Current Landscape Ecology Reports. – 2025. – Т. 10, № 1. – С. 1-13. DOI: 10.1007/s40823-024-00103-7.

14) Iljic, T. Whisk: Visualize and remix ideas using images and AI / T. Iljic, N. Brichtova // Google. The Keyword: [сайт]. – URL: https://blog.google/innovation-and-ai/models-and-research/google-labs/whisk/ (дата обращения: 02.03.2026).

15) JayFlow – пространство для творчества и работы с контентом и нейросетями // JayFlow: [сайт]. – URL: https://jayflow.ai/app (дата обращения: 09.03.2026).

16) Radhakrishnan, A.M. Is Midjourney-AI a new anti-hero of architectural imagery and creativity // GSJ. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 94-104.

17) Rudalle – Используйте технические возможности моделей. // rudalle.ru: [сайт]. – URL: https://rudalle.ru/ (дата обращения: 09.03.2026).

18) Tsidylo, I.M. Artificial intelligence as a methodological innovation in the training of future designers: Midjourney tools / I.M. Tsidylo, C.E. Sena // Information Technologies and Learning Tools. – 2023. – Т. 97, № 5. – С. 203-214.

19) Whisk experiment // Google Labs: Google's home for AI experiments: [сайт]. – URL: https://labs.google/fx/tools/whisk (дата обращения: 09.03.2026).

20) Generation of images from text using AI / N. Yadav, A. Sinha, M. Jain, A. Agrawal, S. Francis // International journal of engineering and manufacturing. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 24-37.

УДК 72.01

АРХИТЕКТУРНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЕНСОРНОЙ СРЕДЫ РЕТРИТ-ЦЕНТРОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА «ТОЧКА РОСЫ» НА РЕКЕ ШАКША)

А.Р. Запевалова

Научный руководитель – **М.Е. Баталова**, ст. преподаватель, магистр архитектуры

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена выявлению архитектурно-планировочных принципов организации ретрит-центров как инструмента сенсорной разгрузки и психофизиологического восстановления человека в условиях урбанизированной среды. Рассматривается влияние тактильных, визуальных и пространственных характеристик архитектуры на эмоциональное состояние посетителя. На основе анализа мирового и отечественного опыта, а также авторского проекта «Точка росы» (Ярославская область, р. Шакша) формулируется концепция

Ключевые слова: *ретрит-центр, сенсорная архитектура, архитектурная среда, психоэмоциональный комфорт, ландшафтная интеграция, рекреация.*

ARCHITECTURAL PRINCIPLES FOR SHAPING THE SENSORY ENVIRONMENT OF RETREAT CENTERS (ON THE EXAMPLE OF THE «DEW POINT» PROJECT ON THE SHAKSHA RIVER)

A.R. Zapevalova

Scientific Supervisor – **M.E. Batalova,** Senior Lecturer, Master of Architecture

Yaroslavl State Technical University

The article is devoted to identifying the architectural and planning principles of organizing retreat centers as a tool for sensory relief and psychophysiological restoration of a person in an urbanized environment. The influence of tactile, visual and spatial characteristics of architecture on the emotional state of the visitor is examined. Based on an analysis of global and domestic experience, as well as the author's project «Dew Point» (Yaroslavl region, Shaksha river), the concept of a «sensory attunement path» is formulated through volumetric-spatial solutions and integration into the natural landscape.

Keywords: *retreat center, sensory architecture, architectural environment, psycho-emotional comfort, landscape integration, recreation*

В условиях современной урбанизированной среды человек подвергается постоянному воздействию высоких когнитивных нагрузок и визуального шума. Данный фактор обуславливает растущий спрос на специализированные пространства для ментального восстановления — ретрит-центры. В отличие от традиционных баз отдыха, ориентированных на пассивный досуг или развлекательную активность, ретрит-центры направлены на глубокое психофизиологическое восстановление через практики созерцания и уединения.

Целью статьи является выявление архитектурно-планировочных принципов, способствующих формированию сенсорной среды.

Архитектура ретрит-центра взаимодействует с посетителем на нескольких уровнях восприятия: визуальном, тактильном, слуховом и проприоцептивном. В отличие от жилой или общественной застройки, где приоритетом является функциональная эффективность, в ретрит-пространствах главенствует принцип «сенсорного минимализма» и «экологического резонанса».

Визуальный канал является доминирующим при формировании первого впечатления. В проектировании ретрит-центров ключевым приемом становится использование

панорамного остекления, которое выполняет роль медиатора между интерьером и экстерьером. С точки зрения психофизиологии, отсутствие жестких визуальных границ снижает уровень тревожности за счет эффекта «растворения» в природной среде. Тактильное воздействие реализуется через выбор материалов с выраженной фактурой.

Теория «пути сенсорной настройки» подразумевает создание пространственных пауз. В архитектурном планировании это реализуется через буферные зоны и вертикальные доминанты, которые способствуют дистанцированию от повседневных проблем.

Также в архитектуре ретрит-центров играет особую роль философское осмысление пространства. Важно понимать, что любая архитектура необходима только человеку. Без наблюдателя смысл пространства умирает, и мы видим, как природа стремится вернуть архитектурный объект в исходное состояние. Поиск смыслов через архитектуру становится для человека способом зафиксировать собственное существование в точке пересечения рукотворного и вечного.

Для выявления наиболее эффективных методов сенсорного воздействия было принято решение взять в качестве примеров три комплекса в различных физико-географических зонах.

В первую очередь рассмотрим пример, реализованный в Центральной России, Welna Eco Spa Resortв Таруса Калужской области (рис. 1). Цель – понять, как в схожих климатико-природных условиях с Ярославлем была создана психологически комфортная среда, сохраняющая свою привлекательность во все сезоны.

Объект рассматривается не просто как спа-комплекс, а как пример эко-ретрита, где архитектура из натуральных материалов выступает инструментом сенсорной терапии, минимизируя визуальный шум и возвращая человека к естественным ритмам через контакт с материалами и ландшафтом.

Рис. 1. Welna Eco Spa Resort Таруса

Использование лиственницы и сосны формирует привычный тактильный и акустический фон, минимизируя визуальный шум. Архитектурное решение фасадов с их ритмичным членением визуально перекликается с вертикалями окружающего ландшафта – березовых и хвойных рощ. Проект демонстрирует четкое функциональное зонирование на "интенсивные" и "тихие" территории. SPA-комплекс архитектурно отделен от жилых зон, что формирует особый пространственный сценарий: посетитель совершает осознанный переход от отдыха к оздоровлению, что способствует более глубокому ментальному переключению».

В качестве второго примера рассмотрим эко-отель "Мирамирам", который представляет собой иную архитектурную модель – ретрит как погружение в микросферу.

«Мирамирам» находится на берегу реки Катунь в посёлке Аскат Республики Алтай. Местные жители уверены, что это место силы, которое возникло благодаря изгибу реки и строительству по древнему искусству Васту. При организации пространства все гармонично вписано в нетронутую человеком природу, благодаря чему не нарушена естественная экосистема (рис. 2).

Один из композиционных приемов здесь – использование купольных и сферических конструкций, а также натуральных материалов для жилых модулей. С точки зрения

психологии пространства, отсутствие острых углов способствует концентрации внимания на внутреннем состоянии, а дерево создает ощущение безопасности и связи с природой.

Рис. 2. Пример жилого модуля в эко-отеле Мирамирам

Использование зеркальных поверхностей позволяет "растворить" объект в окружающей среде, сводя визуальное присутствие человека в лесу к минимуму. Внутреннее пространство модулей проектируется как "сенсорный вакуум" с панорамным фокусом на природные доминанты, что делает архитектуру активным участником медитативного процесса

В качестве зарубежного опыта проанализирован The Retreatat Blue Lagoon в Исландии – проект, являющийся эталонным примером интеграции архитектуры в агрессивный, но живописный природный контекст (рис. 3).

Архитектурное решение базируется на принципе геологического сращивания: здание интегрировано в разломы лавового поля. В отделке использована концепция материального единства – бетон с добавлением лавовой крошки, темное дерево и необработанный камень создают визуальную и тактильную идентичность с пейзажем.

Рис. 3. The Retreat at Blue Lagoon Island

Сплошное остекление жилых блоков работает на стирание физических границ, создавая эффект непрерывности среды. Этот пример доказывает, что архитектура ретрита может мимикрировать под природу не только через форму, но и через текстурное соответствие, где интерьер становится продолжением топографии.

Анализ показал, что для создания полноценной ретрит-среды необходимо соблюдение трех условий: материальная идентичность, разделение функций для управления вниманием посетителя, максимальное включение ландшафта в интерьерные пространства.

Выявленные принципы ложатся в основу проектного предложения базы отдыха «Точка росы». Мой проект разработан как единый пространственный сценарий, интегрированный в экосистему лесного массива Ярославской области рядом с рекой

Шакшей. Особенностью генерального плана является разделение территории на два участка, на одном из которых находятся заброшенные строения «детских дач» времен советского союза. Мы проводим их реконструкцию подобно тому, как ретрит-центр восстанавливает разрушенное эмоциональное состояние человека (рис. 4).

Архитектурно-планировочное решение строится на метафоре пути, где посетитель последовательно проходит через разные состояния бытия, отраженные в материальной среде. Территория четко разделена на два контрастных кластера, соединенных лесной зоной.

Первый участок представляет собой пространство, ориентированное на человека и его социальную природу. Здесь вечность трактуется как масштаб одной человеческой жизни. Использование архетипичных форм домиков типа A-frame создает ощущение защиты; их геометрия понятна, а меньшая плотность леса оставляет пространство для привычного социального взаимодействия. Это «жизнь как социум», где архитектура выступает деликатным фоном для комфортного пребывания, подготавливая сознание к дальнейшему погружению, но не вырывая его из привычного контекста.

Переход во второй кластер осуществляется через густой лесной массив, выполняющий функцию психологического очищения. Кульминацией этого транзита становятся два монументальных бетонных столба – портал. Это – точка невозврата, архитектурный ритуал отделения человеческого от вневременного.

Второй участок, расположенный в глубине ландшафта, манифестирует концепцию «жизни как вечности». Здесь архитектура перестает быть соразмерной человеку и начинает апеллировать к категориям космоса, природного цикла и абсолютного покоя. Это пространство транслирует состояние успокоения: осознание масштаба природы и вечности может пугать, но именно через этот экзистенциальный трепет достигается истинный катарсис.

Данный проект – это попытка создать среду для глубокого эмоционального опыта. Архитектура здесь работает как инструмент, ведущий человека от поверхностного социального уюта к созерцанию вечности, доказывая, что ретрит – это прежде всего честный диалог с самим собой и окружающим миром, выраженный в материале и форме.

Объемно-пространственное решение здания самого ретрит-центра строится на четком функциональном зонировании. Правое крыло возводится на месте старой котельной. Раньше там горел огонь и согревал весь участок, сейчас же оно будет греть тело и душу, т.к. в нём будет находиться SPA-комплекс, ориентированный на физическую релаксацию. Левое крыло представляет собой пространство для интеллектуального уединения и ретрита.

Рис. 4. Здание ретрит-центра. Южный фасад

Особое внимание уделено территории между участками, где архитектура переходит в формат арт-объектов и малых архитектурных форм, заставляя человека замедляться и фиксировать взгляд на деталях. Световые инсталляции интегрированы в ландшафт как символы жизненной энергии, пронизывающей всё живое. Использование зеркальных поверхностей подчеркивает переход за границы привычного восприятия.

Весь проект пронизан идеей фундаментальной дуальности мира. Архитектурная среда здесь служит наглядной репрезентацией контрастов, из которых соткано бытие: теплое и холодное, конечное и вечное, социальное и сакральное, дерево и бетон. Суть концепции заключается в том, что человеческая жизнь всегда разворачивается «посередине» этих полюсов.

В ходе исследования было доказано, что архитектура ретрит-центра — сложный инструмент управления человеческим состоянием. Наиболее глубокое восстановление психоэмоционального баланса достигается через работу с особенностями среды и психологически разным воздействием текстур и форм на человека.

Таким образом, проект демонстрирует переход от традиционного понимания ретрита как «отдыха» к концепции экзистенциального опыта. Архитектура здесь фиксирует человека в "срединной точке" между привычным бытовым уютом и пугающим величием вечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Гельфонд, А.Л. Архитектурное проектирование общественных пространств: учебник для вузов / А.Л. Гельфонд. – Москва: Издательство АСВ, 2019. – 368 с.

2) Степанов, А.В. Архитектура и психология: учебник для вузов / А.В. Степанов, Г.И. Иванова, Н.Н. Нечаев. – 2-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 355 с.

3) Erwine, B. Creating Sensory Spaces: The Architecture of the Invisible / B. Erwine. – 2nd ed. – London: Routledge, 2025.

4) Holubchak, K. Fundamental principles of architectural internal arrangements of space of spiritual-retreat centre / Kateryna Holubchak // Architectural Studies. – 2017. – Vol. 3, no. 1. – P. 25–32.

5) Kramer, S. Yoga and Spiritual Retreats: Relaxing Spaces to Find Oneself / edited by Sibylle Kramer. – 1st ed. – Salenstein: Braun Publishing AG, 2015. – 160 p.

6) Lehman, M.L. Adaptive Sensory Environments: An Introduction / M.L. Lehman. – 1st ed. – London: Routledge, 2017. – 202 p.

7). Liapi, M. Sensponsive architecture as a tool to stimulate the senses and alleviate the psychological disorders of an individual / M. Liapi, K. Liapi, Eirini I. Voukkali // Cognitive Processing. – 2021. – Vol. 22. – P. 1-15.

8) Pallasmaa, J. The Eyes of the Skin: Architecture and the Senses / Juhani Pallasmaa. – 3rd ed. – Chichester: Wiley, 2012. – 128 p.

9) Zumthor, P. Atmospheres: Architectural Environments. Surrounding Objects / P. Zumthor. – Basel: Birkhäuser, 2006. – 75 p.

УДК 728.222

РЕНОВАЦИЯ ПАНЕЛЬНОЙ ЗАСТРОЙКИ ДЗЕРЖИНСКОГО РАЙОНА ГОРОДА ЯРОСЛАВЛЯ

М.М. Киселев, М.Н. Кудряшов

Научный руководитель – **М.Н. Кудряшов**, канд. искусствоведения, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье анализируется градостроительная среда, формируемая многоквартирными панельными жилыми домами. Рассматриваются пути реновации панельных зданий с использованием опыта санации панельной застройки в Германии, Финляндии, Словакии, Чехии, Литве.

Ключевые слова: *реновация, приспособление, спальные районы, архитектура, градостроительство*

RENOVATION OF PANEL BUILDINGS IN THE DZERZHINSKY DISTRICT OF THE CITY OF YAROSLAVL

M.M. Kiselev, M.N. Kudryashov

Scientific Supervisor – **M.N. Kudryashov**, Candidate of Art Criticism, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This article analyzes the urban environment shaped by multi-apartment panel residential buildings. It explores ways to renovate these buildings, drawing on the experience of rehabilitating panel housing in Germany, Finland, Slovakia, the Czech Republic, and Lithuania.

Keywords: *renovation, adaptation, residential areas, architecture, urban development*

Дзержинский район – самая молодая и густонаселенная территория современного Ярославля. Район вошел в состав городских территорий в 1979 году, объединив себе территории бывшего Красноперевальского района с территориями близлежащих населенных пунктов, включая Иваньково, Осташинское, Норское и Брагино.

Реновация панельной застройки – очень актуальная тема, в частности из-за возраста жилых многоквартирных домов панельной конструкции. Средний возраст панельного здания в Дзержинском районе – 49 лет (рис. 1).

«Панельки» устарели как морально, так и физически. Ухудшавшееся со временем состояние фасадов является еще одной причиной актуальности темы. Из-за изначально экономичного и рационалистического подхода к проектированию панельных зданий сложилась ситуация, при которой эксплуатация дома и бесконтрольная модернизация его фасада жильцами привела к хаотическим изменениям, со временем создав большое количество визуального шума на фасадах.

В панельных домах отсутствуют иногда жизненно необходимые жильцам удобства в сфере доступности. Такие элементы как лифты, остекленные лоджии или террасы для жителей первых и последних этажей не предусматривались изначальными проектами ввиду конструктивной сложности и высоких затрат.

Так же крайне важный аспект – среда, формируемая панельными зданиями. Дворы часто нуждаются в модернизации или даже полной реконструкции, включая изменения в зонировании и транспортно-пешеходной доступности.

Проанализировав градостроительную ситуацию в Дзержинском районе, я сделал следующие наблюдения. На выбранной территории располагаются более 780 жилых зданий, что в соотношении к нежилым, т.е. общественным, коммерческими, административным т.п. является абсолютным большинством.

Рис. 1. Панорама Дзержинского района в городе Ярославль

Среди жилых зданий 460 – панельные дома, что составляет 58,97% от общего числа жилых домов.

Средняя этажность панельных зданий – 5,9 этажей. Самая распространенная этажность – 5 этажей, самая нераспространенная – меньше 3 этажей. Пятиэтажных панельных домов – 192 штуки, что составляет 44,63 процента от общего числа панельных зданий района.

Среднее количество подъездов в 1 жилом доме панельной конструкции – 4. Минимально – 1 подъезд в типовой серии 1-464-Д-88. Максимально – 20 подъездов в типовой серии 1-464-Д-105.

Основная проблема, наблюдаемая в Дзержинском районе – возраст зданий жилого фонда. Эта проблема становится актуальнее с каждым днем, большое количество панельных зданий в совокупности со средним возрастом в почти пять десятилетий делает проблему критической. Устаревание конструкций, выветривание швов и прочие проблемы, свойственные длительной эксплуатации зданий, приводят к частичному разрушению, как уже происходит с панельным девятиэтажным домом на Ленинградском проспекте. При этом экономическая ситуация не позволяет расселять людей целыми микрорайонами, чтобы сделать полную «бульдозерную» реконструкцию. Возникает необходимость найти более мягкий как для экономики, так и для жителей района подход для модернизации панельного жилищного фонда. В данном вопросе стоит обратиться к опыту других стран, в которых так же существуют панельные дома примерного того же возраста. Опыт таких стран как Германия, Финляндия, Эстония, Чехия, Словакия, Литва может быть полезен как с точки зрения эстетических и конструктивных решений, так и с точки зрения организации процессов реновации панельной застройки.

Опыт европейских стран в сфере реновации зданий панельной конструкции показывает, что существует множество способов как конструктивно-функционального, так и чисто эстетического изменения облика «панелек».

К самым ярким конструктивным изменениям можно отнести: изменение этажности, изменение силуэта здания путем разбора отдельных панелей, достраивание на придомовых территориях огороженных террас для жильцов первых этажей, пристройка внешних лифтовых шахт со светопрозрачными ограждающими конструкциями, расширение балконов.

К чисто эстетическим визуальным приемам в реновации панельных зданий можно отнести: покраску фасада, отделку фасада декоративными панелями, замену балконных блоков и блоков лоджий на современные с алюминиевыми рамами, отделку первых этажей акцентными материалами.

В данной статье рассмотрено, как все вышеперечисленное можно применить в Дзержинском районе. Для примера возьмем самую распространенную для этой территории модификацию – 1-464-Д-105 (рис. 2).

Рис. 2. Панельный дом, серия 1-464-Д-105 по адресу ул. Громова, 32

Данная модификация представляет собой пятиэтажную секцию с лоджиями, скатной кровлей, небольшими по высоте окнами на лестничной клетке. Секция состоит преимущественно из однокомнатных квартир (по три квартиры на этаже) и одной двухкомнатной.

К аутентичным деталям стоит отнести отделку балконов, выполненную из формовых бетонных панелей с узором в виде ромбов. Аналогичные по форме и масштабности панели можно использовать в отделке фасада модернизированного здания, чтобы сохранить дух места.

К конструктивным изменениям, применимым в этом конкретном случае можно отнести следующие пункты:

1. Замена скатной кровли на плоскую, изменение ливневой канализации на скрытую, это позволит визуально вытянуть здание, убрать верхнюю «крышку» в виде свеса кровли, а также освободит фасад от визуального шума оцинкованных труб и поржавевших от времени металлических креплений. Аналогичный прием применялся в Германии, Словакии, Финляндии.

2. Замена панели над входной группой на планарное витражное остекление, замена старых поручней и добавление ограждений вблизи витража. Замена входной двери и навеса над крыльцом на аналогичные по габаритам, но выполненные из светопрозрачных материалов. Это позволит нам сделать темные подъезды светлее и безопаснее.

3. Создание террас на верхних этажах, изменение планировки верхнего этажа. Выполняется по аналогии с немецкими санированными зданиями – Haus 04, Haus 06 в районе Лайнефельде. Благодаря этому мы меняем монотонный силуэт секции, что в совокупности с возможным разбором верхнего этажа позволит создать уникальный жилой дом на базе типового панельного.

4. Пристраивание или расширение балконов. Легкие металлические балконы на подвесах, крепящиеся к фасаду, позволят расширить как площадь квартир за счет лоджии, так и расширить площадь самого балкона. Данный прием массово применялся в реконструкции панельных домов в Финляндии. На верхних этажах, не защищенных от солнца и осадков, устанавливаются выдвижные маркизы.

5. Пристраивание на первых этажах отгороженных террас, дополнительно обнесенных кустарниками. Решает сразу несколько проблем панельных зданий. Первая и основная проблема в том, что не у всех панельных зданий предусмотрены лоджии или балконы на первых этажах, это неравенство с жителями верхних этажей приводит к несанкционированным пристройкам балконов, терраса решает эту проблему. Помимо этого, данная конструкция отодвигает улицу от дома, что делает жизнь на нижних этажах немного

комфортнее. Хорошим примером реализации данного улучшения можно считать Haus 01 в Германии.

6. Последнее, что стоит отметить – утепление фасада по технологии мокрый фасад, что подразумевает собой устройство панелей утеплителя под нанесение штукатурного слоя по армирующей сетке.

К декоративным улучшениям, которые несут сугубо эстетические изменения можно отнести следующие изменения:

1. Покраска фасада в теплые цвета, покраска первого этажа в акцентный теплый цвет. Использование в отделке преимущественно теплых цветов, в том числе в материале оконных рам, ограждений, витражных систем. В нашем климате преобладают холодные времена года, поэтому использование теплых оттенков положительно сказывается на восприятии. Разнообразная покраска применялась во многих примерах реконструкции панельного здания, самые яркие в Чехии, Финляндии.

2. Добавление декоративных поясов над уровнем последнего этажа, так же позволяет немного вытянуть силуэт добавить ему вертикальной динамики. Декорирование фасада с изменением его пластики применялось в Финляндии, но также стоит отметить опыт Калининграда в реконструкции хрущевок, основная идея там была в приближении декоративного убранства здания к классическим домам Кенигсберга.

3. Добавление панелей вокруг витража лестницы, дополнительно выделяют входную группу и создают связь нового и старого.

4. Добавление цветного витража на лестницу. Привнесет яркость, витражи могут различаться от двора ко двору, что будет создавать дополнительную идентичность и разнообразность пространства. Цветные стекла применялись в Финляндии, но использовались на нижних панелях балконов.

5. Декоративное обрамление террасы первого этажа облицовочным кирпичом. Данный прием успешно применялся в первых реконструкциях панельных домов в Германии, мелкая пластика кирпича и его естественные цвета добавляют натуральности всему зданию (рис. 3).

Рис. 3. Реконструированный панельный дом,
серия 1-464-Д-105 Модернизация 1

Рис. 4. Реконструкция панельной застройки на примере 10 микрорайона Дзержинского района

Таким образом можно попытаться решить одну из главных проблем Дзержинского района – устаревание панельного жилищного фонда (рис. 4). Создание нескольких подобных модификация в совокупности с комбинацией этажностей может до неузнаваемости преобразить серую панельную среду, избавить ее от монотонности и однообразности. Что в свою очередь способно вдохнуть новую жизнь в эти для многих родные с детства «панельки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Киселев М.М. Приспособление спальных районов опыт гдр в реновации панельной застройки / М.М. Киселев, М.Н. Кудряшов // Семьдесят восьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием «Научные разработки и инженерные кадры для технологического лидерства России». (23 апреля 2025 г., Ярославль): сб. материалов конференции. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2025. – С. 54-58. – 1 CD-ROM. – Текст: электронный.

2) Данилова, Э.В. Особенности реновации районов панельной застройки в восточной германии / Э.В. Данилова, А.М. Макрушина // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство: сборник статей 78-й всероссийской научно-технической конференции, Самара, 19–23 апреля 2021 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2021. – С. 244-251. – EDN NUZJPQ.

3) Хендрикс, А. Реновация в Восточной Германии: программа поддержки "исчезающих" городов / А. Хендрикс, Н.В. Волович // Имущественные отношения в РФ. – 2018. – № 5 (200). – С. 26-42. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/renovatsiya-v-vostochnoy-germanii-programma-podderzhki-ischezayuschih-gorodov (дата обращения: 31.03.2025).

4) Мельникова, М. Не просто панельки: немецкий опыт работы с районами массовой застройки. - М.: Мария Мельникова, 2020. - 130 с.

5) "Не просто панельки" // archi.ru: [сайт]. – URL: https://archi.ru/world/88231/ne-prosto-panelki (дата обращения: 31.03.2025).

6) Где панельке сносу нет // Комерсант: [сайт]. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/3304245 (дата обращения: 31.03.2025).

7) Stadtumbau Ost – LösungeinerWohnungsfrage? // Bundeszentrale fur politische Bildung: [сайт]. – URL: https://www.bpb.de/themen/deutschlandarchiv/286642/stadtumbau-ost-loesung-einer-wohnungsfrage/ (дата обращения: 01.04.2025).

УДК 7.038.06

БОРЬБА МОДЕРНИЗМА И ПОСТМОДЕРНИЗМА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Е.А. Волкова, Е.Д. Клешнина, С.В. Расторгуев

Научный руководитель – **С.В. Расторгуев**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Авторы исследуют взаимодействие модернизма и постмодернизма в культуре и архитектуре XX–XXI веков. Рассматривается переход от модернистской веры в рациональность и прогресс к постмодернистской иронии и деконструкции универсальных истин. Авторы исследуют проявление этих парадигм в социальной и политической сферах, а также в современном искусстве. В заключении обосновывается идея о том, что современность характеризуется не победой одного направления, а их гибридным синтезом, который в научной среде получает определение «метамодернизм».

Ключевые слова: *модернизм, постмодернизм, архитектура XX века, современная архитектура, рационализм, урбанистика, новая искренность*

THE STRUGGLE BETWEEN MODERNISM AND POSTMODERNISM IN THE MODERN ERA

E.A. Volkova, E.D. Kleshnina, S.V. Rastorguev

Scientific Supervisor – **S.V. Rastorguev,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The authors examine the interaction between modernism and postmodernism in the culture and architecture of the 20th–21st centuries. The transition from the modernist belief in rationality and progress to postmodern irony and the deconstruction of universal truths is analyzed. The authors explore the manifestation of these paradigms in social and political spheres, as well as in contemporary art. The conclusion substantiates the idea that contemporaneity is characterized not by the dominance of a single paradigm, but by their hybrid synthesis, which in academic discourse is defined as "metamodernism".

Keywords: *modernism, postmodernism, 20th-century architecture, contemporary architecture, rationalism, urbanism, new sincerity*

Вопрос о соотношении модернизма и постмодернизма остается фундаментальным для гуманитарной мысли последних десятилетий. Несмотря на провозглашенный постмодерном «конец больших нарративов», мы видим, что вера в рациональность и прогресс не исчезла, а трансформировалась. Сегодня эти две парадигмы не сменяют друг друга в хронологическом порядке, а сосуществуют в режиме постоянного диалога.

Модернистский каркас: Рацио и Функциональность

Модернизм, рожденный на стыке XIX и XX веков, стал апофеозом веры в человеческий разум. Индустриализация и наука требовали новых форм. В архитектуре это вылилось в честный, почти аскетичный язык стали, стекла и бетона. Принцип «форма следует функции» (от Ле Корбюзье до Фрэнка Ллойда Райта) был не просто строительным правилом, а манифестом рационального устройства мира (рис. 1 и 2). Задача ставилась грандиозная: создать универсальную, доступную и логичную среду для массового человека. Этот проект до сих пор составляет «несущую конструкцию» нашей цивилизации.

Во второй половине XX века модернистский оптимизм столкнулся с жесткой реальностью войн и тоталитаризма. Постмодернизм возник как скептическая реакция на любые универсальные истины. Вслед за Лиотаром и Деррида архитекторы и мыслители отказались от диктатуры функции в пользу декоративности, эклектики и игры. Здание или

произведение искусства превратилось в «текст», наполненный историческими цитатами. Здесь нет одного «правильного» пути, есть только подход *adhoc* — решение, уместное в конкретном культурном контексте (рис. 3).

Рис. 1. Ле Карбюзье. Здание Центрсоюза, Москва. 1928–1936 годы

Рис. 2. Оскар Нимейер. Здание Национального конгресса, Бразилиа. 1960 год

Рис. 3. Людвиг Мис ван дер Роэ. Дом Фарнсуорт. Стеклянный дом-головоломка, обозначившая переход Миса ван дер Роэ от модернизма к постмодернизму. 1951 год

Сегодня борьба этих культурных кодов перешла в новую плоскость:

- **Новый функционализм:** Глобальные вызовы – от климатического кризиса до пандемий – вновь заставляют нас обращаться к модернистскому инструментарию: научному планированию и поиску универсальных решений. Экологическая эффективность зданий сегодня – это, по сути, современное прочтение функционализма.
- **Цифровая фрагментация:** С другой стороны, интернет-технологии довели идеи постмодернизма до абсолюта. Виртуальные идентичности, мозаичность новостных лент и плюрализм истин создают реальность, в которой фрагментарность стала нормой жизни.

Политическое измерение: Глобальное против Локального

Конфликт парадигм отчетливо виден в общественном поле. Модернистская логика опирается на универсальные ценности – права человека, рациональную демократию и науку. Постмодернистская перспектива, напротив, подчеркивает культурную относительность, защиту локальных идентичностей и критику любых иерархий. Мы живем в эпоху, где потребность в глобальном единстве постоянно наталкивается на сопротивление частных смыслов.

Искусство и поиск синтеза: Метамодерн

Искусство XXI века всё чаще отказывается выбирать сторону, сочетая модернистскую тягу к эксперименту с постмодернистской иронией. Понятия «метамодернизм» или «новая искренность» описывают наше стремление соединить вовлеченность с отстраненностью. Мы

учимся быть серьезными, осознавая при этом долю игры в происходящем. Современная культура становится гибридной формой, где старые оппозиции теряют свою остроту (рис. 4).

Рис. 4. Бланкой Лео, студия MVRDV. Здание "El Mirador", Мадрид. 2005 год

Заключение

Современность – это не поле битвы, где одна концепция должна поглотить другую. Это пространство их синтеза. Модернизм дает нам технологический фундамент и этическую опору, а постмодернизм – гибкость и иммунитет к догматизму. Вероятно, ключевой характеристикой культуры будущего станет не победа одной из парадигм, а их кураторское сопряжение в рамках новой реальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблема соотношения модернизма и постмодернизма // StudFiles: [сайт}. – URL: https://studfile.net/preview/2622948/page:2/ (дата обращения: 28.03.2026)

2. Соловьев, В.М. Культурология: учебник для вузов. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2019. – 616 с.

3. PSYERA: сайт. – URL: https://psyera.ru/osobennosti-kultury-epohi-informacionnyh-tehnologiy_13775.htm (дата обращения 03.04.2026)

4. Багновская, Н.М. Культурология: Учебник. – Москва: Дашков и К°, 2014. – 420 с.

5. Студенческий научный форум – 2016: VIII Международная студенческая научная конференция. – URL: https://scienceforum.ru/2016/article/2016028314 (дата обращения: 28.03.2026)

УДК 728.1.012.1

ТРАДИЦИОННАЯ КВАРТАЛЬНАЯ ЗАСТРОЙКА VS МОДЕРНИСТСКИЙ ХАОС

М.Л. Клюкина

Научный руководитель – **Д.А. Турбин**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается конфликт принципов классической и модернистской застройки на основе проекта жилого комплекса в городе Ярославль, создание «живой» традиционной архитектуры, сравнительный анализ архитектурных решений.

Ключевые слова: *традиционная архитектура, модернизм, композиция*

TRADITIONAL RESIDENTIAL BUILDINGS VS MODERNIST CHAOS

M.L. Klyukina

Scientific Supervisor – **D.A. Turbin,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The conflict of principles of classical and modernist building based on the project of a residential complex in the Yaroslavl, the creation of a «living» traditional architecture and a comparative analysis of the architectural solution are considered.

Keywords: *traditional architecture, modernism, composition*

В течение продолжительного времени городская среда формировалась под влиянием принципов модернистской архитектуры, которые являются полной противоположностью классического подхода к формированию городского пространства и архитектуры, в частности.

Градостроительство.

Приватное и публичное VS «общее»

По принципам традиционной архитектуры здание должно отделять публичное пространство улицы от пространства двора, сохраняя его приватность и изолированность. Важно соблюдать правило застройки по красной линии, максимально «прижавшись» к публичному пространству, тем самым: подчеркнув его границу и заодно максимизировав территорию двора. Разделение также усиливается отсутствием разрывов во фронте здания, чтобы избежать перетекания улицы во двор. При этом обязательно должна оставаться техническая возможность въехать во двор (арка). В модернистской застройке наоборот создается «общее» пространство. Разделение частного и публичного зачастую отсутствует и условно выполняется «мелким» благоустройством.

Пространственная эмпатия традиции VS пространственное безразличие модернизма.

Существующая застройка территории, как и в целом подавляющий объем модернистской архитектуры, равнодушен к акцентированию углов перекрестков.

Классическая архитектура напротив аккуратно встраивается в городскую ткань, соблюдая узловые точки и композиционные акценты. В нашем проектируемом квартале углы так же не равнозначны. Главным и активным является элемент, выходящий на перекресток, остальные точки тоже закрепляются визуально, но являются уже менее выдающимися и подчиняются сложившейся иерархии (рис.1).

Рис. 1. Нежилой, но гостеприимный уличный первый этаж VS
трудная жизнь на первом этаже

В зданиях классической архитектуры на первых этажах зачастую располагались лавки, магазины и мастерские с большими витражными окнами, которые стирали четкую грань между улицей и внутренним общественным пространством. Жилые помещения на первом этаже вызывают противоречия из-за той самой близости общего и частного, жителям приходится бороться с «проникании улицы» в их приватное пространство (шум, высокая проходимость).

Архитектура

Традиционная фрактальность VS модернистская монотонность

Классический подход к проектированию развивает принципы, основанные на природных ассоциациях, заложенных в генетическом коде. «Живые» объекты — фрактальны, пропорциональны, симметричны. Именно поэтому используются приемы, проверенные тысячелетиями: пропорционирование, симметрия, иерархии, внимание к деталям (рис. 2).

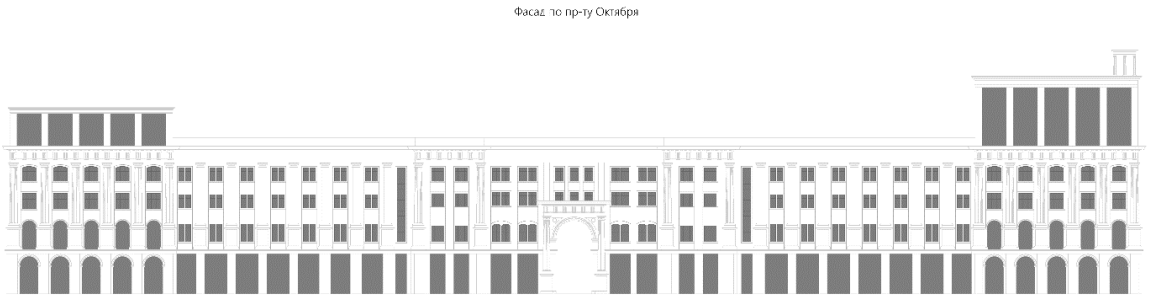


Рис. 2. Фасад по проспекту Октября

Традиционная архитектура «растет» вверх, изменяется по вертикали от этажа к этажу. Это воспринимается подсознательно как естественный объект окружающей нас среды. Модернистская архитектура, напротив, имеет вертикальный монотонный ритм, повторение внешнего вида этажей по вертикали, что «выписывает» объект из «царства» живых. Он воспринимается как несуществующий, ненастоящий из-за несоотносимости с масштабом человека.

Уличный (лицевой) фасад VS торец дома

Уличный фасад по канонам классической архитектуры всегда имел большее значение относительно дворового фасада. Здание обращено «лицом», самой выразительной частью, к улице. Также фасады служили своеобразными маркерами для определения дорог разного

значения. Оформление сторон здания отличалось в зависимости от масштаба улицы (проспект или внутриквартальный проезд). Модернизм же напротив функционально «привязывает» расположение типовой застройки, например, основываясь на ориентации по инсоляции, а не на стремлении подчеркнуть улицу.

Светотень

Сочетание света и тени создает деликатные акценты благодаря деталям, поддерживающим общую композицию фасада в традиционной архитектуре. Размер, пропорции, толщина выступающих элементов формируют фактурность и могут повлиять на восприятие здания в целом как положительно, так и отрицательно (при несоблюдении пропорций). Модернистская архитектура же придерживается минимальной детализации или совсем отказа от нее. Фасады становятся чистыми, пустыми, ощущаются безжизненными из-за отсутствия объема, создаваемого светотенью.

Окно как отдельная композиция, не противоречащая конструктивной и функциональной логике

Одна из черт классической архитектуры — это внимательность к деталям. Здание рассматривается в разных уровнях восприятия, начиная с общей формы и образа и заканчивая мелкой пластикой. Окна также являются неотъемлемой частью формирования визуального впечатления. Своим расположением, размером, пропорциями, остеклением и деталировкой рам они создают свой собственный индивидуальный облик. В последнее время оформлению окон уделяется гораздо меньшее значение. Они упрощаются и уже не являются отдельной композицией, превращаясь в типовые решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Браузеветтер, А. Архитектурные формы гражданских построек / А. Браузеветтер. – СПб.: Издание И.И. Базлова, 1904. – 230 с.

2) Михайловский, И.Б. Архитектурные формы античности / И.Б. Михайловский – 4-е изд – Москва: Издательство академии архитектуры СССР, 1949.

3) Chitham, R. The classical orders of Architecture / R.Chitham. – 2nd ed.. – Oxford, Burlington (MA): Architectural press, 2005. – 228 с. ил.

4) Киселев, И.А. Архитектурные детали в русском зодчестве XVIII-XIX веков: Справочник архитектора реставратора / И.А. Киселев. – М.: Академия, 2005. – 496 с.

5) Tzonis, A. Classical architecture. The Poetics of Order / A. Tzonis, L. Lefaivre. – Cambridge, Massachusetts, London: The MIT Press, 1986.

УДК 711.4

РЕГЕНЕРАЦИЯ ГОРОДСКИХ ПЛОЩАДЕЙ В ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ

Т.И. Клягин

Научный руководитель – **М. А. Бобович,** ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье исследуется теория и практика возрождения городских площадей в историческом контексте. В ней анализируются методы сохранения культурного наследия наряду с приспособлением исторических территорий к современным запросам. Ключевое внимание уделено принципам устойчивости, смене функции и общественных ценностей данных территорий.

Ключевые слова: *общественные пространства, регенерация, историческая застройка, урбанистика, городские площади, культурное наследие.*

REGENERATION OF URBAN SQUARES IN HISTORICAL BUILDINGS

T.I. Kalyagin

Scientific Supervisor – **M.A. Bobovich,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article examines the theory and practice of urban square regeneration in a historical context. It analyzes the methods of preserving cultural heritage along with the adaptation of historical territories to modern demands. Key attention is paid to the principles of sustainability, changing the function and social values of these territories.

Keywords*: public spaces, regeneration, historical buildings, urbanism, city squares, cultural heritage.*

Городские площади традиционно являются важнейшими элементами городской структуры, выполняя функции общественного, культурного и экономического взаимодействия. Как отмечает К. Линч, восприятие городской среды напрямую связано с ее пространственной организацией и читаемостью [4].

Однако многие исторические площади под воздействием развития городов сталкиваются с рядом проблем: транспортная перегруженность, утрата социальной значимости, изнашивание инфраструктуры и снижение функциональной активности. В связи с выделенной проблематикой возникает необходимость комплексного обновления территорий и с сохранением исторической идентичности места – регенерации.

Теоретические основы регенерации

Регенерация городских пространств представляет собой процесс обновления городской среды с сохранением ее исторической идентичности.

Согласно Дж. Джейкобс, разнообразие функций и активность городской жизни являются основой устойчивости городских пространств [3]. Я. Гейл подчеркивает важность ориентации городской среды на человека [2].

Существует ряд принципов регенерации исторических площадей:

– Адаптивное использование территории – добавление новых функций, сохраняя историческую целостность среды.

– Сбалансированность – социальная, экономическая и экологическая устойчивость внедряемых решений.

– Сохранение исторической идентичности места - учет планировочной структуры, архитектурного облика и культурных слоев.

– Ориентация на человека – пешеход на первом месте для стимуляции общественной жизни.

Таким образом регенерация становится связующим инструментом между прошлым и будущим.

Проблематика

Исторические городские площади в наше время испытывают ряд типичных проблем:

– Транспортная доминация – во многих случаях городские исторические площади используют как транспортные развязки, что снижает их общественную функцию.

Функциональная деградация – отсутствующие активные общественные функции приводят к утрате значимости и снижению посещаемости таких территорий.

Отсутствие активной уличной жизни противоречит принципам, описанным Дж. Джейкобс [2].

– Устаревание среды – износ покрытий, инженерных сетей под воздействием естественных механических действий и недостаток благоустройства территории ухудшает качество пространства.

– Высокая туристическая нагрузка – в востребованных у путешественников городах чрезмерный поток туристов приводит к «музефикации» исторических пространств и вытесняет локальную повседневную жизнь города.

Для решения обозначенных проблем необходим комплексный подход, включающий в себя объединение архитектурных, социальных и экономических мер.

Методы и подходы к регенерации исторических городских площадей

1. Ревитализация общественных функций

Ключевым направлением является возвращение общественных функций и активности [3]. Это достигается с помощью:

– Создание локальных зон отдыха и общения.
– Создания зон для проведения культурных мероприятий.
– Развитие функции торговли и общественного питания.

2. Повышение роли пешеходной доступности

Сокращение транспортного движения вместе с расширением зон, отведенных под пешеходов, повышает рост уровня безопасности и комфорта пешеходов. Создание комфортной среды, ориентированной на человека [2].

3. Благоустройство ландшафта и архитектурной среды

Включает в себя мероприятия по улучшению среды: обновление мощения, организация озеленения пространств, обновление малых архитектурных форм, а также модернизация уличного освещения.

4. Внедрение современных технологий

Интеграция современных технологий в сферах освещения, навигации и регулирования потоков предоставляет возможность эффективного использования пространства.

5. Вовлечение граждан

Формирование устойчивых решений невозможно без участия граждан.

Международный опыт

Зарубежная практика показывает множество вариантов обновления исторических городских площадей. В Европе часто используется концепция «sharedspace» - совместное передвижение транспорта и пешехода, где преимущество отдается вторым.

В некоторых случаях на центральных площадях приоритет отдается полностью пешеходам, что способствует оживлению городской жизни и привлечения туристов.

Согласно Венецианской хартии, вмешательство в историческую среду должно быть минимальным и обоснованным [5].

Равновесие между сохранением и развитием

А. Росси рассматривает город как исторический организм, требующий бережного отношения [6]. Одной из основных задач является соблюдения баланса между сохранением исторической среды и необходимостью модернизации. Излишнее вмешательство может

разрушить подлинность места и привести к его деградации, а полное бездействие к его упадку.

Оптимальный подход заключается в:

– локальном вмешательстве (минимальном).

– использование материалов, которые не вступают в диссонанс с исторической средой.

– фиксация и поддержание значимых визуальных параметров и пространственных свойств для сохранения уникальности места.

Социально-экономические эффекты

Возрождение городских площадей в исторической застройке оказывает сильное воздействие на жизнь города:

– улучшает уровень качества жизни горожан.

– стимулирует развитие небольших предпринимательских инициатив.

– способствует укреплению локальной идентичности и чувства общности.

– Увеличивает интерес в глазах туристов.

Из этого следует, подобные проекты ценны не только с архитектурной точки зрения, но и с выраженной социально-экономической значимостью. И как отмечает П. Холл, общественные пространства играют ключевую роль в развитии городов [7].

Регенерация городских площадей в исторической части города – это сложная задача и многогранный процесс, требующий междисциплинарного подхода. Для достижения успешных результатов в проектах такого типа необходимо придерживаться принципа одновременного учета историко-культурного контекста, общественных запросов в современного общества и принципов устойчивого развития.

В долгосрочной перспективе такие пространства будут все более востребованны ввиду их ключевой роли в формировании комфортной и уникальной городской среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Бочаров, Ю.П. Градостроительство и теория городской среды / Ю.П. Бочаров, О.К. Кудрявцев. – М.: Стройиздат, 2004. – 340 с.

2) Джейкобс, Дж. Смерть и жизнь больших американских городов. – Нью-Йорк: Random House, 1961. – 458 с.

3) Лавров, В.А. Реконструкция исторических городов. – М. : Архитектура-С, 2008. – 256 с.

4) Линч, К. Образ города. – Кембридж: MIT Press, 1960. – 194 с.

5) Международная хартия по охране и реставрации памятников и достопримечательных мест (Венецианская хартия) / ICOMOS. – Венеция. – URL: https://docs.cntd.ru/document/901756982?ysclid=mqjfoziof666736521

6) Росси, А. Архитектура города. – Падуя: Marsilio, 1966. – 203 с.

7) Холл, П. Города в цивилизации. – Лондон: Weidenfeld&Nicolson, 1998. – 1169 с.

УДК 711

АРХИТЕКТУРА ТИШИНЫ: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЕРАРХИЯ И АКУСТИЧЕСКИЙ КОМФОРТ ПО КРИСТОФЕРУ АЛЕКСАНДЕРУ

И.А. Корнев

Научный руководитель – **С.А. Буров**, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются методы проектирования городской среды, в которой иерархия пространств Кристофера Александера служит основой для формирования акустического комфорта. Работа обосновывает применение вертикального зонирования и «активной коры» фасадов как эффективных инструментов защиты приватных зон от городского шума без потери связи с общественной жизнью.

Ключевые слова: *градостроительство, квартал, структура, пространство*

THE ARCHITECTURE OF SILENCE: SPATIAL HIERARCHY AND ACOUSTIC COMFORT BY CHRISTOPHER ALEXANDER

I.A. Kornev

Scientific Supervisor – **S.A. Burov**, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the methods of designing an urban environment in which Christopher Alexander's hierarchy of spaces serves as the basis for the formation of acoustic comfort. The work substantiates the use of vertical zoning and the "active crust" of facades as effective tools for protecting private areas from urban noise without losing touch with public life.

Keywords: urban planning, quarter, structure, space

В современном урбанистическом споре часто возникает ложное противопоставление: город либо «живой и шумный», либо «тихий и спальный». Однако живая городская среда — это не хаос звуков, а сложная партитура, где каждый инструмент имеет свое место и время. Опираясь на методологию Кристофера Александера, мы можем спроектировать пространство, которое не подавляет активность ради тишины, а грамотно разграничивает.

1. Градация публичности: от площади до спальни

Фундаментальный принцип «живого» квартала — это строгая иерархия пространств по степени их открытости. Александер настаивает на том, что среда должна быть выстроена как последовательный переход:

Публичное ядро: Главная площадь, где концентрируются кафе, бары и активная ночная жизнь.

Полу-публичные зоны: Пешеходные артерии, ведущие к площади, наполненные торговой активностью.

Полу-приватные территории: Внутренние дворы жилых кластеров, предназначенные для соседей, детских игр и тихого отдыха.

Приватные зоны: непосредственно жилые помещения, защищенные от внешнего мира.

Такая структура позволяет локализовать шумную активность в одной точке, предотвращая её «расползание» по всему кварталу.

2. Локализация «очагов активности»

Вместо того чтобы бороться с ночной жизнью, архитектура должна её «якорить». Шаблон «Ночная жизнь» (№31) указывает на необходимость концентрации увеселительных заведений на главной площади. Это создает «критическую массу веселья» в одном месте, оставляя остальные участки квартала спокойными.

Важно, чтобы такие очаги были четко очерчены границами зданий, создавая эффект «комнаты», которая удерживает звук внутри своего периметра.

3. Вертикальное зонирование и акустические буферы

Когда мы проектируем здания, выходящие фасадами на шумную площадь, в игру вступает шаблон «Градация интимности» (№127). Мы не можем просто разместить спальни над баром. Решение кроется в функциональном «пироге»: Первый этаж: Шумная коммерция (бары, рестораны, клубы). Второй этаж: Буферная зона — офисы, студии или творческие мастерские, для которых дневной шум площади не критичен. Третий этаж и выше: Жилые пространства.

Дополнительным техническим барьером выступают «Толстые стены» (№249). Повышенная звукоизоляция фасадов, выходящих на активные улицы, — это не роскошь, а архитектурный инструмент, позволяющий жителю наслаждаться видом на оживленный город, оставаясь в абсолютной тишине.

4. Естественное наблюдение без потери приватности

Интересный парадокс Александера заключается в паттерне «Уличные окна» (№164). Жилые окна не должны быть глухими или полностью отгороженными. Визуальная связь с улицей обеспечивает «естественное наблюдение» и чувство безопасности. Защита от шума здесь достигается не за счет изоляции человека от общества, а за счет дистанции (высоты этажа) и качественных материалов.

5. Гибридные пространства как фильтры

Кафе выступают идеальным адаптивным буфером. Днем это места для спокойных встреч и семейных обедов, а вечером они плавно трансформируются, меняя освещение и музыку, становясь частью вечернего сценария площади. Они служат мягким переходом между тихими зонами и эпицентрами ночной активности.

В качестве примера рассмотрим несколько проектов градостроительного планирования квартала:

1. Pancras Square Эрика Парри. Несмотря на тектоническую выразительность, проект наглядно иллюстрирует системные проблемы современной джентрификации. В нарушение градостроительных принципов Камилло Зитте, здание не формирует уютного «интерьера под открытым небом», так как избыточные разрывы между блоками превращают площадь в продуваемый транзитный коридор, подавляющий пешехода своим масштабом. Эффект «мертвых глаз» усиливает это отчуждение: после окончания рабочего дня унифицированные офисные этажи превращаются в безжизненную темную скалу, лишая пространство естественного наблюдения и ощущения безопасности.

Психоакустический комфорт также принесен в жертву эстетике, поскольку использование кортеновской стали и стекла вместо пористых материалов создает резкое металлическое эхо, превращающее площадь в резонатор для городского шума. В конечном итоге «объектный» подход и экзоскелет здания подчеркивают его изоляцию от городской ткани. Вместо мягкой интеграции в среду 4 Pancras Square остается самодостаточной элитарной скульптурой, где горожанин чувствует себя не хозяином улицы, а временным гостем под прицелом камер наблюдения.

2. Реновация Erni-Areal в Швейцарии демонстрирует, как пористая структура превращает индустриальный блок в живой городской нерв через систему пространственных фильтров и градацию интимности. Соразмерность человеку здесь обеспечивается дробным ритмом фасадов и «активной корой» партера, где мастерские наполняют среду жизнью и безопасностью. Тектонические решения создают эффект акустического щита, защищая жилые уровни от шума за счет грамотного вертикального зонирования. Однако избыточная проницаемость несет риск превращения квартала в безликий транзитный коридор, где высокая проходимость размывает приватные границы и превращает жилую среду в транзитное «не-место». Поиск баланса между открытостью и защищенностью остается критическим условием жизнеспособности такого пространства.

3. Проект в Ярославле трансформирует закрытый «стадионный» массив, который ранее выпадал из городской ткани, в открытую и функциональную систему.

В основе планировки лежит каскадная иерархия публичности. Внешний контур вдоль улиц сохраняет высокую активность, в то время как новые внутренние проходы служат «фильтрами», отсекающими шум.

Здания периметра проектируются как акустический щит:

1. Первые этажи с аркадами принимают на себя коммерческую нагрузку и уличный гул.

2. Жилые блоки, поднятые над землей, получают дистанцию от суеты, сохраняя визуальную связь с городом.

3. Внутренние дворы становятся финальной точкой приватности, полностью защищенной массой застройки.

Вместо монолитного объекта протяженностью в сотни метров, проект предлагает сетку объемов, соразмерных человеку. Разделение мега-квартала на мелкие части меняет психологию движения: путь через территорию перестает быть утомительным. Благодаря точкам выбора и визуальным акцентам каждые 50–70 метров, транзит превращается в комфортную прогулку. Джейкобс в своей книге «Великие улицы» подчеркивает важность частых входов и смены архитектурных решений.

Проект «сшивает» ранее разорванные направления улиц Свердлова и Пушкина. Новые пешеходные связи работают как гибридные пространства для выставок, кафе и малых площадей.

Такая проницаемость избавляет территорию от статуса «закрытой зоны», создавая инклюзивную среду. Сочетание тихих жилых дворов и активных общественных улиц обеспечивает жизнеспособность архитектуры и её востребованность у всех групп горожан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Александер, К. Язык шаблонов. Города. Здания. Строительство / пер. с англ. И. Савосиной. – М.: Издательство Студии Артемия Лебедева, 2014. – 1104 с.

2) Зитте, К. Художественные основы градостроительства: пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1993. – 255 с.

3) Джейкобс, А.Б. Великие улицы: пер. с англ. – М.: Искусство – XXI век, 2013. – 376 с.

4) Джекобс, Дж. Смерть и жизнь больших американских городов: пер. с англ. – М.: Новое издательство, 2011. – 460 с.

УДК 72.01:711.4(211)

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

В.А. Корочкина

Научный руководитель – **М.Н. Кудряшов**, канд. искусствоведения

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена основным принципам проектирования в Арктической зоне на примере разработки дипломного проекта «Многофункциональный центр в городе Кола».

Ключевые слова: *арктическая зона, проектирование, экстремальные условия*

DESIGN PRINCIPLES FOR THE ARCTIC ZONE

V.A. Korochkina

Scientific Supervisor – **M.N. Kudryashov**, Candidate of Art Criticism

Yaroslavl State Technical University

The article is dedicated to the main principles of design in the Arctic zone, using the development of the diploma project "Multifunctional Center in the city of Kola" as an example.

Keywords: *Arctic zone, design, extreme conditions*

Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) является стратегическим приоритетом государственной политики, что актуализирует проблему создания качественной архитектурной среды в экстремальных климатических условиях (рис. 1). Однако существующая практика проектирования объектов в Арктике зачастую основывается на типовых решениях, разработанных для умеренного климата, что приводит к низкой энергоэффективности, быстрому износу конструкций и психофизиологическому дискомфорту населения. Целью исследования является систематизация современных подходов к архитектурному проектированию в Арктике, которые учитывают экстремальные климатические факторы, экологические ограничения и антропогенные потребности.

Арктика представляет собой уникальный и одновременно экстремальный контекст для архитектурной деятельности. В последние десятилетия освоение Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) приобрело стратегическое значение, что нашло отражение в Указе Президента Российской Федерации от 26.10.2020г. №645 «О стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года». Однако, как отмечают исследователи, «архитектурная среда арктических городов не обеспечивает комфортного повседневного взаимодействия (физического и эмоционального) граждан с природной и искусственной средой». В отличие от поселений других полярных стран, российские арктические города представляют собой уникальный феномен — продукт советского периода колониальной урбанизации, где модернистские утопические идеи, трансформированные под влиянием городского мейнстрима, во многом определяют настоящее и будущее арктической архитектуры.

Современная архитектура в Арктике вынуждена решать комплекс взаимосвязанных задач: обеспечение конструктивной надежности в условиях экстремальных нагрузок, минимизация энергопотребления, создание комфортной среды для человека в условиях полярной ночи и ограниченного доступа к природе, а также сохранение хрупкой экосистемы региона. Как подчеркивается в современной литературе, «архитектура в Арктике — это не только техническая задача, но и социальная и культурная. Инклюзивные практики

проектирования учитывают местный образ жизни, традиционные знания и коренные традиции народов Севера».

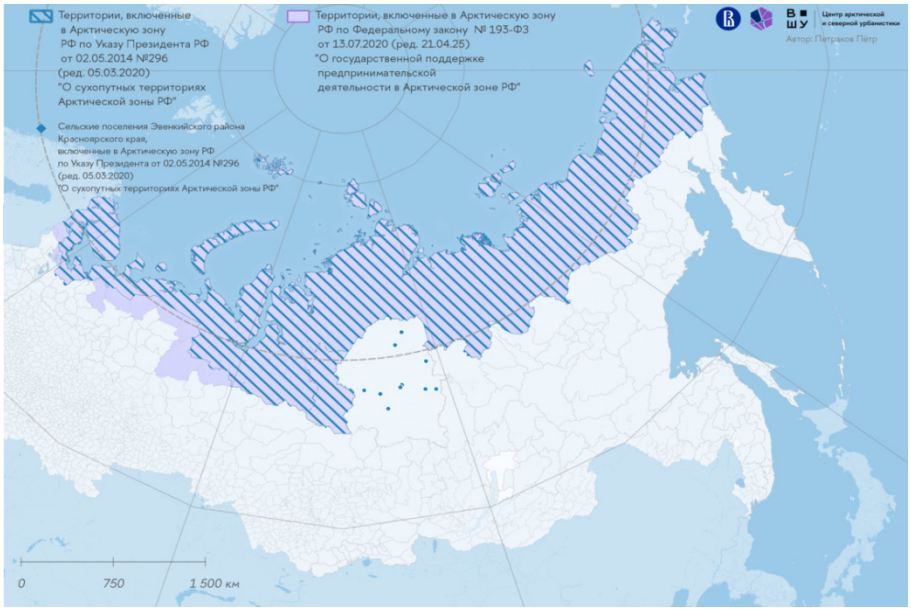


Рис. 1. Карта Арктической зоны РФ

На примере своего дипломного проекта я разберу принципы и особенности проектирования в Арктической зоне.

Территория проектирования располагается на мысе Умбыш в городе Кола. Кола - это административный центр Кольского района Мурманской области, Город является историческим центром Кольского полуострова и городом-спутником Мурманска.

Климатические условия Арктики достаточно специфические и характеризуются как экстремально суровые. В этих районах очень долгая, морозная зима и короткое, холодное лето. Неотъемлемой частью природы являются такие явления как полярные день и ночь. Более 70% годового объема осадков выпадает в виде снега и приходится на холодный период: с октября по апрель. Для этих территорий характерны сильные, устойчивые ветры и частые метели. Грунт в арктической зоне промерз на большую глубину и никогда не оттаивает.

Главной задачей при проектировании объектов в Артике является не только защита человека от экстремального климата, но и создание психологически комфортной среды в условиях вечной мерзлоты и полярной ночи.

Рис. 2. Предварительный рендер многофункционального центра в городе Кола

Главным при проектировании объектов в Арктике является принцип моноцентра – здания объединяют в комплексы. При проектировании зданий и сооружений необходимо минимизировать прямое взаимодействие человека с внешней средой. Для этого могут быть предусмотрены крытые переходы и галереи. Аналогичным решением является создание многофункциональных комплексов, попадая в которые человек может решать жизненно важные вопросы и закрывать свои потребности в одном здании. Именно этот подход был выбран для разработки объёмно-планировочного решения многофункционального центра в городе Кола, который сочетает в себе государственные сервисы, общественные и образовательные функции, а также коммерцию и ресторан.

Немаловажным аспектом является форма здания – он должна быть аэродинамически устойчивой. Для Арктики более благоприятными будут являться обтекаемые формы. Скруглённые углы и плавные фасады снижают ветровую нагрузку и препятствуют образованию снежных заносов. Так же стоит отметить, что предпочтительны невысокие здания и ступенчатая этажность, исключающая резкие перепад высот в наветренной части. Это всё необходимо для повышения ветроустойчивости здания.

Для архитектуры в зоне экстремальных световых условий критически важным является световое проектирование. Для улавливания солнечного света большие окна располагают на южной стороне здания. Для распределения света вглубь - применяются атриумы и световые колодцы. В качестве дополнительного освещения проектируются мансардные окна и зенитные фонари. При выборе остекления отдают преимущество стёклам с изменяемой прозрачностью. Температура света также играет очень важную роль. Необходимо использовать более тёплые оттенки (2700–300 К). Рекомендуется использовать системы искусственного освещения с имитацией естественного светового цикла. Всё это позволит создать максимально благоприятную среду для человека в условиях полярных дня и ночи. В своём проекте для дополнительного освещения я применяю световые колодцы в башнях и зенитные фонари на кровле многоугольного объёма. Помимо этого, большая часть здания выполнена панорамным остеклением, которое сверху прикрывается перфорированными панелями либо ламелями.

Говоря про свет, не стоит так же забывать про цвет. В зимний период арктический ландшафт преимущественно монотонен – преобладают белый (снег) и серый (каменистые породы) цвета. Тёплые оттенки фасадов помогают разнообразить визуальную среду и улучшить психологическое состояние жителей. Яркие цвета зданий облегчают навигацию, особенно в условиях метели или плохой видимости. Это особенно важно для небольших населённых пунктов, где дома расположены близко друг к другу. Тёплые цвета (жёлтый, красный, оранжевый) подсознательно ассоциируются с солнцем и теплом, что помогает смягчить ощущение холода и изоляции. Контрастные акценты могут стимулировать внимание и поднимать настроение.

В Арктике в настоящее время активно развивается модульное строительство, благодаря этому решаются задача быстрого возведения объектов в экстремальных условиях. Такие конструкции адаптированы к суровому климату, вечной мерзлоте, коротким строительным сезонам и логистическим сложностям. Они используются для создания жилых комплексов, научных станций, туристических баз, военных городков и объектов инфраструктуры. Готовые модули изготавливаются в заводских условиях, что сокращает сроки строительства в несколько раз по сравнению с традиционными методами. Это особенно важно в условиях ограниченного строительного сезона в Арктике. Модули проектируются с учётом минимизации теплопотерь: используются современные утеплители, герметичные стыки, аэродинамические формы. Заводская готовность и высокая точность изготовления уменьшают риски, связанные с ошибками на строительной площадке. Модули можно комбинировать, расширять комплекс, менять планировку внутри модулей в зависимости от задач.

И наконец, стоит отметить важность традиций и контекста Арктики. Архитектурные формы могут отсылать нас к образам ледяных глыб, торосов, снежных массивов и

традиционных жилищ. Важно помнить и учитывать местную культуру и природные особенности. Прообразом здания, представленного в моем проекте стали шаманский бубен и жилище местного народа саамов – кувакса. На фасадах и в мощении используются орнаменты саамской вышивки. Всё это способствует сохранению культурной идентичности через архитектурные решения.

Архитектура в арктической зоне требует комплексного подхода, сочетающего инженерные инновации, энергоэффективность и экологическую ответственность. Современные технологии позволяют создавать комфортные и устойчивые поселения даже в экстремальных условиях.

Успешное освоение арктических территорий невозможно без дальнейшего развития специализированных архитектурных подходов. Будущее арктической архитектуры лежит в интеграции передовых технологий, принципов устойчивого развития и глубокого понимания местных природных и культурных особенностей. Это позволит создавать поселения, которые не только защищают человека от суровой среды, но и обеспечивают высокое качество жизни в одном из самых экстремальных регионов планеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Болотова, А.А. «Если ты полюбишь Север, не разлюбишь никогда»: взаимодействие с природой в северных промышленных городах // Неприкосновенный запас. Дебаты о политике и культуре. – 2014. – № 5. – С. 170–188.

2) Замятина, Н.Ю. Город в пустоте. Урбанизация и Арктика / Н. Ю. Замятина; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Издат. дом Высшей школы экономики, 2025. – 456 с.

3) Яновская, Ю.С. Арктика. Проблемы и перспективы градостроительного развития и формирования комфортной среды / Ю.С. Яновская, А.В. Меренков // Архитектон. Известия вузов. – 2023. – Т. 83, № 3. – URL: https://archvuz.ru/2023_3/18/

4) Tekin, B.H. A Conceptual Framework for Biophilic Architectural Design in Cold Climates: A Meta-Synthesis Analysis / B.H. Tekin, M.A. Aktog // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 21. – P. 3825. DOI: 10.3390/buildings15213825.

5) Zolotova, M. Beyond the physical: conceptual model of intangible comfort in Russian Arctic cities // New Design Ideas. – 2025. – Vol. 9, № 1. – P. 77–101.

УДК 72.01:504

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА В СЕВЕРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ

Д.Д. Кочетова

Научный руководитель - **С.В. Расторгуев**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Исследуются особенности архитектурно-строительной деятельности в районах с экстремальными климатическими условиями. Рассматриваются ключевые ограничения, связанные с наличием многолетнемерзлых грунтов, низкими температурами, ветровыми воздействиями и удаленностью территорий. На основе анализа инженерной практики и нормативной базы раскрываются современные подходы к проектированию зданий и городской среды в северных регионах. Обосновываются направления повышения надежности конструкций, энергоэффективности и устойчивости застройки.

***Ключевые слова**: арктическое строительство, строительные технологии Севера, архитектура экстремальных условий, снеговые нагрузки.*

TOPICAL PROBLEMS OF CONSTRUCTION IN NORTHERN CLIMATIC CONDITIONS AND MODERN APPROACHES TO THEIR SOLUTION

D.D. Kochetova

Scientific Supervisor – **S.V. Rastorguev**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article explores the features of architectural and construction activities in areas with extreme climatic conditions. The article discusses key limitations associated with permafrost, low temperatures, wind exposure, and the remoteness of the territories. Based on an analysis of engineering practices and regulatory frameworks, the article presents modern approaches to the design of buildings and urban environments in northern regions. The article also highlights the importance of improving the reliability, energy efficiency, and sustainability of construction projects in the Arctic.

Keywords: Arctic construction, Northern construction technologies, extreme environment architecture, and snow loads

Аннотация

В статье рассмотрены актуальные проблемы архитектурной деятельности, градостроительства и строительства в условиях сурового северного климата. Рассматриваются ключевые ограничения, связанные с наличием многолетнемерзлых грунтов, низкими температурами, ветровыми воздействиями и удаленностью территорий. На основе анализа инженерной практики и нормативной базы раскрываются современные подходы к проектированию зданий и городской среды в северных регионах. Обосновываются направления повышения надежности конструкций, энергоэффективности и устойчивости застройки.

Введение

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к освоению северных территорий, что обусловлено как экономическими, так и геополитическими факторами. Однако экстремальные природные условия существенно ограничивают применение традиционных строительных подходов.

Северный климат формирует уникальную среду, в которой архитектурные и инженерные решения должны учитывать не только физические параметры окружающей среды, но и долговременную динамику природных процессов. Особую сложность

представляет взаимодействие зданий с многолетнемерзлыми грунтами, чувствительными к тепловым воздействиям.

Таким образом, современное строительство в северных широтах требует пересмотра классических принципов проектирования и внедрения специализированных технологий.

Влияние природных факторов на строительную деятельность

Особенности мерзлых грунтов:

Многолетнемерзлые грунты отличаются тем, что их структура содержит лед, выполняющий функцию связующего элемента. При изменении температурного режима лед переходит в жидкое состояние, что приводит к резкому снижению прочностных характеристик основания.

Данный процесс сопровождается:

1) Неравномерной осадкой сооружений;
2) Появлением трещин в конструкциях;
3) Деформацией инженерных коммуникаций.

Важно подчеркнуть, что источником тепла может выступать не только климат, но и само здание, что делает задачу проектирования особенно сложной.

Температурный режим и его последствия:

Экстремально низкие температуры оказывают комплексное воздействие на строительные материалы, в частности:

1) Металлические конструкции становятся более чувствительными к ударным нагрузкам;
2) Бетон требует специальных составов и режимов твердения;
3) Соединительные элементы теряют пластичность.

Дополнительной проблемой являются циклические температурные колебания, вызывающие усталостные разрушения.

Ветровое воздействие и снегоперенос:

Для северных регионов характерны интенсивные ветровые потоки, формирующие специфические условия эксплуатации зданий. Перенос снега приводит к неравномерной нагрузке на кровлю и образованию заносов, затрудняющих доступ к зданиям.

В связи с этим возрастает роль аэродинамики архитектурных форм и грамотного размещения объектов в структуре застройки.

Специфика строительных процессов

В условиях низких температур выполнение ряда технологических операций становится затруднительным. Например, бетонирование требует применения методов искусственного прогрева, а монтажные работы осложняются из-за обледенения и ветровых нагрузок.

Таким образом, повышается значение индустриальных методов строительства, позволяющих минимизировать объем работ на площадке.

Архитектурные и градостроительные аспекты

Пространственная организация застройки:

Формирование городской среды в северных условиях предполагает учет климатических факторов на уровне планировочной структуры. Компактное размещение зданий позволяет снизить влияние ветра и сократить теплопотери.

Влияние светового режима на архитектуру:

Длительные периоды недостатка естественного освещения требуют применения специальных архитектурных приемов. Это включает оптимизацию ориентации зданий, использование отражающих поверхностей и внедрение систем искусственного освещения, адаптированных к биоритмам человека.

Формирование комфортной среды проживания:

В условиях климатической изоляции возрастает значение внутренней инфраструктуры зданий. Распространение получают решения, предусматривающие объединение различных функций в пределах одного комплекса.

Современные инженерные решения

Одним из наиболее эффективных подходов является отделение здания от грунта. Это достигается за счет использования свайных фундаментов, обеспечивающих минимальное тепловое воздействие (рис. 1).

Рис. 1. Виды свайного фундамента

Для предотвращения деградации мерзлоты применяются специальные устройства — термостабилизаторы. Их работа основана на переносе тепла из грунта в атмосферу в холодный период (рис. 2).

Рис. 2. Термостабилизаторы грунта

Применение модульных технологий позволяет существенно сократить сроки строительства и повысить качество работ. Перенос основных операций в заводские условия снижает зависимость от климатических факторов (рис. 3).

Рис. 3. Модульное строительство

Экологические вызовы и перспективы развития

Современные климатические изменения оказывают значительное влияние на состояние северных территорий. Таяние мерзлоты приводит к трансформации ландшафтов и создает дополнительные риски для инфраструктуры.

В этих условиях особую актуальность приобретают:

1) адаптивные проектные решения;
2) мониторинг состояния грунтов;
3) внедрение принципов устойчивого развития.

Заключение

Анализ показывает, что строительство в северных регионах требует принципиально иного подхода по сравнению с умеренными широтами. Основные сложности связаны с нестабильностью грунтов, экстремальными температурами и ограниченностью ресурсов.

Эффективное решение данных задач возможно только при комплексном учете природных и инженерных факторов, а также при использовании современных технологий. Перспективы развития отрасли связаны с повышением устойчивости зданий и адаптацией к изменяющимся климатическим условиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.

2) СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.

3) Andersland, O.B. Frozen Ground Engineering / O.B. Andersland, B. Ladanyi. – Chichester: Wiley, 2004. – 364 c.

4) Assessment of climate chang impacts on bulding, structures and infrastructure in Russian redgions on permafrost / D.A. Streletskiy [et al.] // Environmental Reserch Letters. – 2019. – Vol. 14, no. 2. – P. 25003.

УДК 72.025.4

АРХИТЕКТУРА ОТСУТСТВИЯ: МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ УТРАЧЕННОГО САКРАЛЬНОГО НАСЛЕДИЯ

Д.Е. Крюкова

Научный руководитель - **Н.В. Хомутова**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена современным способам осмысления утраченного сакрального архитектурного наследия. Рассматривается концепция архитектуры отсутствия и основные методы визуализации: цифровая реконструкция, дополненная реальность и архитектурный фантом, как средства сохранения культурной памяти.

Ключевые слова: *архитектурное наследие, храмы, память места, призрачная архитектура, цифровая реконструкция, утраченные памятники*

ARCHITECTURE OF ABSENCE: METHODS OF VISUALIZATION OF THE LOST SACRED HERITAGE

D.E. Kryukova

Scientific Supervisor - **N.V. Khomutova,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article is devoted to modern ways of thinking about the lost sacred architectural heritage. It discusses the concept of architecture of absence and the main methods of visualization: digital reconstruction, augmented reality, and architectural phantom, as means of preserving cultural memory.

Keywords*: architectural heritage, temples, place memory, ghostly architecture, and digital reconstruction, lost monuments*

Раньше во многих городах и деревнях стояли храмы, церкви и монастыри. Со временем часть из них исчезла, однако память о них сохранилась. Утрата отдельных памятников архитектуры стала значительной проблемой для сохранения культурного наследия, так как вместе с физическим исчезновением зданий утрачивается часть исторической и духовной среды. В связи с этим возникает необходимость поиска новых способов осмысления и представления утраченных объектов в современном пространстве.

На первый план выходит идея архитектуры отсутствия - подход, направленный не на физическое восстановление утраченного храма, а на воссоздание и сохранение памяти о нём, его образа, местоположения и значения в культурном и историческом контексте.

Архитектура отсутствия представляет собой способ визуализации здания, которое уже не существует в реальности. В данном случае внимание сосредоточено не на самом объекте, а на его образе - том, каким он был, где находился и какой след он оставил в памяти людей. Таким образом, речь идёт не о физическом восстановлении утраченного храма, а о воссоздании и сохранении памяти о нём в культурном и историческом контексте. На сегодняшний день условно работу с призрачной архитектурой можно разделить на три направления:

1. Цифровая реконструкция

Одним из самых распространённых и наглядных способов визуализации утраченной архитектуры является создание трёхмерной цифровой модели. Этот процесс основан на использовании архивных материалов – фотографий, чертежей, планов, описаний, картин и других источников, которые специалисты анализируют, чтобы максимально точно

воссоздать внешний облик и интерьер здания. Технологии включают 3D-моделирование, лазерное сканирование и интеграцию данных в виртуальные среды.

В результате получается детальная цифровая модель, которую можно рассматривать с разных сторон, а иногда и виртуально «посещать» – перемещаться внутри и вокруг неё, как в интерактивной экскурсии. При этом цифровая реконструкция не ограничивается только экранными форматами или музейными экспозициями: она также может реализовываться в виде 3D-проекций на реальные объекты, дополненной и виртуальной реальности, а также мультимедийных инсталляций в городском пространстве.

Такие реконструкции широко используются в музейных экспозициях, образовательных проектах, онлайн-ресурсах и публичных показах.

Примеры.

В Музее Москвы была представлена выставка, где по архивным материалам воссоздали 3D-модели утраченных зданий Китай-города - исторического квартала столицы, разрушенного в 1930-х годах (рис. 1).

Рис. 1. Архитектурный макет комплекса зданий в традиционном стиле с башнями и куполами

Проект по цифровой реконструкции домов Помпеи позволяет посетителям на экране увидеть, как выглядели интерьеры древнеримской городской застройки до извержения Везувия (рис. 2).

Рис. 2. До и после реставрации внутреннего дворика

Цифровые модели не только визуализируют исчезнувшие сооружения, но и помогают исследователям глубже понять архитектурные решения, социокультурные аспекты и

исторический контекст объектов. Они становятся виртуальной памятью места, которую можно сохранить, анализировать и демонстрировать будущим поколениям.

2. Дополненная реальность (AR)

Метод дополненной реальности является более современным и интерактивным способом визуализации утраченной архитектуры. С его помощью человек с помощью смартфона, планшета или AR-очков может направить камеру на пустое пространство и увидеть на экране, как в прошлом выглядело это место - например, где стоял храм, монастырь или исторический дом. В реальности объект отсутствует, однако цифровое отображение создаёт эффект его «возвращения» в пространство.

AR позволяет объединить современную среду с историческими объектами, делая восприятие прошлого наглядным и понятным. Пользователь может не только увидеть реконструированное здание, но и перемещаться вокруг него, изменять угол обзора, изучать детали фасадов и интерьеров. Такой подход помогает создать сильный эмоциональный эффект и глубокое понимание исторического контекста.

Примеры применения AR:

В Москве разработано приложение «Архитектура исчезнувшего города», которое позволяет на улицах исторического центра видеть исчезнувшие церкви и особняки, совмещённые с современным городским пространством (рис. 3)

.

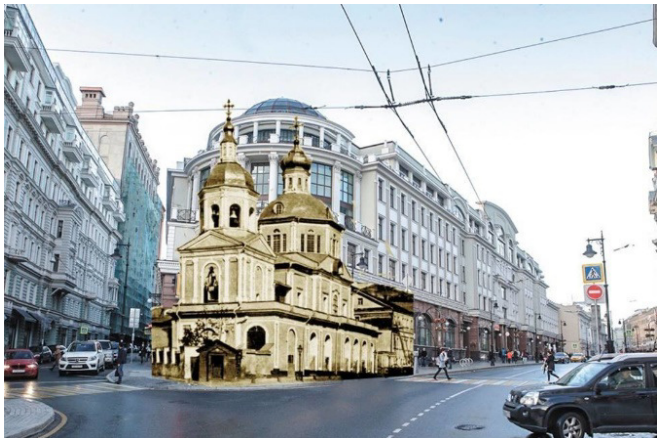


Рис. 3. Храм на городской улице

В США проект «Augmented Antiquity» позволяет туристам на месте археологических раскопок, например в Помпее, видеть виртуальные версии древнеримских домов, улиц и храмов, интегрированные в современные остатки зданий (рис. 4).

Рис. 4. Реконструкция античного храма на экране планшета

Преимущества AR:

- позволяет «оживить» пустое пространство без физического восстановления зданий.
- увеличивает вовлечённость аудитории и образовательный эффект.
- создаёт интерактивный опыт для музеев, туристических маршрутов и исторических

3. Архитектурный фантом

Метод архитектурного фантома предполагает создание на месте утраченного памятника прозрачного или проницаемого объёма, который полностью повторяет силуэт исчезнувшего здания. В отличие от цифровой реконструкции или AR, здесь не воссоздаётся детальный облик здания.

Такой подход позволяет зрителю ощутить масштабы и форму утраченной архитектуры, одновременно подчёркивая её отсутствие. Прозрачные конструкции могут быть выполнены из стекла, сетки, лёгких металлов или других полупрозрачных материалов, создавая эффект невесомости и призрачности.

Одним из наиболее близких по художественному приёму проектов является работа Эдоардо Тресольди – Basilica di Siponto Reconstruction, где утраченная базилика была воссоздана в виде прозрачной конструкции из металлической сетки. Этот проект стал одним из ключевых примеров современной «архитектуры отсутствия», так как точно передаёт форму храма, сохраняя при этом ощущение его нематериальности (рис. 5).

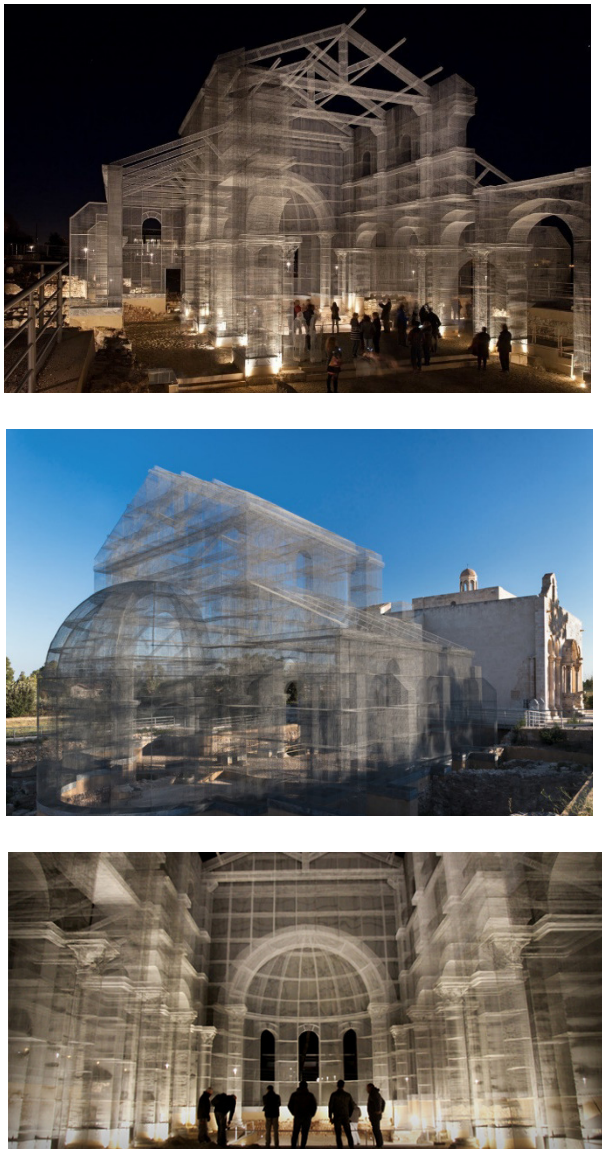


Рис. 5. Архитектурная инсталляция: прозрачная реконструкция

Ещё одним показательным примером является инсталляция Etherea, созданная Эдоардо Тресольди. Объект представляет собой масштабную архитектурную композицию, напоминающую классический храм с куполом и колоннами, выполненную из металлической сетки (рис. 6).

Конструкция не воспроизводит конкретное историческое здание, однако отсылает к образу сакральной архитектуры в целом. Благодаря прозрачности материала создаётся эффект «растворённой» архитектуры: храм визуально присутствует в пространстве, но остаётся нематериальным. Зрители могут свободно перемещаться внутри инсталляции, воспринимая её как полноценное пространство, несмотря на отсутствие стен.

Данный пример демонстрирует, что даже без привязки к конкретному утраченному объекту возможно создание архитектуры, работающей с идеей памяти, сакральности и отсутствия. Такие инсталляции формируют новое восприятие храма как символа, существующего между материальным и нематериальным.

Рис. 6. Инсталляция “Etherea” архитектора Эдоардо Тресольди

Таким образом, современные методы визуализации утраченного архитектурного наследия играют важную роль в сохранении культурной памяти. Они позволяют не только представить исчезнувшие объекты, но и осмыслить их значение в историческом и духовном контексте. Цифровая реконструкция, дополненная реальность и архитектурный фантом по-разному интерпретируют прошлое, создавая условия для его актуализации в современном

пространстве. Эти подходы способствуют сохранению нематериального наследия, формируют более глубокое восприятие истории и делают её доступной для широкой аудитории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Эдоардо Тресольди: Basilica di Siponto // Tresoldi Studio: [сайт]. – URL: https://www.tresoldistudio.com (дата обращения: 04.04.2026).

2) Etherea – инсталляция на фестивале Burning Man // Burning Man Journal: [сайт]. – URL: https://journal.burningman.org (дата обращения: 05.04.2026).

3) Мемориал жертвам Холокоста в Берлине // Stiftung Denkmal für dieermordetenJ uden Europas: [сайт]. – URL: https://www.stiftung-denkmal.de (дата обращения: 03.04.2026).

4) Ковентрийский собор: история разрушения и восстановления // CoventryCathedral: [сайт]. – URL: https://www.coventrycathedral.org.uk (дата обращения: 06.04.2026).

5) Дополненная реальность в архитектуре и сохранении наследия // ArchDaily: [сайт]. – URL: https://www.archdaily.com (дата обращения: 07.04.2026).

6) Цифровая реконструкция архитектурного наследия // CyberLeninka: [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru (дата обращения: 05.04.2026).

УДК 72.021.2

АДАПТИВНАЯ АРХИТЕКТУРА

А.Д. Кузнецов, С.В. Расторгуев

Научный руководитель **– С.В. Расторгуев**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Проектом рассматриваются возможности трансформируемой архитектуры на примере автономного комплекса на камчатском побережье.

Ключевые слова: *трансформация, динамичность, адаптивность, эффективность*

ADAPTIVE ARCHITECTURE

A.D. Kuznetsov, S.V. Rastorguev

Scientific Supervisor - **S.V. Rastorguev**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The project explored the potential of a transformable structure based on an autonomous complex on the Kamchatka coast.

Keywords*: transformation, dynamism, adaptability, efficiency*

Суровый и непостоянный климат прибрежных территорий формирует потребность к вариативности и приспособлению. К примеру, побережье Камчатского полуострова помимо цунами, землетрясений, холодных зим и мощных ветряных порывов известно такими опасностями как извержения вулканов. Поэтому строительство в данном регионе требует повышенных требований к материалам и конструкциям (рис. 1).

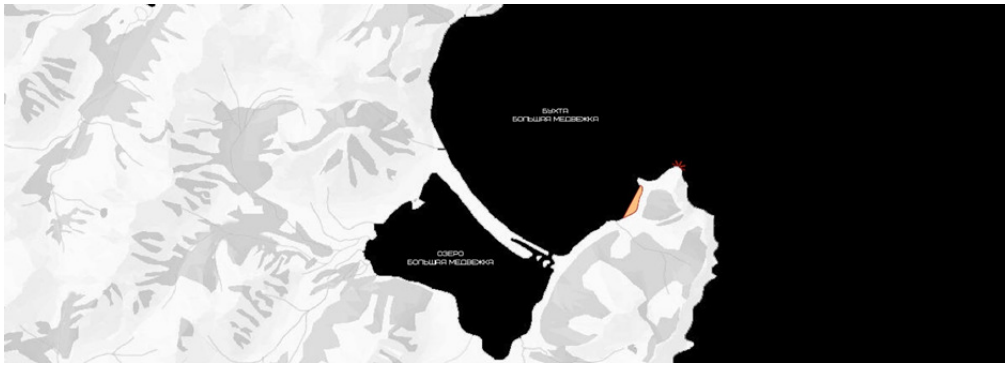


Рис. 1. Расположение комплекса

Тем не менее полуостров привлекает огромное количество туристов своими необыкновенными пейзажами, через полуостров пролегает северный морской путь, регион является важной точкой добычи морепродуктов и драгоценных металлов.

Идеей проекта является создание архитектуры способной подстраиваться под климатические условия, выгодно использовать все возможности окружения и обеспечивать все потребности посетителей комплекса. Адаптивная архитектура – это здания и сооружения, способные подстраиваться под внешние факторы за счет изменения своей формы и функций. Основа для моей трансформации – модульность. Весь комплекс состоит из одинаковых кубических ячеек площадью 10 м^2, образующих масштабируемую систему.

Каждая из ячеек имеет наполнение из створок и ставней позволяющих изменять её площадь в зависимости от необходимости. Функция ячейки зависит от ее наполнения. Это может быть как жилой модуль, так и общественное, техническое, административное или ботаническое помещение. Помимо того, трансформации створок так же имеют разные конфигурации в зависимости от функции самого пространства. Квадратная панель может делиться как на 2 половины, так и на 16, но в рамках строгой геометрии. Все ячейки объединяются между собой в единую структуру, соединенную общими коридорами и поднятыми над водой на телескопических сваях. Таких структур может быть до пяти, и они расположены веером для обеспечения естественной инсоляции каждого помещения (рис. 2).

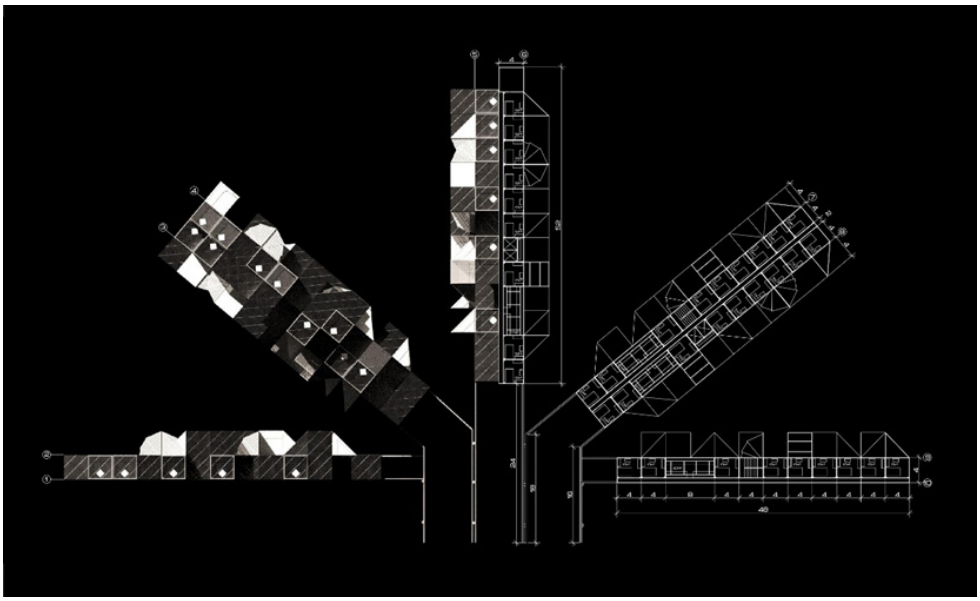


Рис. 2. План

Главная цель комплекса – работать как динамический механизм. Здание складывается в несколько этапов при разной степени опасности. Первым этапом створки ячеек могут подстраиваться под погоду, становясь навесами или барьерами от ветра. От процента раскрытия регулируется вентиляция и освещенность помещений. Кровля способна менять угол наклона из-за осадков. Вторым этапом створки полностью закрываются, защищая помещения и хрупкие элементы от более серьезных физических воздействий. Третьим этапом секции по рельсам перемещаются в полость внутри скалы, защищая комплекс от самых опасных катаклизмов. Значительную площадь комплекса занимает метеорологическая станция со всем необходимым оборудованием. В целом для эффективного функционирования требуется осуществление внутреннего температурного контроля, оперативное прогнозирование метеорологических изменений, отслеживание сейсмической активности и общая оптимизация энергопотребления, и распределение ограниченных ресурсов вроде продуктов питание и предметов первой необходимости.

В совокупности всех элементов стал собираться и образ архитектуры. Формы геометрические и четкие, но благодаря разнообразию сочетаний типовых элементов получается создать более гибкий образ. В здании нет декоративных элементов, и весь силуэт создается повернутыми под разными углами створками. Поэтому взгляд фокусируется на общей композиции, а не отдельных деталях. Главное, что фасад не является постоянным, он динамически изменяется даже в течение суток. Он объединяет разные типы трансформации и планирует противостоять тяжелейшим погодным условиям, поэтому требует надежные и высокопрочные конструктивные системы: легкие каркасы, шарнирные соединения, гидравлические поршни и композитные панели. Складки должны быть одновременно и несущей конструкцией, и водоотводами, и эстетическим элементом.

Рис. 3. Комплекс и грузовой порт

Для обеспечения автономной работы комплекса в условиях удаленного расположения от крупных населенных пунктов необходимы альтернативные источники энергии. Благодаря большим открытым пространствам достаточно выгодно использование энергии ветра. Ветряки можно расположить в достаточно большой зоне вокруг комплекса и на его секциях, однако учитывая силу возможных порывов, необходимо предусмотреть механизм их скрытия. Более эффективными и компактными являются вертикальные ветряные установки, ось вращения которых расположена перпендикулярно земле. Также можно использовать солнечные батареи, но учитывая погодные условия, солнечных дней на полуострове недостаточно. Поэтому это не является приоритетным элементом. Как часть подвижного сооружения они и сами могут поворачиваться вслед за солнечными лучами. Помимо того, на Камчатке есть уникальный источник энергии - геотермальный. За счет нескольких станций можно питать крупный город, но необходим участок с термальной активностью. Например, Мутновская ГЭС, расположенная на юге полуострова, вырабатывает около 350 ГВТ.ч в год и её мощность возможно увеличить. Все эти типы источников достаточно экологичны и имеют большие перспективы для развития.

Так как комплекс находится на побережье и окружён вулканами основной маршрут связи – водный. Также поблизости проходит северный морской путь, поэтому необходим крупный порт с возможностью разгрузки грузовых судов (рис. 3). Чтобы вместить самый крупный корабль на этом маршруте понадобится порт протяженностью минимум в 120 м. Для защиты от морских течений порт располагается внутри залива. Таким образом комплекс будет выполнять функцию промежуточного пункта между крупными портами, как в ближайшем городе Петропавловске-Камчатском.

Динамически меняющаяся архитектура уже не является редкостью в современное время. Башни Аль-Бахар в Абу-Даби имеют множество панелей, реагирующих на движение солнца, благодаря которым в разы уменьшается нагрев внутренних помещений. Художественный музей Милуоки – гигантское крыло способное раскрывается и закрывается в зависимости от времени суток. Вила Джирасоле в Италии вращается целиком, двигаясь за солнцем. Таким образом, предлагаемый проект комплекса может стать возможным для реализации уже в ближайшем будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Tatlin: офиц. сайт. – URL: https://tatlin.ru/articles/arxitektura_vzaimodejstviya/ (дата обращения: 6.03.2026)

2) ARCHITIME: офиц. сайт. – URL: https://www.architime.ru/kinarch.htm?ysclid=mnnjk7xuy6262729624 (дата обращения: 1.04.2026)

3) Журнал «Меридиан»: офиц. сайт. – URL: https://meridian-journal.ru/site/article6cca/ (дата обращения: 24.03.2026)

УДК 72.025.4

РЕГЕНЕРАЦИЯ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ПОШЕХОНЬЯ

В.А. Кульмаирова

Научный руководитель – **С.М. Максимов**, канд. архитектуры, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается регенерация исторического центра города Пошехонье в Ярославской области. Проект объединяет методы регенерации, реставрации и консервации.

Ключевые слова: *регенерация, реставрация, историческая среда.*

REGENERATION OF THE HISTORICAL CENTER OF POSHEKHONYAE

V.A. Kulmairova

Scientific Supervisor - **S.M. Maksimov**, Candidate of Architecture, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The regeneration of the historical center of Poshekhonye in the Yaroslavl region is being considered. The project combines methods of regeneration, restoration, and conservation.

Keywords*: regeneration, restoration, historical environment*

В современной России отмечается сокращение населения малых городов – жители стремятся переехать в крупные мегаполисы. В 2018 году в РФ насчитывалось 789 малых городов с численностью до 50 тыс. человек, включая девять в Ярославской области. За период с 2010 по 2018 год население этих посёлков сократилось на десятки тысяч человек: в Пошехонье – на 4%, в Угличе – на 7%. Причинами являются низкая транспортная доступность, ограниченные экономические возможности, слабая коммуникационная сеть, износ инфраструктуры и общественных зон. Основным драйвером развития остаётся туризм, который способствует привлечению капиталовложений, созданию рабочих мест и повышению уровня жизни населения.

Исторические посёлки, включая Ростов Великий, сохранили архитектурные особенности, заложенные ещё в период укрепления поселений. Реформы Екатерины II XVIII века внедрили стиль классицизма, регулярные городские планы и единые архитектурные проекты — более 400 городов были переделаны под новые стандарты. В XX веке крупные центры претерпели масштабную трансформацию, тогда как малые посёлки сохранили свою изначальную структуру. Боевые действия нанесли урон городам, однако малые населённые пункты пострадали меньше, сохранив свой довоенный облик.

С 1970-х годов ведётся регистрация исторических посёлков: к 2019 году в России было признано около 480 таких территорий, в том числе девять – в Ярославской области. С 1991 года действует программа «Возрождение…», нацеленная на сохранение градостроительного наследия. Для эффективной регенерации требуется комплексный подход — воссоздание объёмно-композиционного каркаса, застройки, доминант и главных осей, с опорой на архитектурные традиции эпохи реформаций.

Историческая среда Пошехонья – это устойчивая визуальная и культурная целостность, требующая комплексного воссоздания утраченной архитектурной среды с учётом исторического контекста, градостроительной памятности и национально-культурных особенностей. Под регенерацией понимается не просто восстановление отдельных объектов, а возврат городскому ландшафту его прежнего облика, атмосферы, исторической динамики и

духовного смысла, что предполагает возвращение к традиционным формам урбанистики, культурной памяти и социальному функционированию.

Город зародился как село Пертома – древнее поселение финно-угорского происхождения, название которого происходит от корня *перт* – «жилище», «дом», и суффикса *-ма*, указывающего на место, где располагаются жилища. Это говорит о связи поселения с традиционной технологией рубки брёвен, плотницким искусством и культурой деревянного зодчества, характерной для северных районов Великого Устюга, Ярославля и Костромы. Археологические раскопки на территории современного Пошехонья подтвердили наличие поселений эпохи позднего средневековья, включая остатки деревянных изб, кремлёв, а также культовых сооружений.

В 1777 году, при Екатерине II, село Пертома было переименовано в город Пошехонье в связи с необходимостью создания административного центра Ярославской губернии. Название, вероятно, изменили из-за неподходящего звучания слова «Пертома» – оно казалось слишком сложным и малопонятным для русскоязычной аудитории. Новое название, возможно, образовано от названия реки Пошехоньи, протекающей через территорию, или от топонима, связанного с древним поселением, что отражает тенденцию к унификации и адаптации имён под русскую лингвистическую традицию.

Центр города сохранил веерную планировку XVIII–XIX веков, характерную для городов, созданных по типу «солнечного луча»: от центральной площади расходятся радиальные улицы, формируя геометрически выверенную композицию. Такой тип заимствован из европейских архитектурных традиций и стал символом порядка, власти и цивилизованности. Кольцевые улицы, окружающие центральное ядро, создавали зону общественных и торговых пространств, обеспечивая удобство передвижения и визуальную организацию города.

Однако сегодня центральная часть города сталкивается с рядом серьёзных проблем: износ асфальтового покрытия, отсутствие малых архитектурных форм, несоответствие уровня освещения современным требованиям, плохое состояние набережной реки Пошехоньи, отсутствие зелёных зон и благоустроенных мест для отдыха. Эти факторы снижают комфортность пешеходной среды, ограничивают туристическую привлекательность и ослабляют социальную активность.

Ключевые ресурсы территории:

Архитектурно-пространственная: сохранённые элементы классицизма — фасады исторических домов, палаточные дворы, а также уникальный храмовый комплекс, включающий Троицкий собор, колокольню и утраченную церковь Рождества Христова, выполненные в духе русского классицизма и романтического зодчества.

Историко-культурная: роль площади как центра общественной жизни, где когда-то проходили ярмарки, праздники, народные гулянья, собрания, а также религиозные крестные ходы. Важную роль играла и ярмарочная функция – с XVIII века Пошехонье было центром крупной ярмарки, привлекавшей купцов из разных уголков России. Это подтверждается архивными документами, описаниями путешественников и археологическими находками.

Социальная: высокий потенциал для привлечения населения, возвращения молодёжи, развития малого и среднего бизнеса, а также привлечения инвесторов, заинтересованных в развитии туристической инфраструктуры и культурных проектов.

Рекреационная: благоприятные природные условия – живописные изгибы реки Пошехоньи, наличие лесных массивов, зелёных зон и береговой полосы — создают идеальные условия для прогулок, велотроп, пеших маршрутов, отдыха на природе, а также организации водных экскурсий и спортивных мероприятий.

Концепция регенерации включает комплекс мер, направленных на воссоздание исторического облика города с сохранением его культурной идентичности:

– Воссоздание ярмарочной функции, но в другом месте – на набережной с павильоном на воде, оформленным в традициях деревянного зодчества, с элементами народного

искусства, традиционной кухни, ремёсел и народных игр. Павильон может быть временным сезонным объектом, раскрывающим культурную память о былой торговле и праздниках.

– Обновление центральной площади: укладка брусчатки из натурального камня и деревянных плит, установка новых осветительных приборов в стиле исторической архитектуры (светильники с лампами накаливания или светодиодные аналоги в кованых ограждениях), ландшафтная реновация с использованием местных растений – кустарников, цветников, клумб.

– Реставрация Троицкого собора и колокольни. Восстановление проводится с соблюдением принципов аутентичности и использования традиционных материалов.

– Создание музея под открытым небом на месте Собора Рождества Христова, который был разрушен в советское время. Оформлена как смотровая площадка над остатками церкви с возможностью доступа к раскопкам, оформленная как археологическая точка интереса. Здесь можно будет увидеть слои сохранившейся истории, обнаруженные при раскопках, а также интерактивные элементы, позволяющие познакомиться с жизнью города в разные эпохи.

– Аллея от парка Мемориала Боевой Славы к колокольне, выложенная каменной мозаикой, предназначенная для пешеходов.

– Развитие стрелки – перспективной территории между рекой и центром города – с созданием дорожной сети, включающей велодорожки, тротуары, подъездные пути, амфитеатр для открытых мероприятий, зоны отдыха с беседками, скамейками.

– Обустройство набережных: велодорожки, зелёные полосы, дебаркадеры для лодок, кафе, гостиницы, выставочного павильона арт-объекты, освещение, системы дренажа и защиты от наводнений.

– Кольцевая водная сцена с беседками, детской площадкой, ярмарочными палатками, сценой для выступлений артистов, фестивалей, фольклорных коллективов и народных гуляний.

Концепт регенерации, основанный на исторической функциональности и градостроительной памяти, обеспечивает эффективную реализацию программ развития малых городов, повышая их конкурентоспособность, вовлекая местных жителей в процессы самоопределения и восстанавливая ценность общественных пространств. Осуществление подобных инициатив создаёт предпосылки для устойчивого развития, привлечения инвестиций, формирования туристических маршрутов и укрепления культурной преемственности поколений.

Градостроительная память охватывает не только объекты культурного наследия, но и урбанистические особенности, характерные для определённого периода: планировку улиц, размещение дворов, систему освещения, наличие фонтанов, скверов и пешеходных аллей. Возвращая этим элементам прежнее назначение – например, организуя на месте старинного рынка фестивали, ярмарки, выставки – мы воссоздаём атмосферу былого быта, приближая горожан к своей истории. Такие зоны превращаются в центры социальной активности, куда сходятся как молодёжь, так и пожилые граждане, укрепляя чувство принадлежности к городу.

Привлечение инвестиций становится возможным благодаря созданию привлекательного туристического продукта. Регенерированные территории, сочетающие историческую атмосферу, культурные события, гостеприимство и комфортные условия, становятся точками притяжения. Посетители приезжают не только на экскурсии, но и на фестивали, тематические недели, выставки – что стимулирует развитие гостиничного бизнеса, ресторанов, магазинов сувениров и изделий ручной работы.

Формирование туристического маршрута – это не просто перемещение по достопримечательностям, а путешествие сквозь историю, культуру и быт. Каждая остановка маршрута вызывает глубокую эмоциональную вовлечённость и личную связь с городом.

Таким образом, регенерация малых городов на основе исторического функционала и градостроительной памятности – это не просто восстановление фасадов, а сложный,

многоуровневый процесс, при котором каждый элемент – от фасада до сквера – становится частью единой системы, возвращающей городу жизнь, привлекательность и социальное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Салтыков-Щедрин, М.Е. Пошехонская старина. Житие Никанора Затрапезного, пошехонского дворянина. – М.: АСТ, 2026. – 672 с.

2) Правила землепользования города Пошехонье. – URL: 4.plan_covr_issp.jpg (3937×4811)

3) Расположение в системе расселения. – URL: https://xn----8sbnmfccxgbbhcwk5d7b.xn--p1ai/tinybrowser/files/dokumenty/gradostr/6.rasp_v_sist_rassel.jpg

4) Генплан города Пошехонье. – URL; https://пошехонский-район.рф/index.html?action=search&text=%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD&required=&exclude=

5) Названия наших деревень. 1777 год. Пертома, Шехонь и Пошехонье. – URL: https://dzen.ru/a/ZMfyqkxCoFRlXomY

6) Достопримечательности города Пошехонье. – URL: https://пошехонский-район.рф/dostoprimechatel-nosti.html

7) Пошехонье и окрестности. История, культура, достопримечательности, люди / Н. Бокарева [и др.] – Рыбинск: Медиарост, 2021. – 102 с. – (Библиотека ярославской семьи).

УДК 72.025.5

ПРИНЦИПЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ИСТОРИЧЕСКИХ КВАРТАЛОВ ГОРОДОВ: БАЛАНС СОХРАНЕНИЯ НАСЛЕДИЯ И СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ

С.А. Менькова

Научный руководитель – **М.Н. Кудряшов**, канд. искусствоведения

Ярославский государственный технический университет

Рассматриваются принципы регенерации исторических кварталов городов в контексте взаимодействия архитектурного наследия и новой архитектуры, ревитализация исторической среды (на примере проекта регенерации квартала "Старого города" в Ярославле)

Ключевые слова: *регенерация, историческая среда, квартал*

PRINCIPLES OF REGENERATION OF HISTORICAL QUARTERS OF CITIES: BALANCE OF HERITAGE PRESERVATION AND MODERN DEVELOPMENT

S.A. Menkova

Scientific Supervisor – **M.N. Kudryashov**, Candidate of Art Criticism

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the principles of regeneration of historical city districtsin the context of interaction between architectural heritage and new architecture, as well as the revitalization of the historical environment (using the example of a shopping center project in the historical district of Yaroslavl).

Keywords: *regeneration, historical environment, district*

Сохранение исторической среды признаётся одной из важнейших задач современного градостроительства. Исторические кварталы городов несут в себе коллективную память, идентичность места и уникальную атмосферу. Однако в современных реалиях понятие "консервации" нередко сводится лишь к формальному признанию объекта культурного наследия - без реального финансирования на поддержание его состояния. За десятилетия таких практик сформировался устойчивый, но, как показывает опыт, нежизнеспособный стереотип: чтобы сохранить наследие, его нужно оставить в нетронутом виде. Но проблема в невозможности сохранить то, что застыло в неподвижности. Оставляя историческую среду нетронутой, мы обрекаем её на постепенную деградацию, физическое разрушение и неизбежную потерю значимости. Без точек притяжения, без людей и современных функций к ней пропадает и внимание, и ресурсы на поддержание. Из исторической среды пропадает жизнь. Целью становится сохранить историческую среду, но при этом дать ей возможность развиваться и оставаться частью живого города.

Для этого необходимо понять, как мы воспринимаем историческую застройку. При взгляде с улиц, "снаружи", мы видим периметральную застройку, ее исторические фасады, формирующие узнаваемый образ. С другой стороны - то, что изначально скрыто от глаз - это внутриквартальные пространства, дворы, глубинная застройка. Они редко попадают в поле зрения случайного прохожего. Эту часть города можно назвать "скрытым слоем". Именно здесь часто и происходит деградация: пустующие пространства, обветшавшие фасады и находящиеся в аварийном состоянии постройки, хаотичные парковки. Внутриквартальные пространства часто скрывают запустение, что сказывается на всей ткани города. Именно поэтому так важно дать им жизнь и возможность развиваться.

При регенерации квартала возникает вопрос: если эта часть скрыта, то должна ли она соответствовать исторической среде так же строго, как фасадная линия?

Для ответа можно обратиться к мировому опыту. Существует большое количество исторических кварталов, сохраняющих свою идентичность, при этом являющихся точкой притяжения.

Рис. 1. Проект компании Heatherwick Studio

Одним из ярких примеров является проект компании Heatherwick Studio в самом сердце исторической части Праги. В основе проекта – ряд внутренних дворов и проходов, объединяющих территорию созданиями, представляющими особую историческую ценность (рис. 1).

Помимо реставрации, проект предусматривает строительство трех новых динамичных объектов с общественными пространствами на крыше и террасах. И если периметр квартала замыкается в полном подчинении среде, то здания внутри квартала остаются свободными в выборе архитектуры, при том сохраняя идентичность места благодаря тематическому единству, отделочным материалам, а также интерьерным решениям. Также на территории сохраняется здание манежа XVIII века, в ходе конверсии меняющее свою функцию.

Рис. 2. Проект компании ChapmanTaylor

Другим показательным примером можно назвать регенерацию квартала в центре Ахена, Германия, по проекту компании ChapmanTaylor (рис. 2). В рамках этого проекта в существующую городскую инфраструктуру органично встраиваются новые общественные пространства: площади, пешеходные зоны, зоны отдыха. Наряду с ними появляются жилые дома, офисные помещения и объекты торговли. Таким образом, квартал получает новую полноценную жизнь, но при этом не утрачивает своей исторической значимости. Проект выполнен в духе контекстуализма, с сохранением гения места. В результате квартал становится продолжением истории города, а не разрывом с ней.

Рис. 3. Рынок Manifesto Market

Еще один пример — рынок Manifesto Market, который преобразил бывший пустырь в самом центре Праги (рис. 3). Изначально это место было неосвоенным, пустующим пространством без какой-либо инфраструктуры. Проект превратил его в оживлённое гастрономическое пространство и новую городскую достопримечательность, привлекающую как местных жителей, так и туристов. Окружающая среда здесь довольно сложная: рядом проходит эстакада и расположены огромные рекламные щиты. Тем не менее, проект грамотно вписывается в эту индустриальную среду, не пытаясь её игнорировать или маскировать. Основным приёмом становится использование чёрных контейнеров, которые выступают в роли торговых павильонов и зон для посетителей. Контейнеры создают характерный визуальный образ, перекликающийся с брутальным окружением.

Обращение к мировому опыту показывает, что при разнообразии подходов существует главный принцип, который нельзя нарушать - сохранение "гения места". Он удерживает связь с контекстом, даже когда новая постройка визуально отличается от исторической среды. Атмосфера и общее ощущение пространства оказываются важнее прямого соответствия архитектурных деталей, силуэтов и стилей.

Для данной задачи могут использоваться различные методики.

- Методика тематического единства градостроительной композиции;
- Методика воспроизведения местных особенностей - adhoc;
- Методика неовернакулярной архитектуры;
- Методика контекстуализма;
- Методика архитектурного палимпсеста.

Также используются отдельные методы и приемы, такие как:

- паразитарная архитектура;
- конверсия.

Однако они становятся лишь инструментами, вторичными по отношению к главной задаче: сохранить дух места.

Создавая концепцию регенерации квартала "Старого города", я руководствуюсь этим принципом.

На данный момент квартал находится в запустении. За внешним периметром скрываются разрушенные и ветхие постройки, замусоренность и частичная заброшенность территории, пустующий торговый центр. Жизнь здесь отсутствует, хотя территория обладает большим потенциалом. В моем проекте периметральная застройка сохраняется полностью, включая все объекты культурного наследия и действующий хлебозавод. Сносу подлежат только аварийные и диссонирующие здания, а также старый торговый центр, на месте которого возводится новый, становящийся главной точкой притяжения. Дополнительно в квартале появляются ресторан, коворкинг, выставочное пространство.

Важной частью проекта является сознательное сохранение аутентичной промышленной атмосферы, которая связана с действующим хлебозаводом на территории квартала. Он задаёт особый характер всей среде - фактурный, без излишней декоративности. Главным связующим звеном между прошлым и настоящим становится красный кирпич. Он используется не только как отделочный материал, а выступает носителем памяти места, объединяя разнородные элементы застройки в единую композицию. Существующие здания проходят через конверсию, получая новые функции. Особенностью становятся уютные дворики-закутки, формирующиеся внутри квартала, благодаря восстановлению ритмической застройки, исторически существовавшей. В результате квартал становится многофункциональным, наполненным жизнью, но при этом сохраняя свою историческую память.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Яргина, З.Н. Эстетика города. – Москва: Стройиздат, 1991.
2) Корпус 5 // Цих.ру: [сайт]. – URL: https://cih.ru/j2/k5.html (дата обращения: 07.04.2026).
3) Savarin // Heatherwick studio: [сайт]. – URL: https://heatherwick.com/projects/buildings/savarin/ (дата обращения: 07.04.2026).
4) Altstadtquartier Büchel // Chapmantaylor: [сайт]. – URL: https://www.chapmantaylor.com/projects/altstadtquartier-buchel (дата обращения: 07.04.2026).
5) Manifesto Market // Worldarchitecture: [сайт]. – URL: https://worldarchitecture.org/architecture-news/ephzz/manifesto_market_transforms_pragues_heartland_with_black_containers_as_a_new_food_space.html?utm_source=Pinterest&utm_medium=organic (дата обращения:07.04.2026).

УДК 725.51

АРХИТЕКТУРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ НОВОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ГОРОДСКОГО ПАРКА В ГОРОДЕ ШУЯ

Е.К. Новикова

Научный руководитель – **Е.В. Митрофанова**, канд. искусствоведения, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается архитектурная концепция нового благоустройства городского парка в городе Шуя (Ивановская область). Проект заключается в регенерации старого генплана и утраченной русской деревянной и советской архитектуры, а также внедрение современных технологий и решений.

Ключевые слова: *регенерация парка, русская архитектура, советская архитектура*

ARCHITECTURAL CONCEPT OF NEW URBAN PARK DESIGN CITY PARK IN THE CITY OF SHUYA

E.K. Novikova

Scientific Supervisor – **E.V. Mitrofanova**, Candidate of Art Criticism, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the architectural concept of new urban park design in the city of Shuya (Ivanovo Region). The project involves the regeneration of the old master plan and the lost Russian wooden and Soviet architecture, as well as the introduction of modern technologies and solutions.

Keywords: *park regeneration, Russian architecture, Soviet architecture*

Современный город – это не только совокупность жилых массивов и дорожной сети, но и сложная экосистема, качество жизни в которой напрямую зависит от состояния общественных пространств. В последние десятилетия концепция устойчивого развития городов сместила акцент с чисто утилитарных задач на создание комфортной, эстетичной и функциональной среды для человека. Особую актуальность этот вопрос приобретает для малых провинциальных городов, таких как Шуя, где общественные пространства играют роль не просто мест отдыха, а культурных и социальных центров, формирующих идентичность территории. Благоустройство данного парка является стратегически важной задачей (рис. 1).

Рис. 1. Городской парк г. Шуя, Россия

Городской парк города Шуи (традиционно известный как «Городской сад») - это уникальный объект, обладающий не только природным, но и глубоким историко-культурным потенциалом. Расположенный на берегу реки Тезы, он является «зелеными легкими» центральной части города и любимым местом нескольких поколений шуян. Однако с течением времени материально-техническая база парка и его инфраструктура перестали соответствовать современным стандартам комфорта и безопасности.

Благоустройство данного парка является стратегически важной задачей. Оно позволит превратить морально устаревшую зону в современное мультифункциональное пространство, сохранив при этом его уникальный исторический колорит (например, знаменитые малые архитектурные формы и старинные аллеи).

Комплексный подход к благоустройству Городского парка в Шуе призван решить ряд накопленных проблем. Начнем с инфраструктурного износа. Требуется обновление разрушенного дорожно-тропиночного покрытия, замена устаревших систем освещения и парковой мебели.

Следующая проблема – функциональный дефицит. Необходимо создание четкого зонирования (выделение площадок для активного отдыха, детских игр, культурных мероприятий и зон «тихого» отдыха), которого сейчас недостаточно.Это решит вопросы безопасности**,** ведь за счет грамотного ландшафтного дизайна и освещения улучшится просматриваемость территории.

Нельзя забывать и о важности улучшении экологического состояния. Оздоровление зеленого фонда, расчистка береговой линии и создание цивилизованного доступа к воде - будет хорошим началом для регенерации парка.

И последней, но немаловажной проблемой выявлена низкая доступность для маломобильных групп населения (родителей с колясками, пожилых людей, людей с инвалидностью). Территория будет спроектирована доступной и удобной.

Таким образом, актуальность темы реферата обусловлена необходимостью поиска оптимальных проектных решений, которые позволят вдохнуть новую жизнь в Городской парк Шуи, сделав его катализатором позитивных изменений во всей городской среде

Уникальность проекта благоустройства Городского парка в Шуе заключается в бережном отношении к его историческому прошлому и стремлении восстановить преемственность времен. В основу ландшафтных решений заложено частичное воссоздание изначального генплана Летнего сада, что позволит вернуть парку его историческую логику, восстановить утраченные прогулочные маршруты и видовые точки.

Особое внимание уделяется возрождению материальной культуры парка через два ключевых направления. Во-первых, восстановление деревянной архитектуры**.** Речь идет о воссоздании утраченных павильонов, беседок и входных групп, выполненных в традиционном русском стиле, который исторически был визитной карточкой Шуи. Во-вторых, реставрация советского наследия. Проект предполагает возвращение в пространство парка отреставрированных советских скульптур и фонтанов, которые для многих поколений горожан являются символами их детства и юности.

Архитектурно-художественная концепция проекта строится на смелом, но гармоничном сочетании русского деревянного зодчества и советского стиля. Такой синтез не является случайным: он отражает многослойность истории города.

Благодаря такому подходу обновленный парк будет транслировать посетителю особый эмоциональный посыл, а именно чувство ностальгии. Через знакомые образы, формы и декор, возвращающие к истокам и лучшим моментам прошлого и одновременно ощущение «светлого будущего». Это возможно передать через чистоту линий, масштабность советского гуманизма и современное качество исполнения, которое внушает уверенность в завтрашнем дне и процветании города.

Таким образом, парк станет не просто местом отдыха, а «машиной времени», соединяющей лучшие достижения разных эпох в едином гармоничном пространстве, устремленном в будущее.

Важным идеологическим и эстетическим источником вдохновения для концепции послужил дизайн-проект загородного дома для семьи солиста группы «Сироткин» (рис. 2). На сайте dsgnhub.ru написано: “Нам было безумно приятно работать над этим проектом. Сергей и Мария Сироткины очень приятные и легкие в общении, творческие, у них прекрасный вкус. Они задали нам вектор движения в стилистике, а мы подхватили волну. Знаете, каждый проект для нас – это своего рода лихорадка, пока мы находимся в процессе работы, мы буквально болеем им. Стеклоблоки, природная легкость, натуральные материалы, рифленое стекло, винтаж, арки, этнические мотивы и элементы русского стиля — все это нам удалось смешать и получить неповторимый уютный и выразительный интерьер со своим собственным характером”. Несмотря на то, что данный проект относится к сфере частных интерьеров, заложенный в него принцип работы с культурным кодом идеально созвучен задачам современного благоустройства городского парка в городе Шуя.

Рис. 2. Загородный дом для семьи солиста группы “Сироткин”, Россия

Почему интерьерный проект применим к ландшафту парка? Перенос принципов «дома Сироткина» на территорию городского сада обоснован несколькими фундаментальными причинами.

Во-первых, единство материальной базы**.** В проекте дома ключевую роль играет дерево - материал, который является связующим звеном между русской избой и советским дачным модернизмом. Для парка в Шуе это означает использование натуральных фактур, которые «стареют благородно» и создают ощущение тепла, несвойственное стандартным решениям из бетона и пластика.

Во-вторых, синтез стилей как философия. Интерьер дома солиста «Сироткин» строится на деликатном соседстве фольклорных мотивов и строгой геометрии советского мид-сенчури. В масштабе парка этот подход позволяет избежать китча: «русский стиль» здесь проявляется не в избыточном декоре, а в пропорциях и материалах, а «советский» - в чистоте линий, функциональности и уважении к пространству.

В-третьих, создание «атмосферы вне времени». Группа «Сироткин» известна своей меланхоличной, но светлой музыкой, и их дом воплощает ту же эстетику - это пространство, где прошлое не кажется пыльным, а будущее не кажется холодным. Именно такой эмоциональный фон необходим Городскому парку: он должен стать местом «коллективной памяти», где советский фонтан и резная деревянная беседка не спорят друг с другом, а создают единый меланхоличный и вдохновляющий образ.

Таким образом, обращение к опыту частного проектирования позволяет перенести в общественную среду Шуи интонацию бережного отношения к деталям. Парк перестает быть просто транзитной зоной и превращается в «городскую гостиную» - место, где каждый

житель чувствует ту же сопричастность и уют, которые обычно присущи частному дому с богатой историей.

Соединение русского деревянного зодчества и советского неоклассицизма (или модернизма) в рамках проекта - это попытка создать «третий путь» в благоустройстве. Это уход от безликого современного дизайна в сторону уникальной «шуйской» идентичности, которая будет дарить людям чувство узнавания и спокойствия, столь важное для жителей малых городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Hse art and design school // HSE UNIVERSITY: [site]. – URL: https://hsedesign.ru/
2) DSGN HUB: сайт. – URL: https://dsgnhub.ru/
3) ArchDaily: сайт. – URL: https://www.archdaily.com/
4) HUTIR Island: Psychological Rehabilitation Center // Dezeen: [site]. – URL: https://www.dezeen.com/

УДК 728.5

АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННОГО ДЕТСКОГО КРУГЛОГОДИЧНОГО ЛАГЕРЯ: АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ АРХИТЕКТУРЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В РОССИИ И ПРОЕКТНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИРОВАННОЙ СРЕДЫ ДЛЯ АКТИВНОГО И ТВОРЧЕСКОГО ОТДЫХА ДЕТЕЙ РАЗНЫХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП

Д.М. Осипова, М.А. Одинцова, А.М. Волков

Научный руководитель - **А.М. Волков,** ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В работе прослежена эволюция архитектуры детских лагерей России от унифицированной типологии пионерлагерей СССР к современному многообразию индивидуальных и модульных решений. Выявлены причины перехода к уникальной круглогодичной среде. На основе проведенной аналитики предложена проектная модель круглогодичного детского лагеря, где особое внимание уделено возрастной дифференциации пространства, климатической адаптации и интеграции с природным ландшафтом.

Ключевые слова: *детский лагерь, архитектурно-пространственная организация, генеральный план, лучевая структура, типология*

ORGANISATION OF A MODERN YEAR-ROUND CHILDREN'S CAMP: AN ANALYSIS OF THE ARCHITECTURAL EVOLUTION OF EXISTING FACILITIES IN RUSSIA AND A DESIGN MODEL FOR AN ADAPTED ENVIRONMENT FOR ACTIVE AND CREATIVE RECREATION FOR CHILDREN OF VARIOUS AGE GROUPS

D.M. Osipova, M.A. Odintsova, A.M. Volkov

Scientific Supervisor – **A.M. Volkov**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

This paper traces the evolution of children's camp architecture in Russia, from the standardised typology of Soviet pioneer camps to the contemporary diversity of bespoke and modular designs. It identifies the reasons behind the shift towards a unique, year-round environment. Based on the analysis, a design model for a year-round children's camp is proposed, with particular attention paid to age-based spatial differentiation, climatic adaptation and integration with the natural landscape.

Keywords: *children's camp, architectural and spatial organisation, master plan, radial structure, typology*

Детский лагерь сегодня — это сложный архитектурно-пространственный организм, призванный обеспечить полноценное развитие ребёнка в течение всего календарного года. Однако путь к современному пониманию лагеря, как круглогодичной адаптивной среды был долгим и нелинейным. Чтобы понять логику формирования архитектурных типологий и объяснить переход от типовых построек к индивидуальным проектным решениям, необходимо обратиться к истокам явления и проследить его эволюцию.

1. Исторические корни и феномен советского пионерского лагеря

Идея организованного детского отдыха на природе восходит к началу XX века и связана прежде всего со скаутским движением, зародившимся в Англии. В молодом советском государстве этот опыт был переосмыслен и адаптирован к новым идеологическим задачам. Уже весной 1922 года, одновременно с рождением пионерской организации, для пионеров начали организовывать выездные лагеря в сельской местности. Городские пионерские отряды выезжали за город вместе с вожатыми, жили в скромных условиях — в палатках, а упор в их деятельности делался на спорт и военно-патриотическое воспитание.

Поворотным моментом стало создание в 1925 году лагеря «Артек» в Крыму. Изначально задуманный как лагерь-санаторий для детей с туберкулёзной интоксикацией по инициативе председателя Российского общества Красного Креста Зиновия Соловьёва, «Артек» очень скоро превратился в символ и витрину советской системы детского отдыха. Первые артековцы жили в четырёх брезентовых палатках у самого моря, однако уже через два года появились лёгкие фанерные домики, а в 1930-е годы, с постройкой зимнего корпуса, «Артек» постепенно перешёл на круглогодичную работу.

К 1950–1960-м годам система пионерских лагерей в СССР приобрела колоссальный масштаб. Лозунг «всё лучшее – детям» воплощался в амбициозных архитектурных проектах. В 1960 году открылся «Орлёнок» – второй по значению детский лагерь СССР, который по замыслу должен был стать пионерским городом для более чем 5000 детей. В течение двух десятилетий здесь были построены летние лагеря «Солнечный» и «Комсомольский», дружинные корпуса «Звёздный», «Стремительный» и «Штормовой», школа, стадион, астрономическая обсерватория, библиотека, Дом авиации и космонавтики, Дворец культуры и спорта. Архитектура «Орлёнка», отмеченная Госпремией РСФСР 1977 года, сегодня признана живым памятником советского модернизма.

2. От унификации к разнообразию: эволюция типологий

Советский период сформировал мощную инфраструктуру детского отдыха, однако архитектурно-типологическое разнообразие было ограниченным. Основным типом учреждений загородного детского отдыха являлся пионерский лагерь, проектирование которого велось по типовым проектам, собранным в иллюстрированных каталогах Госгражданстроя. Архитектурный облик таких зданий был предельно лаконичен и функционален. Исследователи отмечают, что и сегодня около 50% действующих лагерей относятся к типу пионерского лагеря, либо базируются на его территории.

Однако с распадом СССР и последующими социально-экономическими трансформациями монолитная система пионерских лагерей уступила место значительно более сложной и многомерной картине. Сегодня классификация детских лагерей включает целый ряд параметров:

- по времени функционирования: сезонные и круглогодичные;
- по функциональному профилю: оздоровительные, образовательные, спортивные, творческие, языковые, скаутские;
- по ведомственной принадлежности: государственные, муниципальные, ведомственные, частные;
- по возрастной ориентации: для младших школьников, подростков, старшеклассников;
- по локации: загородные, городские (на базе школ), прибрежные, горные.

Переход от ограниченной типологии к множественности форм был обусловлен несколькими факторами. Во-первых, изменился социальный заказ: родители и дети стали ожидать от лагеря не просто оздоровления и идеологического воспитания, но и развития конкретных навыков – от иностранных языков до робототехники и театрального мастерства. Во-вторых, коммерциализация сферы детского отдыха породила конкуренцию, в которой архитектурная уникальность и узнаваемость стали важными маркетинговыми преимуществами. В-третьих, развитие строительных технологий и материалов позволило отойти от жёстких рамок типового проектирования в пользу индивидуальных, часто модульных, решений.

3. Современные тенденции: модульность, адаптивность, уникальность

Наиболее яркой чертой современного этапа развития архитектуры детских лагерей в России стал переход от капитальных типовых строений к быстровозводимым модульным конструкциям. В рамках федеральной программы модернизации детских лагерей, на которую выделено около девяти миллиардов рублей, возводятся десятки новых жилых корпусов из модульных конструкций. Такой подход позволяет создавать комфортные условия проживания, сопоставимые с отельным сервисом: комнаты на 4–5 человек, собственный санузел, общие холлы для отрядных сборов, стеклянные веранды с панорамным

остеклением. При этом большинство новых корпусов проектируется с расчётом на круглогодичную эксплуатацию, что принципиально отличает их от сезонных построек советского периода.

Показательным примером новой парадигмы является проект круглогодичного детского лагеря «Ямалия», разработанный для размещения на территории арт-кластера «Таврида» в Крыму. По замыслу авторов, это не просто место отдыха, а настоящая круглогодичная школа, где дети с Крайнего Севера могут общаться, учиться, играть и изучать традиции и культуру своего региона в комфортных климатических условиях юга. Архитектурный конкурс на разработку концепции лагеря привлёк более 20 команд из разных городов России, что свидетельствует о растущем профессиональном интересе к данной типологии.

Другой вектор модернизации – реконструкция существующих объектов. Лагерь «Красная гвоздика» в Сысертском районе Свердловской области переводится на круглогодичную работу: здесь устанавливаются 15 жилых корпусов из быстровозводимых конструкций на 760 мест, что обеспечит комфортный отдых детей в любое время года. Программа перехода лагерей на круглогодичную работу, рассчитанная на пять лет, реализуется в рамках национального проекта «Семья» и охватывает всё большее число регионов.

Суммируя вышесказанное, можно выделить ключевые причины, обусловившие переход от типовых построек советского периода к индивидуальным архитектурным решениям в современной России:

1) Социокультурные изменения. Советская модель лагеря была ориентирована на унифицированное воспитание коллективиста. Современная модель ориентируется на раскрытие индивидуального потенциала ребёнка, что требует разнообразия функциональных сценариев и соответствующих им пространств.

2) Технологический прогресс. Появление модульных конструкций, энергоэффективных материалов и инженерных систем позволило проектировать здания, адаптированные к конкретному климатическому и ландшафтному контексту, без оглядки на жёсткие рамки типовых серий.

3) Экономическая логика. В условиях рыночной экономики уникальный архитектурный облик становится конкурентным преимуществом, привлекающим платежеспособный спрос. Частные инвесторы и государственные заказчики заинтересованы в создании узнаваемых, «знаковых» объектов.

4) Нормативно-правовая гибкость. Современные нормы проектирования, в отличие от советских СНиПов, допускают большую вариативность объёмно-планировочных и композиционных решений, что стимулирует архитектурный поиск.

5) Расширение функциональной программы. Круглогодичный лагерь сегодня – это не только спальные корпуса и столовая, но и образовательные центры, лаборатории, мастерские, спортивные комплексы, медиастудии, требующие индивидуального проектного подхода.

Таким образом, эволюция архитектуры детских лагерей в России представляет собой движение от унифицированной типологии советского пионерлагеря к многообразию индивидуальных проектных решений, отвечающих современным педагогическим, социальным и технологическим вызовам. Это движение создаёт необходимый фундамент для разработки проектной модели адаптированной среды, способной обеспечить активный и творческий отдых детей разных возрастных групп в течение всего года.

4. Проектное предложение. Концепция генерального плана

Опираясь на выявленные в ходе анализа типологические недостатки существующих объектов, нами разработана концепция детского круглогодичного лагеря, расположенного на живописном берегу Рыбинского водохранилища, в районе деревни Волково, что позволяет использовать уникальные природно-климатические условия для круглогодичной оздоровительной и образовательной деятельности (рис. 1).

В основу композиции генерального плана лег принцип лучевой структуры, где от центрального ядра в разные стороны расходятся лучи – функциональные блоки. Такая планировка обеспечивает минимальные пути перемещения между любыми точками лагеря, интуитивно понятную навигацию и возможность поэтапного расширения (рис. 2).

Рис. 1. Концепция генерального плана

Рис. 2. Ракурсное изображение «Птичка» на основе проектного предложения

На территории разработано 8 функциональных блоков, 7 из которых направлены на организацию разного вида досуга и отдыха для 300 детей в возрасте от 8 до 18 лет.

Основные функциональные блоки:

- Жилой блок. Здесь разместились жилые дома, каждый из которых предназначен для проживания 20 человек (17 детей, 3 взрослых), так же организован пляж с различными зонами отдыха и полями для игры в пляжный волейбол или теннис.

- Блок ботаники. Здесь дети занимаются изучением особенностей природы и окружающей среды Ярославского региона, ставят различные опыты и эксперименты, проводят полевые исследования. Он включает в себя: оранжерею, корпуса, в которых изучается теория и проводится практика, аптекарские огороды и большую территорию для организации полевых исследований.

- Блок истории и искусств. Здесь соединились два направления. Дети смогут заниматься разными видами изобразительного и прикладного творчества, а также изучать историю региона и нашей страны в целом. На территории блока организованы различные корпуса под разные виды творческой и интеллектуальной деятельности.

- Спортивный блок. В данном секторе разместились: крытый спортзал, поля для волейбола, футбола, баскетбола, другие различные спортивно-оздоровительные площадки и веревочный городок.

- Блок водных видов спорта. Данный функциональный блок обладает уникальной пространственной характеристикой, поскольку его территория расположена в месте слияния двух рек. Подобное гидрографическое положение редко встречается в практике проектирования детских лагерей, однако, представляет значительный потенциал для реализации образовательных, рекреационных и экологических программ. Здесь дети смогут осваивать разные направления спорта, связанные с речной и морской тематикой, например, виндсерфинг, сапсерфинг, водные лыжи, рыбалка и др. А для хранения крупногабаритного инвентаря на территории предусмотрены инвентарные и эллинг.

- Центральный блок - ядро. Это «центр притяжения» для всего лагеря. По внешнему контуру располагаются такие здания как столовая, клуб, администрация и медиатека, на самой площади разместился зеленый театр и «сердце» лагеря - маяк с мемориальным комплексом на первых этажах (рис. 3-6).

Рис. 3. Ракурсное изображение «Центральный блок» на основе проектного предложения

Рис. 4. Ракурсное изображение «Маяк» на основе проектного предложения

Рис. 5. Ракурсное изображение «Клуб и столовая» на основе проектного предложения

Рис. 6. Ракурсное изображение «Главная площадь» на основе проектного предложения

- Буферные зоны. Данные зоны в разработанной планировочной структуре выполняют функцию пространственной дифференциации и изоляции основных функциональных секторов друг от друга. В качестве наполнения данных зон предложено размещение многофункциональных площадок с укрупнёнными малыми архитектурными формами (МАФ) – в частности, навесными конструкциями, обеспечивающими вариативность использования в различных погодных условиях. На многофункциональных площадках могут проводиться такие виды активности как зарядка, спортивные игры и игры на командообразование. В центральном буфере на такой площадке разместился главный информационный стенд.

- Хозяйственный блок. В него вошли все хозяйственные постройки, которые обеспечивают функционирование лагеря: котельная, электрощитовая, прачечная и контрольно-пропускной пункт.

Предложенная модель обеспечивает эксплуатацию лагеря на протяжении большей части года и может быть тиражирована в других регионах России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) 100-летняя история «Артека»: с чего начинался самый известный детский лагерь // Московские новости. – 2025. – 16 июня. – URL: https://www.mn.ru/smart/100-letnyaya-istoriya-arteka-s-chego-nachinalsya-samyj-izvestnyj-detskij-lager (дата обращения: 08.04.2026).

2) Белоногова, К.А. Особенности проектирования и развития архитектурной среды загородных детских лагерей / К.А. Белоногова // Архитектон: известия вузов. – 2024. – № 4(88).

3) Пионерские лагеря. Иллюстрированный каталог типовых проектов. Выпуск 5 / ред. Н. С. Номофилова. – М.: Госгражданстрой, 1982. – 248 с. — URL: https://archive.org/details/pionerskie-lagerya-katalog-tipovykh-proektov (дата обращения: 08.04.2026)

4) Пионерский лагерь «Орлёнок» // Архитектура советского модернизма. — URL: https://tatlin.ru/articles/pionerskij_lager_orlyonok (дата обращения: 08.04.2026)

5) СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. - Введ. 2021-02-05. - Москва: Роспотребнадзор, 2021. - 470 с.

6) СП 535.1325800.2024. Детские оздоровительные лагеря. Правила проектирования. - Введ. 2024-06-01. – Москва: Минстрой России, 2024. - 89 с.

7) Тхор, Э.А. Детские рекреационные учреждения круглогодичного действия: (обзор) / Э.А. Тхор, И.А. Быбочкина. – М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1975. – 39 с.

8) Dziobek-Bepler, N. Designing Spaces for Children: A Child’s Eye View / N. Dziobek-Bepler. - Berlin: Jovis, 2023. – 240 p.

УДК 711.58

ФОРМИРОВАНИЕ КОМФОРТНОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ В МАЛЫХ И СРЕДНИХ ГОРОДАХ РОССИИ

А.В. Осокина

Научный руководитель – **Д.А. Турбин**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена созданию комфортной городской среды в малых и средних городах России. Анализируется противоречие между типовой многоэтажной застройкой и исторически сложившейся средой. Выделены признаки качественной среды: сомасштабность человеку, визуальная связность, доступность функций, пешеходная сеть. Рассмотрены альтернативные подходы – малоэтажное строительство и принципы классической архитектуры. В практической части представлен дипломный проект жилого квартала в Рыбинске, иллюстрирующий применение описанных принципов.

***Ключевые слова**: комфортная городская среда, человеческий масштаб, визуальная целостность, пешеходная инфраструктура, разнообразие пространств, типовая застройка, улица, исторический контекст, малоэтажное строительство, традиционная архитектура, Рыбинск*

CREATING A COMFORTABLE URBAN ENVIRONMENT IN SMALL AND MEDIUM-SIZED CITIES OF RUSSIA

A.V. Osokina

Scientific Supervisor – **D.A. Turbin**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article is devoted to creating a comfortable urban environment in small and medium-sized cities of Russia. It analyses the contradiction between standard multi-storey housing developments and the historically established urban environment. The key characteristics of a high-quality environment are identified: human scale, visual coherence, accessibility of functions, and a pedestrian network. Alternative approaches are considered – low-rise construction and the principles of classical architecture – are considered. The practical part presents a diploma project for a residential quarter in Rybinsk, illustrating the application of the described principles.

***Keywords**: comfortable urban environment, human scale, visual integrity, pedestrian infrastructure, spatial diversity, standard housing, street, historical context, low-rise construction, traditional architecture, Rybinsk*

В последние десятилетия проблема формирования комфортной городской среды приобретает всё большую актуальность в российской градостроительной практике. Особую остроту данный вопрос имеет для малых и средних городов, которые, с одной стороны, обладают значительным историко-культурным потенциалом, а с другой – сталкиваются с последствиями типового жилищного строительства второй половины XX и начала XXI века. Возникает разрыв между аутентичной исторической средой и новыми жилыми образованиями, часто игнорирующими местную специфику и сложившийся контекст.

Цель работы – выявить основные трудности при создании комфортной среды в малых и средних городах России, обобщить принципы её достижения и продемонстрировать на примере дипломного проекта жилой застройки в Рыбинске возможности их практической реализации.

Под комфортной городской средой понимается многогранное явление, объединяющее архитектурно-пространственные, социальные и функциональные компоненты. На основе современных урбанистических исследований можно выделить следующие критерии такой среды: сомасштабность застройки человеку, визуальная целостность окружения, доступность

объектов повседневного обслуживания, развитая пешеходная инфраструктура и читаемость городских пространств (улиц, дворов, площадей, парков).

Одной из главных проблем современного жилищного строительства в России остаётся преобладание многоэтажной типовой застройки, воспроизводящей принципы микрорайонной планировки в части размещения зданий. Для таких объектов характерны разреженная застройка, отсутствие чётко выраженных уличных фронтов, недостаточная насыщенность общественных зон. В итоге снижается качество среды, теряется её уникальность, сокращается уровень социального взаимодействия между жителями.

В малых и средних городах ситуация обостряется тем, что новые районы нередко вступают в визуальный и планировочный конфликт с исторической застройкой. Традиционная городская ткань, сложившаяся в XIX – начале XX века, отличается чёткой планировочной структурой, непрерывным фронтом фасадов, умеренной этажностью и выразительными фасадными решениями. Современные жилые комплексы зачастую пренебрегают этими чертами, создавая монотонные, лишенные индивидуальных черт объекты.

Качественная городская среда должна легко считываться и осознаваться человеком. Ясная структура улиц, узнаваемые ориентиры, логичная организация территории помогают жителям ориентироваться и чувствовать себя защищённо. Отсутствие такой структуры, типичное для многих микрорайонов, порождает ощущение хаоса и приводит к потере идентичности места.

Серьёзным недостатком современных жилых районов также является наличие множества пространств без ясного функционального назначения и принадлежности. Такие территории не востребованы жителями, не порождают сценариев поведения и со временем приходят в упадок. Качественная среда, напротив, требует чёткого разделения на улицы, дворы, площади, каждый из которых выполняет свою роль.

В исторических городах именно улица служит местом взаимодействия, передвижения и социальной жизни. Однако в микрорайонной застройке эта роль утеряна: пространство между домами становится неопределённым и не выполняет функции полноценной городской среды. Возвращение улице статуса структурообразующего элемента – важный шаг к повышению качества жилых территорий.

Несоразмерность, функциональная расплывчатость пространств, игнорирование окружения, однообразие фасадов, большие разрывы между строениями, отсутствие визуальных ориентиров – всё это может вызывать дезориентацию и дискомфорт. Именно в силу перечисленных недостатков закономерно возрастает интерес к подходам, которые опираются на принципы человеческого масштаба и традиционного градостроительства. Концепция «человеческого масштаба» предполагает создание пространств, соизмеримых с повседневным восприятием и активностью человека. Для них характерны умеренная высотность, внимание к архитектурным деталям, насыщенные общественными функциями первые этажи, чётко обозначенные улицы, разнообразные общественные зоны. Урбанистические исследования подтверждают, что среда, ориентированная на пешеходов, способствует росту качества жизни и социальной вовлечённости горожан.

Среда, дружественная пешеходу, предполагает, что основные функции (жильё, обслуживание, отдых) находятся в шаговой доступности. При этом ключевая роль отводится общественным пространствам – паркам и скверам с детскими площадками, зонами для отдыха и прогулочными маршрутами.

Эффективным инструментом создания комфортной среды являются средне – и малоэтажная застройка. В отличие от высотных массивов, она позволяет сформировать более плотную и одновременно более гуманную городскую ткань. Кварталы малой и средней этажности обеспечивают визуальное разнообразие, задают чёткие границы приватного и публичного пространства. При этом важна не только этажность, но и архитектурное решение, учитывающее контекст и обеспечивающее композиционную цельность среды.

Обращение к принципам классической архитектуры играет особую роль в формировании выразительной и долговечной среды. Классическая традиция основывается на использовании пропорций, ритма, симметрии и иерархии элементов, что обеспечивает гармоничное восприятие застройки. В исторических городах применение этих принципов позволяет сохранить преемственность архитектурного облика и избежать разрыва между новым и существующим.

Зарубежный опыт в рамках таких проектов как Poundbury в Великобритании (рис. 1), квартал Cayala в Гватемале (рис. 2) и районы города Le Plessis-Robinson во Франции (рис. 3) показывают, что создание комфортных, ориентированных на пешехода районов на основе традиционных планировочных и архитектурных приёмов возможно. Несмотря на культурные различия, эти примеры подтверждают универсальность подходов, опирающихся на человеческий масштаб и структурированную городскую ткань.

Рис. 1. Poundbury, Великобритания

Рис. 2. Квартал Cayala в городе Гватемала

Рис. 3. Район города Le Plessis-Robinson, Франции

При рассмотрении специфики малых и средних российских городов необходимо подчеркнуть необходимость бережного отношения к их исторической среде. В таких городах особенно важно сохранять сложившийся масштаб, характер застройки и визуальную целостность. Новые жилые образования должны не разрушать существующую структуру, а органично дополнять и развивать её.

С учётом перечисленных проблем и подходов особую актуальность приобретает разработка жилых образований, ориентированных на человека, контекст и повседневный опыт восприятия. В рамках дипломного проектирования мной разрабатывается концепция жилого квартала в Рыбинске малой и средней этажности (рис. 4), который представляет собой попытку комплексного ответа на обозначенные вызовы и практической реализации изложенных идей.

Участок проектирования удалён от исторического центра, однако планировка выполнена на основе квартального принципа, обеспечивающего последовательное разграничение уличных пространств и дворовых территорий.

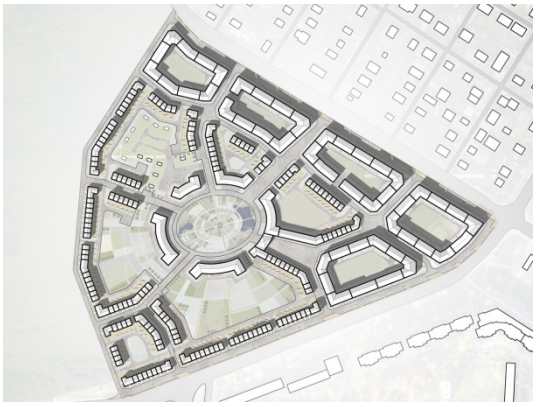


Рис. 4. Генеральный план проектируемого жилого микрорайона в Рыбинске

Проект включает жилую застройку малой и средней этажности (высота варьируется в пределах 2–5 этажей, что позволяет сохранить человеческий масштаб и избежать визуального давления на среду), коммерческие и сервисные функции на первых этажах, а также объекты социальной инфраструктуры – общеобразовательную школу и детский сад. Центральный парк и примыкающая к нему площадь служат ядром притяжения жителей, а пешеходные маршруты, пронизывающие эти общественные зоны, обеспечивают удобство повседневного использования территории (рис. 5). Приоритет отдан пешеходному движению, что соответствует современным тенденциям устойчивого развития городской среды (рис. 6).

Рис. 5. Планируемые объекты на территории проектирования

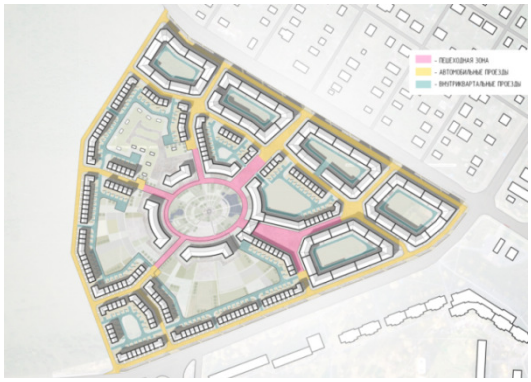


Рис. 6. Генеральный план жилого микрорайона с обозначением пешеходных зон, автомобильных и внутриквартальных проездов

Архитектурное решение базируется на приёмах классической композиции, включая ритмическую организацию фасадов, пропорциональность и выделение основных элементов здания (рис. 7). Это позволяет гармонично включить новую застройку в существующий архитектурный контекст Рыбинска.

Рис. 7. Архитектурное решение фасадов

Формирование комфортной городской среды в малых и средних городах России требует системного подхода, включающего учёт исторического контекста, реализацию принципа человеческого масштаба и применение качественных архитектурных решений. Типовая многоэтажная застройка, пренебрегающая местной спецификой и психологическими закономерностями восприятия, ведёт к деградации среды и утрате идентичности. Альтернативой служат малоэтажные кварталы с ясной уличной сетью, активными первыми этажами и общественными пространствами, организованные на основе классических архитектурных и градостроительных принципов.

Предложенная концепция микрорайона в рамках дипломного проекта демонстрирует один из возможных путей реализации этих подходов, нацеленный на создание гармоничной, устойчивой и ориентированной на человека городской среды. В исторических городах особенно значимым становится принцип включения новой застройки не как изолированного объекта, а как неотъемлемой части уже сложившейся городской структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Александер, К. Язык шаблонов. Города. Здания. Строительство / К. Александер, С. Исикава, М. Сильверстайн; пер. с англ. И. Сыровой. – Москва: Издательство Студии Артемия Лебедева, 2014. – 1096 с.

2) Линч, К. Образ города: пер. с англ. / К. Линч; под ред. А. В. Иконникова; пер. В. Л. Глазычева. – Москва: Стройиздат, 1982. – 328 с.

3) Jacobs, A.B. Great Streets / A. B. Jacobs. – Cambridge, MA: MIT Press, 1995. – 341 p.

УДК 728.54

АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БАЗЫ ОТДЫХА В УСЛОВИЯХ ПРИБРЕЖНОГО ЛЕСНОГО ЛАНДШАФТА

Д.А. Плюснина

Научный руководитель – **С.М. Максимов**, канд. архитектуры, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается комплексная модель современной базы отдыха, которая переосмысляет классический загородный отдых через призму функциональной автономности и архитектурного единства с ландшафтом.

***Ключевые слова**: архитектура и форма, ландшафт, функциональная автономность, единство с природой*

ARCHITECTURAL AND SPATIAL ORGANIZATION OF A MULTIFUNCTIONAL RECREATION FACILITY IN A COASTAL FOREST LANDSCAPE

D.A. Plyusnina

Scientific Supervisor – **S.M. Maksimov**, Candidate of Architecture, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This article discusses a comprehensive model of a modern recreation facility that reinterprets classic country recreation through the lens of functional autonomy and architectural unity with the landscape.

***Keywords**: architecture and form, landscape, functional autonomy, and unity with nature*

База отдыха (рекреационный комплекс) – это специально организованная территория за пределами города, предназначенная для временного проживания, восстановления сил и досуга на природе.

Эпоха типовых домиков-бытовок и хаотичной застройки ушла в прошлое. На смену им пришла вдумчивая архитектура, где главным героем становится ландшафт, а здания выступают лишь элегантным дополнением к природному контексту.

Спрос на качественный внутренний туризм и загородный отдых активно растет. Современный житель мегаполиса ищет не просто ночлег на природе, а комплексную «перезагрузку». Городская жизнь часто сопряжена с шумом, стрессом, постоянным давлением и однообразием. Природа предлагает тишину, умиротворение и возможность отвлечься от городской суеты. Физическая активность на природе провоцирует выработку эндорфинов – гормонов радости, которые улучшают самочувствие. Так же природа часто становится источником вдохновения.

Архитектурный проект базы отдыха сегодня должен отвечать сразу нескольким актуальным запросам:

- Эскапизм и слияние с природой. Гости хотят визуального и физического контакта с окружением. Отсюда колоссальный запрос на панорамное остекление, стирающее границу между интерьером и экстерьером.
- Экологичность и тактильность. использование натуральных материалов – светлого дерева, камня, деревянного бруса. Фасадные решения стремятся к естественным фактурам, которые красиво стареют и вписываются в среду.
- Многофункциональность. Современные базы отдыха предлагают не только размещение, но и комплексные услуги: организацию питания, развлекательные программы,

оздоровительные процедуры, активный отдых. Это привлекает как частных туристов, так и корпоративных клиентов для проведения деловых мероприятий.

- Учёт сезонности. Если база планируется для круглогодичной эксплуатации, важно предусмотреть системы отопления, утепление зданий и зимние активности (катание на лыжах, сауны, закрытые зоны отдыха).

Все вышеперечисленные пункты я учитывала на создании своего дипломного проекта. Территория находиться в центральной части Ярославской области, в Тутаевском районе на левом берегу реки Волги. Площадь территории 11Га, рядом находится деревня Марино, инфраструктура отсутствует. Цель проектирования: создать многофункциональное пространство для отдыха с длительного пребыванием.

Архитектурный облик главного корпуса спроектирован по принципу адаптивной этажности, это позволяет избежать монотонности и визуально «растворить» здание в окружающем лесном массиве. Игра кровель, деревянные фасады с использованием светлых пород и панорамное остекление создают единство с природой. Размещение объектов вдоль береговой линии продумано таким образом, чтобы из любой точки открывался панорамный вид на водную гладь, а маршруты для прогулок петляли среди деревьев.

Функциональное наполнение проекта:

- административная зона и гостеприимный холл;
- зона коворкинга превращает базу в автономный городок. Это делает ваш проект более устойчивым в современных реалиях, когда люди ищут места, где можно жить неделями, сохраняя рабочий ритм;
- ресторан с панорамным остеклением и просторной летней верандой;
- жилой блок: номера с видовыми точками на Волгу, отдельные коттеджи разной вместимости, развернутые фасадами так, чтобы обеспечить каждой семье максимальное уединение;
- полноценный SPA-комплекс для восстановления сил;
- зона коворкинга для тех, кто совмещает удаленную работу с отдыхом на природе;
- конюшня. Лошади – это «эмоциональный якорь». Люди уезжают из города за перезагрузкой. Взаимодействие с лошадьми признано одним из самых эффективных методов борьбы со стрессом. Для детей знакомство с лошадьми – это событие, которое запоминается на всю жизнь. Родители склонны возвращаться в те места, где их дети нашли интересное и полезное хобби;
- система из двух пирсов разделяет потоки: один предназначен для активного проката лодок, второй – со смотровой площадкой – для созерцательного отдыха и закатов над Волгой;
- активная среда: Современные детские и спортивные площадки, интегрированные в лесной массив с минимальным вмешательством в экосистему.

Таким образом, проект базы отдыха представляет собой целостную рекреационную экосистему, где архитектурные решения не просто сосуществуют с природой, а усиливают её потенциал. Проект демонстрирует, как в условиях полного отсутствия исходной инфраструктуры можно создать автономный и устойчивый «город-курорт», который сохраняет экологический баланс территории и задает новый стандарт качества загородной жизни.

Рассмотрим два проекта, которые представляют разные полюса современной загородной архитектуры. Несмотря на общую цель — отдых на природе – они реализуют её через принципиально разные объемно-планировочные решения.

Проект элитной базы отдыха в Agalarov Estate от архитектурного бюро Studia 54 – это показательный пример того, как премиальный комфорт интегрируется в сложный природный ландшафт. Это масштабный рекреационный комплекс на территории 8 гектаров (80 000 м²), где главной задачей было создание уединенного пространства, не нарушающего экосистему соснового леса и озер.

Архитекторам пришлось работать с неровным рельефом и перепадами высот, что в итоге стало не препятствием, а главным козырем проекта.

Ключевые объекты на территории:

- Мастер-дом (Nordic Heaven) – смысловой и архитектурный центр комплекса.
- Жилой фонд: 4 VIP-коттеджа и 5 малых семейных домов для приватного отдыха.
- Инфраструктура для досуга: дом развлечений, веревочный парк в лесу с разными уровнями сложности, спортивные площадки и стрельбище.
- Оздоровление: Обособленный банный комплекс, деликатно вписанный прямо в лесной массив.
- Техническое обеспечение: Взлетные площадки, паркинг на 60 автомобилей с автомойками, а также скрытые от глаз дома для персонала

Проект выдержан в духе современной прямолинейной архитектуры с отсылками к скандинавскому стилю. В основе формообразования лежат лаконичные выступающие объемы, чистые линии и строгая геометрия, которая эффектно контрастирует с органическими формами леса.

Проект гостиничного комплекса в Звенигороде от бюро T+T Architects — это яркий пример так называемой «тихой архитектуры», которая не доминирует над ландшафтом, а деликатно интегрируется в исторический и природный контекст Подмосковья.

Основная концепция проекта строится на переосмыслении традиционной дачной эстетики в современном ключе.

Главная задача, которую решали архитекторы, – создание масштабного объекта (общая площадь около 12 000–14 000 м²), который не выглядел бы громоздким на фоне малоэтажной застройки Звенигорода и живописных холмов.

Дробление объемов: Вместо одного монолитного здания комплекс разделен на несколько корпусов разной этажности. Это создает эффект «деревни» или системы павильонов, что психологически комфортнее для отдыхающего человека.

Связь с ландшафтом: Здания расположены таким образом, чтобы максимально сохранить существующие деревья. Перепады рельефа используются для создания террас и разных уровней обзора.

Панорамное остекление: как и в лучших современных рекреационных проектах, здесь использовано масштабное остекление, которое буквально впускает подмосковный лес в интерьеры номеров и общественных зон.

T+T Architects сделали ставку на натуральность и тактильность, что идеально подходит для концепции загородного отдыха. В отделке активно используется дерево (или его качественные имитации) в сочетании с темными металлическими элементами. Использование вертикальных деревянных реек (ламелей) создает игру света и тени, визуально вытягивая здания и помогая им мимикрировать под стволы окружающих деревьев. Архитекторы использовали современные вариации скатных крыш, что является прямой отсылкой к классической русской дачной архитектуре, но в строгом минималистичном исполнении.

Проект задуман как полноценный курорт выходного дня, где логистика продумана до мелочей:

- Гостиничный блок: Комфортабельные номера с видами на лес или реку, современный термальный комплекс с бассейнами и зонами релаксации.
- Ресторанный комплекс: Просторные залы с открытыми верандами, которые становятся естественным продолжением обеденных зон в теплое время года.
- Благоустройство: Особое внимание уделено прогулочным маршрутам, сенсорным тропам и зонам тихого отдыха у воды.

В отличие от существующих аналогов, мой дипломный проект не просто предлагает место для отдыха, а формирует полноценную многофункциональную систему для долгосрочного пребывания, а не на кратковременный визит.

Современный рекреационный комплекс — это сложный инструмент по управлению впечатлениями. Он строится на стыке передовой инженерии, экологического сознания и глубокого понимания человеческой психологии, превращая загородную территорию в востребованное «место силы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) СП 257.1325800.2020. Здания гостиниц. Правила проектирования. – URL: https://nav.tn.ru/cloud/iblock/019/01904fb21dfcf2f1f173c2ea7cc4fcc9/SP-257.1325800.2020-Zdaniya-gostinits.-Pravila-proektirovaniya.pdf (дата обращения: 01.04.2026).

2) Проектирование базы отдыха: что нужно знать. – URL: https://stroysps.ru/news/proektirovanie-bazy-otdyha-chto-nuzhno-znat (дата обращения: 01.04.2026).

3) Гостиничный комплекс в Звенигороде. – URL: https://archi.ru/projects/russia/18972/gostinichnyi-kompleks-v-zvenigorode (дата обращения: 01.04.2026).

4) Архитектурный проект элитной базы отдыха в «Агаларов Эстейт»: планировка спортзала. – URL: https://studia-54.com/portfolioitems/arhitekturnyj-proekt-elitnoj-bazy-otdyha-v-agalarov-estate#planirovka-sportzala (дата обращения: 01.04.2026).

УДК 629.4.014.275

РЕНОВАЦИЯ ЧАСОВОЙ ЗАВОД “ЧАЙКА” г. УГЛИЧ

Е.А. Пряничникова

Научный руководитель - **А.М. Волков**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Реновация промышленных зон подразумевает их преобразование в современные пространства с учетом истории и экологических аспектов. Проектирование общественных пространств фокусируется на создании комфортных, безопасных и функциональных мест для отдыха и общения для всех жителей.

Ключевые слова: *завод, общественные пространства, организация*

RENOVATION OF THE “CHAIKA” WATCH FACTORY IN UGLICH

E.A. Pryanichnikova

Scientific Supervisor - **A.M. Volkov**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

Renovation of industrial zones involves transforming them into modern spaces that take into account their history and environmental aspects. The design of public spaces focuses on creating comfortable, safe, and functional areas for recreation and socializing for all residents.

Keywords: *Pfactory, publicspaces, organization*

Реновация старого часового завода "Чайка" в городе Углич представляет собой важную инициативу. Завод, занимающий 28 гектаров, долгое время был символом экономического процветания региона. Однако с утратой производственных функций он стал представлять собой заброшенное пространство, что в свою очередь негативно сказывается как на эстетике города, так и на его экономическом развитии.

В связи с этим, важно отметить, что проект реновации может вернуть заводу жизнь, адаптировав его корпуса под новые производства и креативные индустрии. Более того, это создаст рабочие места и увеличит налоговые поступления. Попутно благоустройство территории, включающее создание зеленых зон и общественных пространств, улучшит качество жизни горожан. В результате, жители получат новые возможности для отдыха и общения.

Тем не менее, вовлечение местного населения в процесс реновации является ключевым аспектом. Это позволит учесть их интересы и усилить ощущение принадлежности к городу. Таким образом, реновация завода "Чайка" может стать важным шагом к экономическому и социальному возрождению Углича, гармонично сочетая историческое наследие с современными потребностями.

В связи с этим, важно отметить, что проект реновации может вернуть заводу жизнь, адаптировав его корпуса под новые производства и креативные индустрии. Более того, это создаст рабочие места и увеличит налоговые поступления. Попутно благоустройство территории, включающее создание зеленых зон и общественных пространств, улучшит качество жизни горожан. В результате, жители получат новые возможности для отдыха и общения.

Тем не менее, вовлечение местного населения в процесс реновации является ключевым аспектом. Это позволит учесть их интересы и усилить ощущение принадлежности к городу. Таким образом, реновация завода "Чайка" может стать важным шагом к экономическому и социальному возрождению Углича, гармонично сочетая историческое наследие с современными потребностями.

Идея реновации старых промышленных объектов, таких как корпуса часового завода "Чайка", заключается в том, чтобы дать этим зданиям вторую жизнь, вместо того чтобы строить новые кварталы или объекты. В современных условиях, когда вопросам устойчивого развития и разумного использования ресурсов уделяется особое внимание, такая стратегия имеет множество преимуществ как для местного сообщества, так и для экономики в целом.

Еще одним значительным преимуществом реновации является потенциальная экономия ресурсов. Строительство новых зданий часто связано с высокими затратами на материалы, трудозатраты и энергии. Восстановление и адаптация существующих строений позволяет свести к минимуму использование новых строительных материалов, что, в свою очередь, снижает углеродный след и воздействие на окружающую среду. При грамотном подходе к проектированию можно добиться значительных улучшений в энергоэффективности старых зданий, что также снизит эксплуатационные расходы в будущем.

Одним из наиболее важных аспектов является создание доверительного и безопасного пространства. Реновация старых корпусов может привести к созданию общественных пространств, парков, творческих и культурных центров, которые будут служить местом для встреч, общественных мероприятий и культурных обменов. Это не только улучшает качество жизни местных жителей, но и создает привлекательные условия для туристов.

В итоге, реновация старых корпусов, как например, часового завода "Чайка", становится не только вопросом сохранения исторической памяти, но и стратегическим решением, которое может принести экономические, социальные и экологические выгоды. Она помогает использовать существующую инфраструктуру, снижая нагрузку на экологию и создавая при этом привлекательные и функциональные пространства для жизни и работы. Это еще раз подтверждает, что старая промышленная архитектура может быть не просто бременем, а потенциальным богатством, имеющим множество возможностей для будущего.

На сегодняшний день территория завода сталкивается с несколькими серьезными проблемами. Во-первых, значительная часть корпусов находится в состоянии неэксплуатации, и это, к сожалению, ведет к их разрушению. Возраст зданий, отсутствие ухода и постоянное воздействие неблагоприятных климатических условий приводят к тому, что их состояние стремительно ухудшается. Во-вторых, малая проходимость территории создает дополнительные сложности для ее использования и доступа к ней, что делает это пространство менее привлекательным как для местных жителей, так и для потенциальных инвесторов. Плохая организация дорожной инфраструктуры и недостаток пешеходных зон способствуют тому, что люди избегают посещать эту часть города.

Кроме того, территория завода страдает от отсутствия благоустроенных общественных зон. На данный момент здесь нет достаточного количества зеленых насаждений, которые бы улучшали атмосферу, а зоны для отдыха и досуга совершенно отсутствуют. Это создает непривлекательные условия для жизни и общения, и горожане фактически лишены возможности проводить время на свежем воздухе в комфортной обстановке. Утрата производственных функций завода также негативно сказывается на экономическом состоянии региона: отсутствие рабочих мест ведет к уменьшению численности трудоспособного населения и снижению общей активности местного бизнеса.

В рамках предложенного проекта реновации мы рассматриваем комплексный подход, направленный на восстановление производственных функций завода и создание новой общественной инфраструктуры. В первую очередь, мы должны сосредоточиться на возобновлении производства. Это может включать в себя адаптацию части корпусов для новых современных производств, которые отвечают потребностям рынка, а также создание рабочих мест для местного населения. Привлечение новых пользователей и инвестиций в старые промышленные здания позволит не только сохранить их, но и наполнить жизнь на этой территории новыми смыслами.

Использование значительной части корпусов для общественных нужд, таких как организация культурных центров, коворкингов и творческих мастерских, предоставит

местным жителям возможность использовать это пространство с пользой. Создание культурных и образовательных программ на базе этих инновационных пространств будет способствовать формированию активного и вовлеченного сообщества, что, в свою очередь, поможет создавать новые инициативы и проекты, направленные на развитие региона в целом.

Благоустройство территории также необходимо для превращения завода "Чайка" в привлекательное место для горожан и гостей города. Разработка стратегического плана по созданию гармоничного и комфортного пространства включает в себя использование таких элементов, как зеленые зоны, пешеходные и велосипедные дорожки, а также зоны отдыха и досуга. Эти элементы позволят создать приятную атмосферу, способствующую общению и активному отдыху на свежем воздухе. Обретение статусного общественного пространства не только повысит качество жизни местных жителей, но и привлечет туристов, что позитивно скажется на развитии городского хозяйства.

Ключевым аспектом в процессе реновации станет вовлечение местного сообщества, а также создание партнёрств с различными организациями и бизнесом. Это позволит формировать новые инициативы и идеи по преобразованию территории, что поспособствует более удобному и эффективному сотрудничеству между всеми заинтересованными сторонами. Являясь частью этого процесса, местные жители могут донести до проектировщиков свои потребности и желания, что сделает результат работы более актуальным и востребованным.

Таким образом, реновация часового завода "Чайка" в Угличе это не просто возможность восстановить старое производство, но и шанс переосмыслить важное для города пространство, превратив его в центр общественной жизни. Это может стать примером успешного сочетания сохранения исторической ценности архитектуры с современными требованиями к городской среде и экономическому развитию. В конечном итоге, такие проекты вносят реальный вклад в формирование более устойчивых, комфортных и жизнеспособных городов, способных отвечать на вызовы времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) История Углича: сайт. – URL: https://uglich.info
2) Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: http://pravo.gov.ru
3) Проекты реставрации и реконструкции: сайт. – URL: https://reconstructions.ru
4) Архитектурный сайт ArchDaily — https://www.archdaily.com

УДК 725.42:625

АРХИТЕКТУРНЫЙ АНСАМБЛЬ ЯРОСЛАВСКОГО ЭЛЕКТРОВОЗОРЕМОНТНОГО ЗАВОДА: СИНТЕЗ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ЗОДЧЕСТВА И ТРАДИЦИЙ КИРПИЧНОГО УЗОРОЧЬЯ

Е.А. Селедцов, Д.А. Горнушкин

Научный руководитель – **Н.В. Хомутова**, канд. архитектуры, доцент

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена малоизученной истории и уникальности Ярославского электровозоремонтного завода, уникального комплекса промышленного модерна. Исследование подчеркивает актуальность сохранения индустриального наследия, зачастую остающегося в тени традиционных памятников, на примере монументальной паровозосборочной мастерской и утраченной башни инженера Шухова.

Ключевые слова: *Ярославль, ЯЭРЗ (Ярославский электровозоремонтный завод), промышленная архитектура, модерн, история, железнодорожные мастерские, архитектурное наследие*

THE ARCHITECTURAL ENSEMBLE OF THE YAROSLAVL ELECTRIC LOCOMOTIVE REPAIR PLANT: A SYNTHESIS OF INDUSTRIAL ARCHITECTURE AND BRICK-PATTERNED TRADITIONS

E.A. Seledtsov, D.A. Gornushkin

Scientific Supervisor – **N.V. Khomutova**, Candidate of Architecture, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article is devoted to the little-studied history and uniqueness of the Yaroslavl Electric Locomotive Repair Plant, a uniqueindustrial Art Nouveaucomplex. The study highlights the urgency of preservingindustrialheritage, which oftenremainsin the shadow of traditionalmonuments, using theexample of the monumental locomotive assemblyworkshopand the losttower of engineerShukhov.

Keywords: *Yaroslavl, YAERZ (Yaroslavl Electric Locomotive Repair Plant),industrialarchitecture, Art Nouveau,history,railwayworkshops,architecturalheritage*

Каждый город хранит свои тайны. Существуют парадные, открытые всем улицы и площади, а есть места, чья красота и история скрыты за заборами действующих предприятий. Ярославль, жемчужина Золотого кольца, не является исключением. Широко известны его древние храмы и купеческие особняки, однако за монументальными стенами Ярославского электровозоремонтного завода скрывается не менее ценное наследие. При упоминании ЯЭРЗ в воображении обычно возникают образы современных локомотивов, масштабных цехов и сложного оборудования. Это – его настоящее, его рабочие будни.

Возвращаясь к истокам основания компании, мы переносимся в период более чем столетней давности, когда на Туговой горе началось строительство не просто завода, а целого архитектурного комплекса. Центральное место в этом ансамбле занимает совокупность старинных построек, среди которых особо выделяется главная контора – настоящее сокровище промышленной архитектуры начала XX века (рис. 1). Представляя собой яркий пример стиля модерн, это здание демонстрирует, как даже чисто утилитарные пространства способны отличаться утонченной эстетикой.

Становление завода началось более века назад, когда в ноябре 1903-го железнодорожное ведомство выкупило у жителей окраины 20 десятин земли. Как отмечало губернское издание «Северный край», строительство центральных мастерских на Туговой горе было запланировано на весну 1904 года. Территория, приобретенная за 100 тысяч рублей,

находилась в районе пересечения Костромской и Волжской веток. В тот период этот ландшафт на городской периферии сочетал в себе сельские угодья, пастбища и нетронутую сосновую рощу.

Рис. 1. Главная контора западный фасад

Это обстоятельство было с пользой учтено проектировщиками: хвойная древесина использовалась непосредственно для сооружения зданий. Завод был спроектирован с большой перспективой на общей площади 25,4 гектара. Цехи строились с продуманными интервалами, чтобы в будущем их можно было расширять без помехи для производства. Котельная была намеренно размещена в центре промышленной площадки, что позволило уменьшить протяженность коммуникаций и добиться значительной экономии энергии.

Технический проект Главных мастерских разрабатывался частной фирмой по заданию Управления железной дороги. Проект утверждался по частям, по мере готовности документов. Первым, 20 марта 1904 года, был утвержден эскизный проект силовой станции, и в тот же день – проект литейной мастерской. Позже, 18 сентября 1904 года, был принят проект паровозосборной мастерской, в мае 1906 года – кузницы, в июле 1908 года – механической и колесотокарной мастерских, а в октябре 1910 года были готовы чертежи соединительного корпуса. Май 1904 года стал официальной точкой отсчета физического существования завода, когда началось возведение Центральной силовой станции, ставшей архитектурной доминантой всего комплекса (рис. 2).

Процесс возведения мастерских был разделен на две очереди. В первую очередь, в период с 1905 по 1912 годы, были построены основные здания: паровозосборочная, механическая и литейная мастерские, силовая станция, кузница, малярная, модельная лаборатория и главная контора. Центральная силовая станция, площадью около 168 квадратных саженей, вступила в строй в ноябре 1907 года, объединив в себе машинное и котельное отделения, лабораторию и выводную башню для электрооборудования.

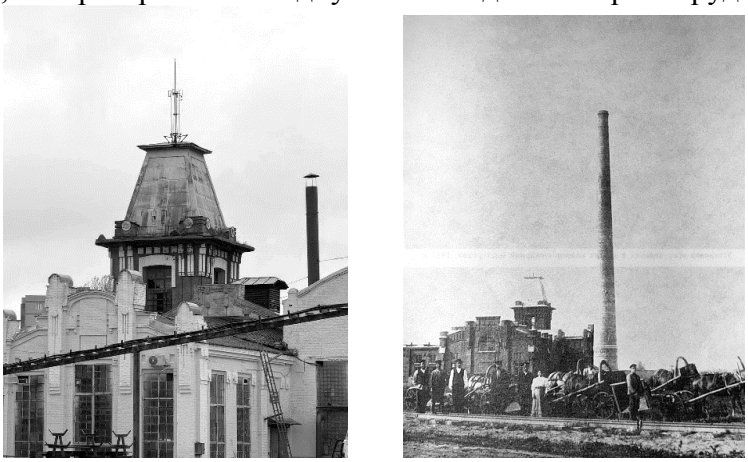


Рис. 2. Центральная силовая станция восточный и северный фасад

Одновременно с кузницей строились механическая и колесотокарная мастерские. С 1910 года они начали работать, используя три электродвигателя и сложную систему трансмиссий с ременными передачами. Интересен факт, что в этих цехах был установлен четырехтонный мостовой кран, который продолжает эксплуатироваться и в наше время. Впрочем, не все проектные решения первого этапа строительства оказались оптимальными. Так, расположение колесотокарных мастерских было сочтено нерациональным, в связи с чем в 1916 году их перенесли в специально возведенное для этих целей деревянное строение.

Вместе с тем, подлинным предметом гордости предприятия стало сооружение в 1911 году водонапорной башни по проекту великого инженера Владимира Шухова. Эта изящная гиперболоидная конструкция высотой 39,4 метра не только являлась самой высокой в городе, но и стала прообразом знаменитой московской башни на Шаболовке. К сожалению, в 1962 году она была демонтирована (рис. 3).

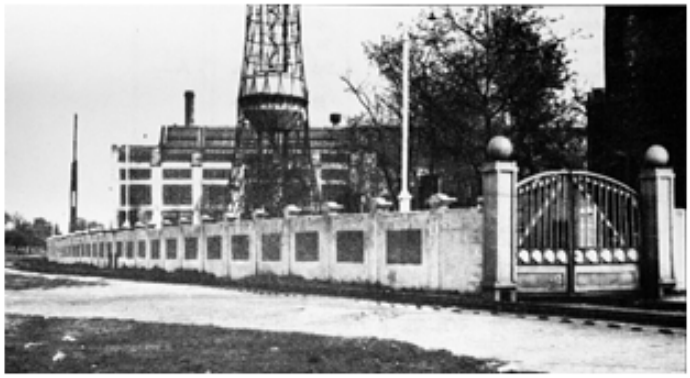


Рис. 3. Водонапорная башня по проекту Владимира Шухова. Фотография 1950 г.

Вторая очередь строительства, охватившая 1913–1917 годы, дополнила комплекс котельным цехом и деревянными зданиями для тендерного, трубомедницкого и стрелочного производств (рис. 4).

Рис. 4. Деревянный пакгауз

Параллельно шло возведение Главного материального склада, представленного комплексом деревянных пакгаузов и каменным корпусом для безопасного хранения легковоспламеняющихся материалов. Впоследствии там было организовано ремесленное училище.

Спроектированный ансамбль мастерских выглядел для своего времени классически, воплощая черты прочно утвердившегося на рубеже веков модерна, или «кирпичного стиля». Главным принципом стиля стало «преобразование полезного в прекрасное». Ярким аналогом является Октябрьский электровагоноремонтный завод в Санкт-Петербурге, однако

архитектурные решения Ярославского электровозоремонтного завода (ЯЭРЗ) оказались уникальными и не имели прямых аналогов. Модерн здесь исповедовал «штучный» подход: при общих чертах стиля на территории завода невозможно найти двух одинаковых зданий.

Особенно сильное впечатление производит паровозосборная мастерская. Её главный пролёт по высоте и ширине значительно превосходит боковые, а огромное арочное окно, поднимающееся от фундамента до мозаичного пояса-фриза, подчёркивает монументальность сооружения. Мощные колонны-контрфорсы разделяют корпус на пролёты и визуально поддерживают фасад, а башенки на флангах словно «стерегут» арку главного пролёта. Дополнительный кирпичный декор – архивольты над окнами, вертикальные цепочки, ниши и овалы – завершает облик этого индустриального храма, который, несмотря на следы времени, сохраняет своё величие.

Здание промышленного комплекса ЯЭРЗ представляет собой разновеликие исторические объёмы трёх цехов: юго-восточного пролёта механического, центрального пролёта паровозосборочного и западного пролёта испытательного. Эти пролёты объединены в единое сооружение более поздними пристройками. На юго-востоке примыкает пятиэтажный «бытовой» корпус более поздней постройки, частично перекрывающий фасадом восточную часть территории. Внешнее декоративное убранство выполнено в «кирпичном» стиле с элементами эклектики и представляет собой богатый лицевой кирпичный декор.

Западный пролёт испытательного цеха украшен гладкими лопатками и полуциркульным зубчатым поясом в завершении аттиков (рис. 5). Лицевой и северный фасады западной части имеют фигурное завершение с центральной повышенной частью и боковыми скатами. В центре расположен ризалит с усечёнными лопатками, завершённый фигурным аттиком с круглой нишей; сами лопатки украшены желобками. Полуциркульные боковые скаты декорированы профилированным карнизом и поясом с уступами. Над окнами размещены прямоугольные ниши с треугольными фронтонами и ромбом в центре (на ризалите — пояс с сухариками). Лицевой фасад фланкирован прямоугольными столбами с профилировкой. Аттик западной части завершён треугольником, полуциркульными скатами и профилированным венчающим карнизом; северный свес украшен широким карнизом, над проёмом — ниша с дентикулами. Завершение арочного окна выполнено архивольтом с боковыми лопатками (южная утрачена). На фронтоне центрального аттика — три ниши с килевидными вершинами и небольшая ромбовидная ниша над ними.

Рис. 5. Испытательный цех южный и северный фасад

Центральный пролёт паровозосборочного цеха имеет центральную полуциркульную часть, фланкированную скатными боковыми объёмами с контрфорсами (западная часть перестроена). Центральная часть расчленена лопатками, украшенными в верхней зоне квадратами и уступчатым декором. Более широкие боковые лопатки в нижней

части переходят в контрфорсы и покрыты геометрическим выступающим декором и тонкими желобками. Окна первого света декорированы лучковыми перемычками, второго — арочными архивольтами с квадратными свесами и выступающими прямоугольными подоконными полками; в межоконных пространствах расположены квадратные филёнки. Полуциркульный аттик завершён архивольтом и выступающими навершиями лопаток; сам архивольт украшен кирпичными прямоугольными выступами разных размеров. Боковые скошенные части венчаются профилированным карнизом с фигурными свесами (рис. 6).

Рис. 6. Паравозосборная мастерская южный и северный фасад

Юго-восточный пролёт механического цеха (лицевой и частично восточный фасады) отличается широким арочным проёмом с архивольтом и лопатками, украшенными поясками, овалами, квадратами и прямоугольными абаками (рис. 7). На восточном фасаде круглое верхнее окно и полуциркульный нижний проём (частично заложен) имеют более простой декор в виде кирпичных фигурных поясков и филёнок. Лицевой фасад завершён фигурным аттиком с растительным мотивом. В декоре преобладают тонкие профилированные пояски, профилированный карниз аттика и разнообразные филёнки. Боковой арочный проём (восточная часть утрачена) также имел архивольт и фигурный аттик с профилированным карнизом, овальной и фигурной филёнкой по центру. Венчающие столбики завершены прямоугольными абаками и декорированы лопатками с овальной филёнкой, поясками и тонким желобком по центру. На дворовом (восточном) фасаде декоративные элементы представлены лучковыми перемычками с длинными прямоугольными ушками; по периметру первого света — полуциркульные аттики, разделённые декоративными лопатками с овальным навершием и такой же филёнкой в завершении, увенчанные карнизом с трапециевидным замковым камнем, двойными квадратными филёнками и круглой центральной нишей с неглубокими овальными нишами по бокам.

Рис. 7. Механический цех южный и северный фасад

В 1912 году паровозосборочный цех полностью ввели в строй, завершив переход мастерских в статус современного промышленного предприятия.

Ярославский электровозоремонтный завод (ЯЭРЗ) представляет собой уникальное явление, в котором неразрывно переплелись более чем вековая производственная история, передовая инженерная мысль и высокое архитектурное искусство. Построенный в начале прошлого столетия на бывшей окраине Ярославля, завод стал воплощением по-настоящему амбициозного и прозорливого замысла. Он продемонстрировал уникальный синтез продуманной логистики, технических прорывов своего времени (от внедрения электроприводов до возведения гиперболоида Шухова) и подлинного архитектурного изящества.

Истинное значение этого ансамбля раскрывается в последовательной реализации эстетической программы промышленного модерна, выраженной в формуле «преобразование полезного в прекрасное». Зодчие не просто возводили функциональные постройки, но сознательно уходили от утилитарных штампов и безликой тиражности. Принцип «штучного» проектирования, положенный в основу всего комплекса, позволил наделить каждое здание собственной архитектурной индивидуальностью, благодаря чему на территории завода нет двух идентичных сооружений. Каждый цех, будь то монументальная паровозосборочная мастерская, напоминающая индустриальный храм, или богато декорированные испытательный и механический пролёты, обладает своим неповторимым «лицом». Изящные кирпичные орнаменты, массивные контрфорсы, арочные окна, фигурные аттики и сложная геометрия фасадов доказывают, что чисто утилитарные, рабочие пространства могут обладать исключительной красотой.

Сегодня, скрытые за высокими заборами режимного объекта и скрытые за ритмом современных рабочих будней, эти старинные здания продолжают служить своему прямому назначению. История и архитектура ЯЭРЗ убедительно показывают, что промышленное зодчество является полноправной, хотя и малоизвестной жемчужиной культурного наследия Ярославля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Архивная справка ГКУ ЯО «Государственный архив Ярославской области» от 27.01.2025 № Т-77.

2) Выпов, А.А. Дорога длиной в 100 лет: Ярославский электровозоремонтный (паровозоремонтный) завод» / А.А. Выпов. – Ярославль: Издательство «Нюанс», 2012. – 528 с. – (Страницы истории)

3) Для магистралей России. К 80-летию Ярославского электровозоремонтного завода им. Б.П. Бещева. – Ярославль, 1992. – 159 с.

4) ЯЭРЗ. Завод – наша гордость. – Ярославль, 1987. – 28 с. – (Рекламный буклет).

5) Розум, В.И. Великий из Великого: К 100-летию со дня рождения Б.П. Бещева. – Ярославль: Верхняя Волга, 2003. – 128 с.

6) Снитко, А.В. Эволюция промышленной архитектуры эпохи модерна (на примере регионов Центральной России) // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 9. – С. 57–63.

7) Сысоев, А.А. Колеса диктуют… / К 90-летию Ярославского электровозоремонтного завода им. Б.П. Бещева. – Рыбинск: Рыбинск-Михайлов посад, 2002. – 192 с.

УДК 72.025.4:711.4

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕРРИТОРИИ АНСАМБЛЯ ВОЗНЕСЕНСКИХ КАЗАРМ: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ И СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

А.А. Сизова

Научный руководитель **- А.М. Волков**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается концепция реконструкции исторической территории Ансамбля Вознесенских казарм. На основе ретроспективного анализа градостроительной эволюции квартала выявляются утраченные вертикальные доминанты, нарушенная пространственная структура и предлагается авторская методика: надстройка этажей над существующими зданием КСК «Вознесенский» и бассейном, восстановление утраченной колокольни прилегающего храмового прихода. Обосновывается выбор объёмно-пространственных решений, совмещающих принципы исторической преемственности и современной функциональной эффективности.

Ключевые слова: *реконструкция, ансамбль Вознесенских казарм, ретроспективный анализ, надстройка этажей, восстановление колокольни, историко-культурное наследие, городская среда, историческая среда, компенсационная застройка, КСК, бассейн, архитектурная доминанта, адаптация наследия*

RECONSTRUCTION OF THE TERRITORY OF THE VOZNESENSKY BARRACKS: A RETROSPECTIVE ANALYSIS AND MODERN SOLUTIONS

A.A. Sizova

Scientific Supervisor - **A.M. Volkov**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the concept of reconstruction of the historical territory of the Voznesensky Barracks Ensemble. Based on a retrospective analysis of the urban development of the quarter, the lost vertical dominants, the disturbed spatial structure are revealed and the author's methodology is proposed: the super structure of floors above the existing building of the KSK Voznesensky and the swimming pool, the restoration of the lost bell tower of the adjacent temple parish. The choice of spatial solutions combining the principles of historical continuity and modern functional efficiency is substantiated.

Keywords: *reconstruction, Voznesensky barracks ensemble, retrospective analysis, floor superstructure, bell tower restoration, historical and cultural heritage, urban environment, historical environment, compensatory buildings, KSK, swimming pool, architectural dominant, heritage adaptation*

Предисловие

В современных условиях интенсивного развития городов и дефицита свободных территорий реконструкция исторических кварталов становится одним из приоритетных направлений градостроительной политики.

Казарменные ансамбли, формировавшие градостроительную структуру российских городов на протяжении XVIII–XX вв., сегодня представляют собой уникальный, но недостаточно изученный пласт архитектурного наследия .

Ансамбль Вознесенских казарм — значимый объект культурного наследия, обладающий высоким историко-архитектурным потенциалом. В последние десятилетия территория подверглась фрагментарной застройке и утрате ряда элементов, что привело к нарушению композиционной целостности. Настоящая работа посвящена обоснованию и методам реконструкции квартала с акцентом на восстановление утраченных доминант и повышение эффективности использования пространства.

Ретроспективный анализ территории

Для понимания допустимых параметров вмешательства проведён ретроспективный анализ градостроительной структуры квартала.

1. Период формирования (конец XIII в.)

Территория была спланирована как регулярный казарменный ансамбль, характеризующийся следующими признаками (рис. 1):

- два параллельных корпуса казарм, образующих линейную структуру;
- открытое пространство плаца в центре для строевых занятий;

Рис. 1. План губернского города Ярославля от землемера Коренева (1799 г.)

2. Период начала XIX в.

Формируется храмовый комплекс на восточной границе квартала с отдельно стоящей колокольней, как градостроительной доминантой.

3. Советский период.

Происходит утрата ряда элементов. Таких как колокольня (была разрушена в ходе антирелигиозной кампании, что является типичной ситуацией для многих российских городов).

Изменение функционального назначения зданий.

Пространство плаца в 1950–1970-е гг. последовательно застраивается новыми объёмами.

4. Современное состояние

Происходит фрагментарная реконструкция.

Появляются новые объекты (рис. 2):

- КСК «Вознесенский»: Двухэтажное здание с плоской кровлей;
- Бассейн: одноэтажное здание с высоким залом бассейна;
- Место колокольни: асфальтированная площадка, используемая под парковку, без визуальной связи с храмом.
-

Рис. 2. Спутниковый вид с Яндекс-карт

Выводы ретроспективного анализа

Исторический масштаб квартала требовал вертикальных ориентиров. Современная застройка не соответствует исторической пластике. Предлагаемая надстройка существующих зданий (до 3–4 этажей) и восстановление колокольни (≈35 м) позволяют:

1. Восстановить утраченную высотную иерархию;
2. Сохранить фронтальную линию исторических фасадов (надстройка – внутри квартала);
3. Вернуть доминирующее положение храмовой вертикали.

Методы действий и их обоснование

Автором применяется комплекс научно-обоснованных методов реконструкции.

1. Метод ретроспективно-типологического анализа.

На основе сопоставления исторической и современной застройки квартала выявлены утраченные элементы структуры. Данный метод широко применяется в современной практике изучения казарменных комплексов (рис. 3).

Рис. 3. Старое фото утраченной колокольни

2. Метод компенсационной надстройки.

Параметры надстройки:

- КСК: +2 этажа (всего 3 этажа);
- Бассейн: +1 этаж (всего 3 этажа).

Новые этажи выполнены в классическом стиле, что не составляет конкуренции основным корпусам, а лишь подчёркивает их историческое значение.

Увеличение этажности обеспечивает прирост полезной площади для общественных функций. Сохраняет силуэт квартала, не доминируя над колокольней. Данный метод успешно апробирован при реконструкции казарм Преображенского полка в Санкт-Петербурге, где «надстройка мансард выполнена из легких материалов с остеклением большой площади».

Рис. 4. Проектное изображение (надстройки).
Здание бассейна (слева) и здание КСК “Вознесенский” (справа)

3. Метод исторических аналогий.

Использованы примеры реконструкции казарменных ансамблей в Санкт-Петербурге (Казармы 18-го Сапёрного батальона). Доказывает допустимость надстройки при сохранении нижних этажэй (рис. 5).

Рис. 5. Реконструкция (Казармы 18-го Сапёрного батальона)

4. Благоустройство внутриквартального пространства

Создание пешеходных связей, озеленение, организация малых архитектурных форм в стилистике ансамбля.

Обоснование выбора объектов надстройки. Здания КСК и бассейна (рис. 6):

- Эти здания расположены внутри квартала и не видны с главных фасадов улиц – надстройка не нарушает фронтальную линию исторической застройки.
- Они являются «заплатами» советского периода, а не подлинными историческими объектами.
- Обладают конструктивным потенциалом для надстройки.

Обоснование восстановления колокольни:

- Восстановление утраченной доминанты завершает ансамбль храма (ныне действующего);
- Колокольня становится градостроительным акцентом, видимым с расстояния 1,5 км.

Рис. 6. Проектное изображение (вид с птичьего полёта)

Заключение

Практическая значимость работы заключается в создании прецедента бережной реконструкции территории Ансамбля Вознесенских казармна основе ретроспективного анализа и современных методов проектирования. Это позволяет не только сохранить историко-культурную ценность объекта, но и интегрировать его в историческую среду без её необратимого повреждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) План губернского города Ярославля от землемера Коренева // ЭтоМесто: [сайт]. – – URL: http://www.etomesto.ru/map-yaroslavl_1799/ (дата обращения: 01.04.2026).

2) Старинные фото // Retro view of Mankind's Habitat – Gallery: [сайт]. — URL: https://pastvu.com/ps?f=r!1055 (дата обращения: 02.04.2026).

3) Спутник // Яндекс карты: [сайт]. — URL: https://yandex.ru/maps/16/yaroslavl/sputnik/?ll=39.870869%2C57.627047&source=serp_navig&z=17 (дата обращения: 03.04.2026).

4) Казармы 18-го Саперного батальона // Citywalls: [сайт]. — URL: https://www.citywalls.ru (дата обращения: 05.04.2026).

УДК 725.51

АРХИТЕКТУРНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЗАГОРОДНОГО ЦЕНТРА ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ С ИНТЕГРАЦИЕЙ ТРАДИЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ И ВОСТОЧНЫХ ПРАКТИК

И.С. Силантьева

Научный руководитель – **Е.В. Митрофанова**, канд. искусствоведения, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается архитектурная концепция загородного центра психологической реабилитации в Ярославской области на берегу реки Волги. Проект объединяет методы традиционной (клинической) медицины и восточные оздоровительные практики.

Ключевые слова: *психологическая реабилитация, восточная медицина, традиционная медицина*

ARCHITECTURAL CONCEPT OF A COUNTRY-BASED PSYCHOLOGICAL REHABILITATION CENTER WITH INTEGRATION OF TRADITIONAL MEDICINE AND EASTERN PRACTICES

I.S. Silantieva

Scientific Supervisor – **E.V. Mitrofanova**, Candidate of Criticism, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the architectural concept of a country-side psychological rehabilitation center in the Yaroslavl region on the banks of the Volga River. The project combines traditional (clinical) medicine methods with Eastern health practices.

Keywords: *psychological rehabilitation, Eastern medicine, traditional medicine*

Современный ритм жизни в крупных городах и мегаполисах создаёт беспрецедентно высокие стрессовые нагрузки на население. Согласно данным Аналитического центра ВЦИОМ, к концу 2025 года индекс стресса среди россиян составил 50,6 пунктов из 100 возможных – это почти в полтора раза выше, чем три года назад.

Статистика показывает тревожную картину: регулярные стрессовые состояния испытывают 40% населения, а 48% работающих граждан сталкиваются с явлениями профессионального выгорания. Вместе с тем 86% россиян никогда не обращались за профессиональной психологической помощью.

Такая статистика отражает существенный разрыв между объективной потребностью в реабилитационных услугах и реальным обращением людей за помощью. Причины этого разрыва многообразны: недостаточное количество специализированных учреждений, стигматизация психологических проблем в общественном сознании, отсутствие доступных и привлекательных форм лечения.

В этом контексте архитектура, способная исцелять не только физическое тело, но и психоэмоциональное состояние человека, становится необходимостью.

Основная идея проекта заключается в создании пространства, где строгая клиническая диагностика органично сочетается с медитативными восточными практиками, а природный ландшафт становится активным участником реабилитационного процесса. При разработке концепции центра я руководствовалась принципом взаимодополнения: традиционная медицина и восточные оздоровительные системы здесь не противопоставлены друг другу, а работают в единой системе для восстановления психоэмоционального равновесия человека.

Хотя в мире существует немало реабилитационных учреждений, стремящихся интегрировать природную среду в лечебный процесс, лишь немногие из них предлагают комплексный и сбалансированный синтез двух медицинских парадигм в рамках единого архитектурного пространства.

Один из ярких примеров интеграции традиционной и восточной медицины – Центр восточной медицины в Улан-Удэ, единственное в России государственное учреждение, где официально совмещены методы современной и традиционной восточной медицины. Центр специализируется на тибетской, монгольской и китайской диагностике, фитотерапии и иглорефлексотерапии, располагает собственной лабораторией по производству фитопрепаратов из байкальских трав (рис. 1).

Сильная сторона проекта – успешная модель сочетания двух медицинских подходов. Однако архитектурно объект расположен в городской черте, что лишает пациентов терапевтического эффекта природного окружения и контакта с естественной средой.

Рис. 1. Центр восточной медицины, г. Улан-Удэ

Второй показательный пример – оздоровительный центр ShumYip, расположенный в горной местности Китая. Архитектурный комплекс интегрирован в горный ландшафт и включает музей здоровья, реабилитационный центр и висячие сады. Проект демонстрирует высокий уровень средового дизайна и творческое использование вертикального озеленения как терапевтического фактора (рис. 2).

Вместе с тем в проекте отсутствует чёткая программа сочетания восточной и западной медицины — объект ориентирован преимущественно на профилактику и оздоровление, а не на комплексную реабилитацию пациентов с психоэмоциональными расстройствами.

Рис. 2. Оздоровительный центр ShumYip, Китай

Удачным решением преобразования природного ландшафта в реабилитационную среду является проект HUTIR Island в Буче (Украина). Это центр психологической реабилитации для людей с посттравматическим стрессовым расстройством, размещённый на острове посреди водоёма. Изоляция водной преградой создаёт ощущение убежища и безопасности, что особенно важно для данной категории пациентов (рис. 3).

Архитекторы тонко работают с природным контекстом и ландшафтом. Однако в проекте не заявлены ни восточные практики, ни полноценная клиническая диагностика, а сезонность использования объекта ограничивает его функциональные возможности.

Рис. 3. HUTIR Island, г. Буча, Украина

Отрицательным примером попыток создания реабилитационной среды служит отсутствие синтеза подходов как такового. Многие существующие центры психологической помощи размещаются в приспособленных помещениях городских клиник, лишённых связи с природой и терапевтически осмысленной архитектуры. Стандартные больничные коридоры, искусственное освещение, отсутствие визуального контакта с ландшафтом – всё это продолжает аккумулировать энергию тревоги и стресса, вместо того чтобы способствовать их преодолению.

Исследователи средовой психологии справедливо отмечают, что больничная архитектура часто усугубляет состояние пациента, вместо того чтобы помогать ему. Оставляя пространство бездушным и функционально холодным, мы лишаем человека важнейшего союзника в борьбе за выздоровление — самой архитектуры, которая должна исцелять.

Создавая концепцию загородного центра психологической реабилитации, я стремилась преодолеть этот разрыв между функцией и гуманностью. В своём проекте я хотела вдохнуть жизнь в строгую клиническую функцию, наделив её иной, более созерцательной и светлой составляющей – восточными практиками, работающими с энергетическими и психосоматическими аспектами здоровья.

Объёмно-пространственная композиция решена по трёхчастной схеме: центральный корпус, объединяющий восточные практики и общественные функции, и два боковых корпуса, в которых размещаются жилая зона и блок традиционной медицины.

Все три корпуса соединены отапливаемыми пешеходными галереями на уровне второго этажа. Это архитектурное решение обеспечивает комфортное перемещение пациентов в любое время года и раскрывает панорамные виды на Волгу, постепенно погружая человека в релаксационную среду.

Центральный корпус является композиционным и смысловым ядром всего комплекса. Его объёмно-планировочное решение отличается наибольшей высотой и выразительным силуэтом, что подчеркивает его значимость в общей композиции.

Именно здесь сосредоточены помещения для восточных практик: иглотерапии, су-джок, ци-нейцзан, шиацу, дыхательных практик, звуко- и ароматерапии. Кроме того, в центральном корпусе размещаются важные общественные пространства: конференц-зал, бассейн, библиотека и столовая.

Важнейшим архитектурным элементом центрального корпуса является оранжерея — пространство с панорамным остеклением, выходящим на Волгу. Оранжерея выполняет функцию рекреационной зоны, насыщенной тропическими и субтропическими растениями, благотворно влияющими на психоэмоциональное состояние пациентов и создающими атмосферу естественного оздоровления.

Боковые корпуса создают уравновешенную композицию относительно главного корпуса и решают важные функциональные задачи. В них располагается жилая зона – индивидуальные номера для пациентов, а также блок традиционной медицины.

Блок традиционной медицины включает кабинеты ЭЭГ-диагностики, БОС-терапии, врачей-специалистов (невролог, рефлексотерапевт, диетолог, психиатр, психотерапевт, клинический психолог), сенсорная комната. Это обеспечивает полный спектр клинической диагностики и лечения.

Участок проектирования имеет резкий обрыв к Волге. Проектом предусмотрено террасирование береговой линии с устройством ярусной набережной с тремя уровнями. Такое решение обеспечивает доступность для посетителей и создаёт разнообразие видовых точек, усиливая терапевтический эффект природного окружения и позволяя пациентам находиться в постоянном контакте с водой и природой.

Представленный архитектурный проект загородного центра психологической реабилитации на берегу Волги в Ярославской области предлагает комплексное решение актуальной социальной проблемы – роста психоэмоциональных нагрузок в современном обществе при недостатке специализированных реабилитационных учреждений.

Инновационность проекта заключается в органичном синтезе традиционной клинической медицины и восточных оздоровительных практик, объединённых общей концепцией целостного подхода к восстановлению психофизического здоровья человека.

Это проект, где архитектура не просто выполняет утилитарную функцию, но становится полноправным участником терапевтического процесса, способствуя восстановлению психоэмоционального равновесия и улучшению качества жизни пациентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Аналитический центр ВЦИОМ. Индекс стресса россиян: итоги 2025 года. – М.: ВЦИОМ, 2025.

2) Центр восточной медицины Республики Бурятия: опыт интеграции традиционных и современных методов лечения / под ред. Б.Д. Цыренжапова. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2024.

3) Степанова, А.В. Архитектурная среда как фактор психологической реабилитации // Архитектура и строительство России. – 2024. – № 3. – С. 45–52.

4) Вонг, М. Интегративная медицина: синтез западных и восточных подходов в реабилитации. – М.: Медицина, 2023.

5) Гнездилов, А.В. Психология и психотерапия в архитектурной среде. – СПб.: Речь, 2022.

6) Намсараева, Г.Д. Су-джок терапия в комплексной реабилитации пациентов с психосоматическими расстройствами // Восточная медицина: традиции и современность. – 2024. – № 2. – С. 34–41.

7) Чойжинимаева, С.Г. Аюрведа: принципы оздоровления. – М.: Ганга, 2023.

8) Shum Yip Upperhills Wellness Complex // ArchDaily: [сайт]. – URL: https://www.archdaily.com/

9) HUTIRIsland: Psychological Rehabilitation Center // Dezeen: [сайт]. – URL: https://www.dezeen.com/

УДК 725.34

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЧНОГО ВОКЗАЛА В Г. УГЛИЧ

А.Р. Сильвестрова, Н.В. Смирнов

Научный руководитель **– Н.В. Смирнов,** ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье исследуются современные принципыразработки архитектурно-планировочного решения речных вокзалов на примере проекта в городе Углич

Ключевые слова: *архитектура, речной вокзал, транспортный узел, многофункциональность*

DESIGN OF A RIVER TERMINAL IN UGLICH

A.R. Silvestrova, N.V. Smirnov

Scientific Supervisor – **N.V. Smirnov**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article explores the principles of developing an architectural planning solution for a modern river terminal in the city of Uglich.

Keywords: *architecture, river terminal, transport hub, multifunctionality*

Речной вокзал является одной из ключевых точек на прибрежной территории. Занимая главное положение на берегу реки, речной вокзал создает для пассажиров водного транспорта первое впечатление о городе. Он может быть не только транспортным узлом, но и культурным и экономически перспективным элементом в жизни города.

На сегодняшний день наблюдается масштабное возрождение интереса к внутреннему водному транспорту и круизному туризму, что возвращает речным вокзалам статус стратегически важных объектов городской инфраструктуры.

В Угличе – одном из ключевых городов маршрута «Золотое кольцо» – актуальность проектирования нового речного вокзального комплекса продиктована увеличением турпотока и необходимостью интеграции береговой линии в активную жизнь города.

Проблема заключается в том, что существующая прибрежная зона города Углича используется преимущественно как сезонная транзитная точка. Отсутствие современного, технологичного вокзального комплекса приводит к тому, что туристы сталкиваются с дефицитом базовой инфраструктуры и сервиса, соответствующего современным стандартам, а горожане теряют доступ к полноценному общественному объекту.

Цель исследования заключается в определении основных принципов разработки модели архитектурно-планировочного решения современного объекта речного транспорта на примере проект в городе Углич.

Решение проблемы заключается в проектировании речного вокзала как многофункционального узла. Как следствие, из этого вытекают следующие задачи: формирование полноценного транспортного узла вместо изолированного причала, адаптивное использование пространств в межнавигационный период и создание точки притяжения за счет интеграции культурно-досуговых функций и открытых общественных пространств.

Современный вокзал в Угличе должен совмещать функции транспортного терминала, культурно-делового центра и рекреационной доминанты.

Развитие речного вокзала требует смены подхода: переход от устаревшей модели «касса и зал ожидания» к формату многофункционального общественного пространства,

интегрированного в транспортный узел. Это позволит разгрузить исторический центр от туристических автобусов за счет перераспределения потоков на водный транспорт и создаст новую точку экономического роста, превращая набережную в круглогодично востребованный объект.

Ключевым принципом проектирования становится трансформируемость: внутренние зоны должны легко адаптироваться под зимние сценарии использования, превращаясь в коворкинги, выставочные залы или прокаты коньков, что обеспечит объекту круглогодичную востребованность.

Архитектурное решение объекта призвано выстроить деликатный визуальный диалог между панорамой Волги и камерной застройкой города. Используя современные экологичные материалы и панорамное остекление, здание должно стать «прозрачным мостом», соединяющим реку и городскую ткань.

Эталонным примером служит Северный речной вокзал в Москве, доказавший, что транспортный объект способен трансформироваться в городской парк и музей (рис. 1). Однако, в отличие от мегаполисов, проект в Угличе должен строго учитывать масштаб исторической среды. Новое здание не должно вступать в визуальный конфликт с ансамблем Угличского Кремля; его задача — деликатно дополнить «речной фасад» города, отвечая при этом требованиям современной архитектурной эстетики.

Рис. 1. Северный речной вокзал в Москве

Музейный комплекс AstrupFearnley в Осло, спроектированный архитектором Ренцо Пиано, представляет собой выдающийся пример возвращения жизни прибрежной территории (рис. 2). Несмотря на свою основную музейную функцию, комплекс расположен на самой кромке воды и выполняет роль причального фронта для частных и прогулочных судов, интегрируя транспортную составляющую в культурную среду. В этом проекте успешно используется современная архитектура для превращения ее в центр притяжения. Архитектурное решение в виде масштабной кровли-паруса объединяет несколько зданий, а созданная система каналов и мостиков делает набережную доступной и интересной для горожан в течение всего года. Этот объект наглядно демонстрирует, как причальная функция может стать органичным дополнением к мощной культурной доминанте, формируя новое качество городского пространства.

Рис. 2. Музейный комплекс AstrupFearnley в Осло

Терминал Värtan в Стокгольме является одним из примеров многофункционального транспортного узла (рис. 3). Его ключевой архитектурной особенностью является эксплуатируемая кровля, на которой разбит полноценный общественный парк с прогулочными дорожками, зелеными насаждениями и местами для отдыха. Для Углича это решение служит эталонным примером того, как эффективно использовать площадь здания в условиях дефицита пространства: зимой парк на крыше может превращаться в площадку для световых инсталляций, ледяных скульптур или зимних прогулок, сохраняя визуальную и физическую связь горожан с рекой даже в период отсутствия навигации.

Помимо уникальной ландшафтной зоны, терминал Värtan интегрирует в себя широкий спектр дополнительных функций: внутри здания расположены современные ресторанные зоны с панорамным видом, торговые галереи и выставочные пространства. Особое внимание уделено логистике и экологичности: терминал связан с городом продуманной сетью велодорожек и общественным транспортом. Таким образом, объект перестает быть закрытой транзитной функцией, превращаясь в гибридное пространство, где транспортная функция соединяется с рекреацией, бизнесом и городской культурой.

Рис. 3. Терминал Värtan в Стокгольме

Таким образом, архитектурная модель вокзала в Угличе строится на принципе тесной взаимосвязи ключевых аспектов: транспортная функция обеспечивает поток, культурная — смысл, а коммерческая – устойчивость.

Опираясь на мировой и отечественный опыт, мы предлагаем проектное решение речного вокзала в Угличе, которое обобщает практики Стокгольма, Осло и Москвы, адаптируя их под масштаб исторического города.

Вместо узкоспециализированного терминала создается многофункциональная точка притяжения, где транспортная составляющая интегрирована в общественное пространство. Ключевым преимуществом проекта является внедрение адаптивной планировки, основанной на двух сезонных сценариях использования. В летний навигационный период здание функционирует как полноценный транспортный узел, обеспечивающий бесперебойную работу зон регистрации, залов ожидания и туристических инфо-центров. С завершением навигации, внутреннее пространство трансформируется: залы ожидания начинают использоваться как лектории и выставочные площади. При этом эксплуатируемая кровля превращаются в площадки для зимнего отдыха – от ледовых инсталляций до рождественских ярмарок. Такой гибкий подход позволяет победить сезонность, превращая вокзал в центр городской активности и обеспечивая объекту экономическую устойчивость целый год.

В проекте используется принцип максимального сближения с акваторией. Вокзальный комплекс перенесен на самый нижний уровень набережной, где объемы зданий располагаются непосредственно на воде. Такое решение стирает границу между берегом и рекой, а также помогает сберечь историческую панораму Углича, не закрывая ее.

Учитывая близость Угличского Кремля, речной вокзал не должен доминировать над исторической застройкой. Чтобы органично вписать современный комплекс в контекст

города, в отделке применяются материалы – дерево и архитектурный текстиль. Это позволяет выстроить деликатный визуальный диалог между новой эстетикой вокзала и традиционной фактурой исторической застройки.

Проект не ограничивается только зданием вокзала — это работа с фрагментом пешеходной территории, связывающая транспортные узлы, места отдыха и культурные объекты. Вдоль береговой линии располагаются рыбацкие домики, которые подчеркивают идентичность Углича как города у воды, а также создаются разнообразные места для отдыха и прогулочные маршруты. Такое наполнение превращает набережную из пустого транзитного берега в живое общественное пространство.

Подводя итог, можно сказать, что проектирование нового речного вокзала в Угличе – это полноценная «перепрошивка» городской среды. Современный подход требует превратить вокзал в живое, гибкое пространство, которое будет приносить пользу городу весь год, а не только в сезон навигации.

Главный вызов здесь – победить сезонность через архитектурную трансформацию. Опыт Стокгольма и Осло наглядно показывает, что причальная функция может и должна соседствовать с культурой и отдыхом. Если летом здание работает на прием круизных теплоходов, то зимой оно может превращаться в центр городской жизни: коворкинги, выставочные залы, кафе с видом на Волгу или базы для зимнего спорта. Эксплуатируемая кровля облагораживание набережной делают объект не закрытым режимным учреждением, а точкой притяжения, рассчитанной на современные туристические потоки и отвечающей требованиям к комфорту.

При этом для Углича критически важна деликатность. Новый комплекс не может спорить с ансамблем Кремля и исторической застройкой или подавлять его своей массой. Его задача — стать органичным продолжением «речного фасада». Это инвестиция в будущее Углича, где историческое наследие гармонично сочетается с комфортом и динамикой современной жизни, превращая город в эталонный пример ревитализации прибрежных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Кудашкина, В.Ю. Дизайн городской среды и развитие речных вокзалов в России // Бизнес и дизайн ревю. – 2023. – № 1 (29). – С. 86-97.

2) Ионов, Б.В. Архитектура речных вокзалов и павильонов / Б.В. Ионов. – Москва: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951. – 107 с., ил.

3) Васильев, Е.В. О типовых проектах речных вокзалов // Tatlin: [сайт]. – URL: https://tatlin.ru/articles/o_tipovyx_proektov_rechnyx_vokzalov

4) История одного здания: Северный речной вокзал // Культура.рф: [сайт]. – URL: https://www.culture.ru/materials/256721/istoriya-odnogo-zdaniya-severnyi-rechnoi-vokzal

УДК 725.94

СИНТЕЗ МЕМОРИАЛЬНОЙ И ОБЩЕСТВЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В АРХИТЕКТУРЕ НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРА АКТИВНОЙ ПАМЯТИ АРСЕНАЛ В АРГЕНТИНЕ

А.С. Смирнова, Е.А. Павлов, Н.В. Смирнов

Научный руководитель – **Н.В. Смирнов**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье исследуется архитектурный конфликт между необходимостью сохранения мемориальной тишины и внедрением активных общественных функций на территории бывшего центра пыток «Арсенал Мигель де Аскуэнага» в Тукумане. Анализируются методы пространственного зонирования, сценарного маршрутирования и контрастной морфологии, позволяющие сосуществовать скорби и городской жизни в рамках концепции «активной памяти».

***Ключевые слова**: архитектура, активная память, мемориальная архитектура, среда как экспонат, посттравматический ландшафт, архитектурная метафора*

THE PROBLEM OF SYNTHESIZING THE MEMORIAL AND PUBLIC COMPONENTS IN ARCHITECTURE: THE CASE OF THE ARSENAL ACTIVE MEMORY CENTER IN ARGENTINA

A.S. Smirnova, E.A. Pavlov, N.V. Smirnov

Scientific Supervisor – **N.V. Smirnov**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article explores the architectural conflict between the need to preserve memorial silence and the introduction of active public functions on the territory of the former Arsenal Miguel de Ascuenaga Torture center in Tucuman. The methods of spatial zoning, scenario routing, and contrasting morphology are analyzed, allowing grief and urban life to coexist within the framework of the "active memory" concept.

***Keywords**: architecture, active memory, memorial architecture, environment as an exhibit, post-traumatic landscape, architectural metaphor*

Завершение судебного процесса над военным режимом в Аргентине и скорое снятие ограничений на использование территории бывшего арсенала «Мигель де Аскуэнага» в городе Сан-Мигель-де-Тукуман ставит перед архитекторами и градостроителями уникальную профессиональную и этическую задачу. Там где в 1976-1978 годах функционировал центр незаконного удержания, пыток и уничтожения людей, предстоит создать мемориальный комплекс – «Парк памяти Арсенал». Данное общественное пространство, призвано сочетать фиксацию исторической травмы с активной городской жизнью. Задача, поставленная конкурсом Inspireliawards, лежащая в основе данного исследования, предлагает концепцию «активной памяти», которая выходит за рамки пассивного музейного созерцания и требует включения в проект обширной социальной функции.

Однако именно здесь возникает ключевое противоречие. Программа Центра интерпретации предписывает одновременное существование двух гетерогенных систем деятельности: тематической (сохранение и экспонирование следов преступлений барака–Галпон 9, братских могил) и комплементарной (концертный зал, амфитеатр, академический комплекс). Первая требует тишины, сакральности и документальной строгости; вторая — многолюдья, шума, открытого диалога и эмоциональной разрядки. Как эти две системы могут сосуществовать на одной территории, не разрушая друг друга? Какие методы возможно применить для решения данного противоречия?

Целью данной работы является выявление методик, которые могут быть применены для работы с данным проектом и оценка уместности их применения.

Задачи, которые необходимо выполнить при работе над данным проектом:

1. Определить проблематику градостроительной ситуации;
2. Выявить пути решения градостроительной задачи;
3. Выявить пути решения архитектурно-стилистической задачи;
4. Подтвердить уместность данных решений путем сравнения с функциональными аналогами.

Проблематика проектной задачи:

Обсуждаемая территория находится на северной границе города Сан-Мигель-Де-Тукуман, с западной части ее границы определяет автомобильное шоссе, с восточной части - дорога местного значения.

Будучи некогда закрытой территорией, данный участок, находясь между двумя жилыми кварталами, разделяет их градостроительно. Важной задачей проектной работы является создание связи между данными районами.

Территория бывшего арсенала имеет в своей основе линейную структуру. Бараки выстроены перпендикулярно осевому проспекту, который сориентирован в направлении ЮЗ-СВ. Направление данной оси диссонирует с направлениями квартальной застройки города, что затрудняет работу по включению его в генплан будущей территории.

Главным противоречием при создании архитектурного решения является необходимость объединить мемориальную составляющую и комплекс общественных зданий, призванный сделать данную территорию точкой привлечения для всего города.

Бараки бывшего арсенала не представляют архитектурной ценности как сооружения; их ценность заключается в планировочной структуре, масштабе открытых пространств и самой атмосфере места. Архитектурное решение должно учитывать этот факт и работать с ним.

Помимо вышеперечисленного, важной проблемой является создание образа для новой архитектуры. Архитектура должна быть достаточно яркой, чтобы являться точкой притяжения посетителей, но при этом соответствовать характеру и историческому контексту данной территории.

Предполагаемые методики решения проектной задачи:

Задача обеспечения градостроительной связи между жилыми кварталами, находящимися с востока и с запада от территории, может быть решена посредством создания в данном месте рекреационной зоны, планировка которой будет являться объединяющим узлом для уличной сети, обеспечивая непрерывность городской среды. Применение парковых территорий в качестве связи между городскими кварталами имеет место во многих городах, в качестве примера можно привести парк ВДНХ в г. Москва.

Чтобы соединить условно регулярную структуру южного парка, линейно ориентированную историческую застройку и свободную планировочную структуру северного парка мы предлагаем применить систему их нескольких площадей, которые будут выступать как точки артикуляции в планировочном решении и «зоны интереса» в архитектурном.

Проблема синтеза общественной и мемориальной составляющей может быть решена при помощи стилистического и смыслового подразделения парка на зоны, в основе котрого будет лежать принцип «среда как главный экспонат». Данная практика применена, например, при создании парка на территории бывшего города Коулун, где в качестве ядра была использована сохранившаяся городская площадь с единственным уцелевшим историческим зданием. При этом общественная часть комплекса визуально взаимодействует со средой без перенятия стилистических приемов, лишь тонко отсылая к ним, что необходимо для обеспечения визуальной преемственности.

В качестве методики для работы с архитектурным решением нами был выбрано метафорическое осмысление создаваемого нами образа. Примером данного подхода может

служить Сиднейский оперный театр, где образ морской фауны был заложен во многом для соответствия среде в окружающей строение.

В ходе работы нами было разработано решение, опирающееся на тектонический образ национального символа Аргентины – цветка эретрина петушиный гребень. Мелкая пластика же решается через работу с фактурой природного материала, что соответствует парковому характеру всего комплекса, и биоморфному характеру тектонического решения.

Применение природной символики в формообразовании крупных общественных сооружений позволяет вписать объект в ландшафтный контекст, а также наделить его функцией культурной репрезентации, что подтверждается опытом реализации таких проектов, как «Сады у Залива» в Сингапуре, где структуры, отсылающиеся к природным, стали визуальным каркасом всей рекреационной среды, а образ является архитектурной метафорой национального растения. Таким образом, достигается органическое единство конструктивной системы и семантики места, где тектоника сооружения выступает прямым продолжением пластики антропогенного ландшафта.

Заключение

Выбранные методы решения архитектурной и градостроительной задачи имеют место в мировой практике, их применение уместно при работе с данной задачей, что подтверждает сравнение с аналогами.

Эти пути позволяют создать гармоничный синтез мемориальной и общественной составляющей, при этом выполняя не только внутренние задачи комплекса, но и органично вписываясь в городскую среду, решая ее проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Бойко, Д.С. Сад и парк в формировании городского пространства (сравнительный анализ современных тенденций). – URL https:://cyberleninka.ru/article/n/sad-i-park-v-formirovanii-gorodskogo-prostranstva-sravnitelnyy-analiz-sovremennyh-tendentsiy

2) Лисенкова, П. Палимпсест в архитектуре // cih.ru: [сайт]. – URL: https://cih.ru/wp/bld/2024/01/09/палимпсест-в-архитектуре/

3) Сад и парк в формировании городского пространства (сравнительный анализ современных тенденций // Архитектура СССР. – 1939. – № 5. – С. 57-59. – URL: https://www.niitiag.ru/metafora_i_sravnenie_v_arkhitekture.html

4) Дженкс, Ч. Язык архитектуры постмодернизма / Ч. Дженкс. – Москва, 1985.

5) Inspirelli Awards: официальный сайт. – URL: https://www.inspireli.com/en/competitions/arsenal

УДК 728.48

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВОРЦОВ КУЛЬТУРЫ: ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ

А.А. Соловьева

Научный руководитель - **Е.В. Митрофанова**, канд. искусствоведения, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматриваются основные исторические этапы развития дворцов культуры, особое внимание уделяется вопросам планировочных решений, оптимизации вместимости и организации потоков посетителей, что напрямую влияет на эффективность и безопасность эксплуатации.

Ключевые слова: *дворец культуры, планировочные решения, многофункциональность*

METHODOLOGY FOR DESIGNING CULTURE PALACES: PRINCIPLES AND APPROACHES

A.A. Soloveva

Scientific Supervisor - **E.V. Mitrofanova**, Candidate of Criticism, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article examines the main historical stages of the development of cultural palaces, with a focus on planning solutions, optimizing capacity, and managing visitor flows, which directly affects the efficiency and safety of operation.

Keywords: *Palace of Culture, planning solutions, and multifunctionality*

Дворцы культуры – этообъекты включающие в себя множество функций, основными из которых являются: развлекательная, образовательная и культурная. Именно это создаёт сложность проектирования универсального архитектурного решения (рис. 1).

Развитие дворцовой архитектуры стало истоком появления дворцов культуры. В европейской традиции дворец постепенно обретал свою структуру и функциональный смысл как «топос» культурного и политического влияния, становясь не только жилым комплексом, но и символом власти и культурного наследия. В России XVIII века этот процесс принял иной характер – Дворцовые резиденции возникли сразу как комплексно спланированные сооружения с регулярной планировкой, что отражало заимствование и целостное восприятие европейского художественного опыта XVII века.

Рис 1. Историческая фотография дворца культуры

Позже когда началось советское время, дворцы культуры начали переставать быть символами власти, а приобрели новое значение – общественно-культурное учреждение. Здания с таким значением начали массово распространяться по всей территории СССР.

Важнейшей частью при строительстве дворцов культуры в сегодняшнее время является грамотное и плавное сочетание старого и нового. Новое здание должно поддерживать соотношение масштаба и пропорции с существующей окружающей архитектурой. Следовательно, должен быть проведён анализ градостроительной среды с соблюдением её характерных черт.

Сегодня дворцы культуры рассматриваются как единое пространство, совмещающее в себе такие функции как: образовательная, культурная и социальная. Именно поэтому особое значение при создании планировочного решения имеет многофункциональность. Для этого в методологическом процессе требуется глубокий анализ по выявлению потребностей целевых групп, это основа проектного решения.

Многофункциональные зоны проектируются с учётом необходимости быстрой трансформации и эргономичного оснащения, что обеспечивает универсальности и долговечность архитектурного решения.

Для проектирования дворцов культуры характерна структура применения свободных планировок с минимальным количеством несущих конструкций внутри здания. Чтобы реализовать это, при проектировании начинают использовать мобильные перегородки и трансформируемую мебель, кроме того, предусматривается высокая степень технической оснащённости - интеграция адаптивных систем освещения, звукового оформления и климат-контроля, которые могут менять параметры в зависимости от вида деятельности и количества участников. Но также важным является зонирование по принципу приватности - открытые общественные пространства соседствуют с помещениями для занятий и репетиций, что минимизирует взаимные помехи и обеспечивает комфорт для всех групп пользователей.

Самой важной частью в дворце культуры является зрительный зал, ведь именно от его вместимости зависят комфорт посетителей, безопасность и функциональность помещения (табл. 1).

Таблица 1. Типы зрительных залов и их характеристики

Тип зрительного зала	Вместимость зала, чел.	Функции зала
Зал-аудитория	100-500	Лекции, кинопоказы, некоторые виды концертов.
Универсальные рекреации	150-500	Массовые и аншлаговые зрелищные программы, включая театрализованные представления и шоу.
Зрительный зал	400	Концерты, театральные представления и шоу; часто дополняются вспомогательными помещениями - раздевалки, танцевальные и оркестровые кружки, технические зоны для звукопроекции и освещения.

Важна также высота потолков, обеспечивающая комфортное акустическое восприятие. Фойе с буфетом и зонами отдыха располагаются таким образом, чтобы обеспечивать свободные потоки посетителей, минимизируя скопления в проходах и входных зонах.

Помимо зрительных залов во Дворцах культуры должны быть помещения, специализируемые под различные кружки, такие как хоровой и танцевальный зал, изостудии, читальные и игровые комнаты. Эти пространства организуются с учётом требований к освещению и акустике, а также размещены таким образом, чтобы избежать конфликта мероприятия с разной степенью шума и активности. Так как дворец культуры это общественное здание подразумевающее нахождение в здании большое количество людей, важнейшим аспектом является проектирование широких эвакуационных выходов и минимальное количество узких проходов. Организация маршрутов движения зрителей и

персонала помогает предотвратить заторы и обеспечивает быстрое реагирование в экстренных ситуациях (рис. 2).

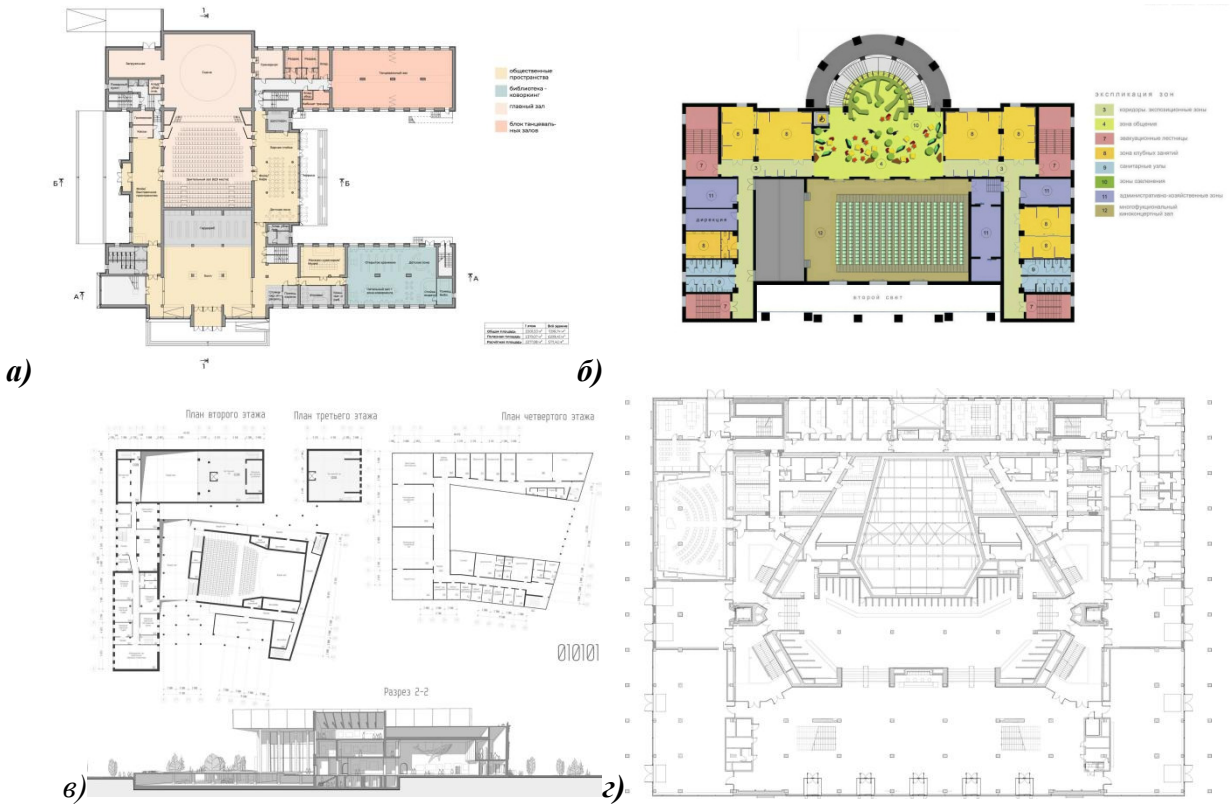


Рис. 2. *а*) Дворец культуры им. Т.Н. Хренникова;
_б_) Проект дома культуры «Зодчие» в Москве; _в_) Проект культурного центра им. В.Г. Короленко в Ижевске. Архитектурное бюро «CUBICA»;
_г_) Дворец культуры в Дрездене

Просмотрев несколько примеров планировочного решения, можно сделать вывод о том, что продуманная планировка и расчёт вместимости являются основной создания комфортных общественных пространств в Дворцах культуры. Их грамотная организация гарантирует удобство перемещения посетителей, безопасность и функциональное разделение зон, что способствует улучшению общей атмосферы и повышению качества культурно-досуговых мероприятий. Именно эти факторы влияют на положительный опыт и удовлетворённость аудитории, обеспечивая долгосрочную привлекательность и эффективность учреждения.

Заключение исследования подводит итог о том, что методология проектирования на основе системного подхода позволила определить ключевые принципы: многофункциональность, адаптивность, эргономичность, и необходимость учёта локальных культурных и исторических факторов.

Архитектурные решения, реализующие свободные планировки с мобильными и трансформируемыми элементами, создают условия для эффективного использования помещений и реализации различных сценариев мероприятий.

А успешное проектирование дворцов культуры возможно лишь при сочетании традиционных архитектурных ценностей с инновационными техническими и методологическими решениями

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Колесникова, Т.Н. Анализ архитектуры современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов и тенденции их развития / Т.Н. Колесникова, П.Э. Кузнецов // Вестник

МГСУ. – 2023. – №3. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-arhitektury-sovremennyh-mnogofunktsionalnyh-kulturno-zrelischnyh-kompleksov-i-tendentsii-ih-razvitiya (15.12.2024).

2) Дворец в истории русской культуры. Опыт типологии... // LiveLib: [сайт]. – URL: https://www.livelib.ru/book/119905/readpart-dvorets-v-istorii-russkoj-kultury-opyt-tipologii-l-v-nikiforova/~12

3) Контекстуальная архитектура: принципы проектирования зданий... // Архградо: [сайт]. – URL: https://arhgrado.ru/informatsiya/kontekstualnaya-arkhitektura-printsipy-proektirovaniya-zdanij-s-uchetom-istoricheskoj-i-kulturnoj-sredy

4) Проектирование клубов: пособие к СНиП 2.08.02-89. – Москва: Стройиздат, 1991. – URL: https://files.stroyinf.ru/Data1/6/6134/

5) Дворец культуры в Дрездене // archi.ru: [сайт]. – URL: https://archi.ru/projects/world/14611/dvorec-kultury-v-drezdene-rekonstrukciya

6) Архитектура и проектирование. Архитектурные конкурсы // Totalarch: [сайт]. – URL: https://totalarch.com/cultural_center_korolenko/0101

УДК 72.025.5

РЕГЕНЕРАЦИЯ СТАРИННОЙ УСАДЬБЫ

Ю.С. Терехина

Научный руководитель – **М.Е. Баталова**, ст. преподаватель, магистр архитектуры

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается мировая усадебная архитектура в условиях регенерации, с сохранением подлинных конструктивных и декоративных элементов и приспособлением под музейно-гостиничную функцию. Проведён сравнительный анализ мировых функциональных и архитектурных решений. Обоснован выбранный подход к приспособлению и восстановлению усадьбы Григорьевых-Супоневых в городе Углич, в рамках дипломного проектирования.

***Ключевые слова**: усадьба, регенерация, приспособление, памятник архитектуры, объект культурного наследия, дворец Григорьевых-Супоневых*

REGENERATION OF AN ANCIENT MANOR

Y.S. Terekhina

Scientific Supervisor – **M.E. Batalova**, Senior Lecturer, Master of Architecture

Yaroslavl State Technical University

The article examines the world manor architecture in terms of regeneration, while preserving authentic structural and decorative elements and adapting them to the museum and hotel function. A comparative analysis of the world's functional and architectural solutions has been carried out. The chosen approach to the adaptation and restoration of the Grigoriev-Suponev manor estate in the city of Uglich, as part of the diploma design, is substantiated.

***Keywords:** the manor, regeneration, adaptation, architectural monument, cultural heritage site, Grigoriev-Suponev Palace*

Старинные усадьбы являются значимыми элементами культуры и истории. В России они представляли уникальный социокультурный феномен, объединявший архитектуру, быт и общественную жизнь дворянства. Однако последствия революции привели к разрыву этого уклада: исчезла функция усадьбы как формы жизни и хозяйствования, а архитектурное наследие постепенно пришло в упадок. Возросший в последние годы интерес к национальной истории, культуре и быту привёл к возрождению внимания к усадьбам – как к форме существования и архитектурной типологии. Поэтому проблема восстановления и сохранения памятников усадебной архитектуры в наше время как никогда актуальна.

В мировой практике всё чаще применяют стратегию адаптации исторических объектов под современные функции, соответствующие статусу объектов культурного наследия.

В странах Европы широко распространена практика приспособления усадеб и замков под музеи и (или) гостиницы, бутик-отели, культурно-познавательные и туристические комплексы, частное жильё, образовательные организации. Для дополнительного дохода организуют рестораны, кафе, чайные заведения и магазины, а вход на территорию многих усадеб Франции и Италии делают платным. Усадебно-парковые территории благоустраивают, сохраняя «дух места», и открывают для экскурсий, самостоятельных ознакомительных прогулок и различных мероприятий, таких как частные праздники, костюмированные балы-реконструкции, театральные представления и концерты. В английских усадьбах устраивают исключительно особенные для данных мест развлечения - запускание воздушных змеев, велопрогулки, партии в гигантские шахматы.

В отличие от европейских земель, в России сохранение и приспособление старинных усадеб только начинает набирать обороты. С Советского периода приспособление национализированных усадеб развивалось по направлениям музеефикации, оздоровительных (санатории, дома отдыха, психлечебницы и т.д.) и социальных учреждений (детские дома, интернаты). Проблема последних двух функций – ограниченность доступа к объектам культурного наследия, их свободному изучению. Сейчас набирает популярность приспособление усадьбы под гибридный комплекс, содержащий музейно-гостиничную функцию с дополнительными торговым, ремесленным, выставочным направлениями, а также проведением мероприятий, организацией предприятий общепита – всё это вносит культурное и экономическое разнообразие.

Краткие выводы по популярным направлениям функционального приспособления исторических усадеб:

- Музеефикация усадеб – наиболее консервативный способ адаптации, сочетает сохранение исторической среды с функцией экспозиции и формированием музейно-заповедных комплексов. Здесь могут использовать принцип реконструкции интерьеров по архивным изображениям или аналогам, в случае утраты оригинала.
- Приспособление усадеб под гостиницы формирует уникальный туристический продукт на основе сочетания исторической атмосферы и современных стандартов комфорта в адаптированных планировках. Данный метод является эффективным и выгодным способом сохранения усадебного наследия.
- Наиболее устойчивым вариантом сохранения исторических усадеб является комбинированная схема, сочетающая в себе музейно-гостиничную, лекционно-выставочную функции, устройство мастерских и предприятий общественного питания, одновременно с благоустройством приусадебной территории и расширением в её сторону основных функций и внедрение дополнительных. Такая структура одновременно обеспечит финансовую устойчивость и сохранение объекта культурного наследия, его поэтапное восстановление и расширение, что в итоге приведёт к созданию полноценного общественно-туристического комплекса как точки притяжения.

С архитектурной точки зрения, наиболее востребованы методы консервации, реставрации и реконструкции исторических усадеб:

- консервация обеспечивает сохранение существующего состояния объекта без значительных изменений и предотвращает его дальнейшее разрушение;
- научная и комплексная реставрация точно восстанавливает утраченные элементы на основе архивных данных и натурных исследований. Используется в случае крайней необходимости;
- реконструкция воссоздаёт утраченные части объектов в условиях их авторского переосмысления и бережного отношения к сохранившимся частям усадьбы, подчёркивая их главенство. Воссозданные фрагменты в таком случае решаются фоново, контекстуально.

В европейской практике используют все перечисленные методы, относясь к историческим усадьбам как к величайшей историко-культурной ценности, которая должна быть сохранена и популяризирована. Применяют как реставрацию, в случаях небольших утрат, так и консервацию руин с приспособлением, без дальнейшего вмешательства в архитектуру и попыток скрыть неприглядные отпечатки времени.

В Российской практике явное преимущество отдаётся научной и комплексной реставрации усадеб: Марьино (Строгановых), Хмелита, Гребнево. Прослеживается тенденция к восстановлению первоначального вида или облика «на момент», даже из состояния руин (усадьба Хмелита, Царицыно), что может привести к потере подлинности, стирая следы событий, травмировавших наследие, вставая на грань с новоделом.

В условиях высокой сложности, длительности и стоимости реставрации, как предпочитаемого в настоящий момент метода, а также низкой её возможности в ситуации руинированности, множество усадеб продолжают находиться в плачевном состоянии, разрушаться.

Разберём более конкретно на мировых примерах варианты приспособления исторических усадеб и архитектурных подходов к их сохранению и восстановлению.

Усадьба Пядасте на острове Муху в Эстонии, была отреставрирована и приспособлена под отель в 1996 году, после попеременной смены функций в советский период: от армейского штаба до дома престарелых, и окончательного забвения в 1980-х годах. Данный пример отражает важность адаптации объектов культурного наследия под функции, соответствующие исторической структуре, с сохранением, а не ухудшением их дальнейшего состояния (рис. 1).

Рис. 1. Усадьба Пядасте на острове Муху, Эстония

Замок Астли в Уорикшире, Великобритания – укреплённое поместье 12 века, которое в условиях ограниченного бюджета было подвергнуто консервации и реконструкции с приспособлением под дом отдыха архитектурной студией Witherford Watson Mann Architects (рис. 2).

Двухэтажный объём вписан в массивные стены руин из песчаника. Утраченные участки стен заполнили кирпичной кладкой, создав контраст между старым и новым: «…восстановили его целостность, сделали устойчивым, соединили части, но сохранили ощущение незавершенности, оставив незажившие раны».

Рис. 2. Замок Астли в Уорикшире, Великобритания

Усадьба Скорняково-Архангельское в Липецкой области, Россия – пример сочетания реконструкции, реставрации и нового строительства (рис. 3, 4). Поместье приспособлено под музейно-гостиничную функцию, имеет несколько видов расселения: от гостиничных номеров различной конфигурации в восстановленном главном усадебном доме и флигеле до изб с террасами и отдалённых приречных гостевых домов для уединённого отдыха на природе. В здании бывшей приусадебной ткацкой фабрики разместили ресторан, а концертные, выставочные и банкетные залы для различных мероприятий устроили в конюшнях и дворовых постройках. В усадьбе проводят концерты, фестивали и творческие вечера, устраивают сезонные развлечения, предоставляют аудиоэкскурсии и пр.

Рис. 3. Усадьба Скорняково-Архангельское в Липецкой области, Россия

Рис. 4. Усадьба Скорняково-Архангельское в Липецкой области, Россия

Мировой опыт показывает, что в наиболее эффективных проектах исторические объекты интегрируются в современную культурную и туристическую среду. Музейная и гостиничная функции выступают ключевыми инструментами сохранения и актуализации усадебного наследия.

Усадьба Григорьевых-Супоневых в Угличе имеет сложную историю: от дворянского имения с поэтапной историей строительства и расширения, до учительской семинарии,

молодёжного клуба, психлечебницы, детского сада, жилого дома… утратила большую часть объёмов при строительстве Угличского гидроузла (1930-1940-е годы), и все конструкции, кроме стен, на этапе демонтажа для её нереализовавшегося приспособления под туристический центр. На данный момент остатки объекта руинированы, мы близки к полной утрате исключительного примера раннего провинциального классицизма второй половины XVIII века.

Концепция регенерации Угличской усадьбы учитывает большой объём утрат исторического наследия, руинированность сохранившихся фрагментов, расположение на обрывистом берегу, что связано с высокой трудоёмкостью и стоимостью работ, включая необходимость берегоукрепления. В сочетании с ограниченностью доступных архивных текстовых и графических материалов, эти обстоятельства не исключают возможность комплексной реставрации, но ограничивают её применение на данном объекте до уровня консервации и фрагментарной очистки поздних наслоений, рассматривая регенерацию как осторожное и обоснованное решение, направленное на сохранение подлинности архитектурного наследия и предотвращение избыточного прямого воссоздания.

Таким образом, согласно принципам Афинской и Венецианской хартий, необходимо сохранить оставшиеся ценные фрагменты усадьбы через консервацию, а восполнение большого объёма утрат выполнить на уровне силуэта и контекста. Визуальное преимущество отдаётся руинам, как дань уважения истории усадьбы. Руины в данном случае – свидетели ошибок прошлого, которое не стоит прятать, и пусть данный проект станет визуальным напоминанием о важности своевременного бережного отношения к архитектурному наследию.

Сохранившиеся кирпичные стены усадьбы предлагается очистить от штукатурных и окрасочных наслоений с целью раскрыть кладку и очистить визуальное восприятие пластики фасадов. Принимая во внимание разновременную этапность возникновения объёмов усадьбы, визуально отличающиеся по параметрам кирпичной кладки, в восполнении участков утраченного силуэта решено использовать материалы, контрастные по отношению к историческим и фоновые по отношению к фактуре и декору. Планируется создание самостоятельных внутренних опорных конструкций под перекрытия и покрытие для минимизации нагрузки на руины. Также предусмотрена облегчённая конструкция из металлокаркаса и стекла в объёме, воссоздаваемом на обрывистом участке берега.

Дворец Григорьевых-Супоневых с прилегающей территорией будет приспособлен под многофункциональный комплекс, сочетающий в себе гостиничную, музейную, лекционно-выставочную функции, функцию общественного питания. Комплекс предлагает три вида расселения – гостиничные номера внутри здания усадьбы, жилые флигели-апартаменты и коттеджи, дополнительно возводимые на территории. Посетители могут принять участие в мероприятиях и мастер-классах, проводимых в мастерских и оранжерее приусадебного парка. Детские комнаты и многофункциональные арендуемые пространства разместятся в отапливаемых парковых павильонах, возводимых на месте каменных жилых домов, где ранее проходили жилые улицы Кашинская и Большая Всехсвятская, позднее смещённые на один «ход» от реки. В благоустройстве парка будет создана сеть прогулочных аллей, экологические тропы и паломническая дорога между усадьбой и утраченными церквями.

Проведённые исследования мирового и отечественного опыта приспособления исторических усадеб, в сочетании с историей места, помогли определиться с подходом в работе над архитектурным обликом поместья и его функциональной программой. Проект регенерации дворца Григорьевых-Супоневых в Угличе призван оказать положительное влияние на архитектурный облик и туристическую привлекательность города, а также внести, хоть и локальный в масштабах страны, вклад в решение проблемы сохранения архитектурного наследия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Яровой, И.Ю. Современное использование усадеб: опыт систематизации / И.Ю. Яровой. // АМІТ: электрон. журн. – 2015 – Вып. 1 (30). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-ispolzovanie-usadeb-opyt-sistematizatsii/viewer (дата обращения: 07.04.2026)

2) Лиуконен, Е.А. Усадебный ансамбль сельца Григорьевского / Е.А. Лиуконен // ГАУК ЯО «Угличский государственный историко-архитектурный и художественный музей»: офиц. сайт. – URL: https://uglmus.ru/about/publics/grigorjevskoje1/ (дата обращения: 07.04.2026)

3) Лиуконен, Е.А. К вопросу о структуре и этапах формирования архитектурного ансамбля сельца Григорьевского. Часть 1 / Е.А. Лиуконен // ГАУК ЯО «Угличский государственный историко-архитектурный и художественный музей»: офиц. сайт. – URL: https://uglmus.ru/about/publics/konferenciay2020/o_selce_grigorevskom_s1/ (дата обращения: 07.04.2026)

4) Лиуконен, Е.А. К вопросу о структуре и этапах формирования архитектурного ансамбля сельца Григорьевского. Часть 2 / Е.А. Лиуконен // ГАУК ЯО «Угличский государственный историко-архитектурный и художественный музей»: офиц. сайт. – URL: https://uglmus.ru/about/publics/konferenciay2020/o_selce_grigorevskom_s2/ (дата обращения: 07.04.2026)

5) AstleyCastle // Witherford Watson Mannarchitects: офиц. сайт. – URL: https://wwmarchitects.co.uk/projects/astley (дата обращения: 07.04.2026)

6) PädasteManorHotel: официальный сайт. – URL: https://www.padaste.ee/ (дата обращения: 07.04.2026)

7) Усадьба Скорняково-Архангельское: официальный сайт. – URL: https://usadba-nadonu.ru/ob-usadbe (дата обращения: 07.04.2026)

УДК 72.03

ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ ПОСТМОДЕРНИЗМА В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Д.С. Титов, С.В. Расторгуев

Научный руководитель – **С.В. Расторгуев,** ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье исследуется жизнеспособность постмодернизма в современной архитектуре. Анализируются его художественные и композиционные принципы, а также их трансформация в архитектуре XXI века. Рассматриваются актуальные архитектурные примеры, демонстрирующие переосмысление постмодернистских идей в условиях цифрового проектирования и глобализации. Делается вывод о сохранении значимости постмодернистских принципов как части современной архитектурной практики.

Ключевые слова: *постмодернизм, трансформация архитектурных принципов, современная архитектура, контекстуальность, символизм, эклектика, культурная идентичность*

THE VIABILITY OF POSTMODERNISM IN CONTEMPORARY ARCHITECTURE

D.S. Titov, S.V. Rastorguev

Scientific Supervisor – **S.V. Rastorguev**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

This article examines the vitality of postmodernism in contemporary architecture. It analyzes its artistic and compositional principles, as well as their transformation in 21st-century architecture. It examines current architectural examples that demonstrate the reinterpretation of postmodernist ideas in the context of digital design and globalization. The conclusion is drawn that postmodernist principles remain significant as part of contemporary architectural practice.

Keywords: *postmodernism, transformation of architectural principles, contemporary architecture, contextuality, symbolism, eclecticism, cultural identity*

Постмодернизм в архитектуре возник во 2-й половине 1960-х годов как реакция на абстрактный рационализм модернизма. Приверженцы постмодернизма стремились опереться на историческую традицию и эмоциональное воздействие в противовес чисто функциональной рациональности модернизма. Как отмечается в литературе, архитектура этого направления отличается вниманием к контексту, стилевым плюрализмом, доходившим до радикальных форм, историзмом, учётом мнения заказчика и публики. Главной отличительной чертой постмодернизма стало осознание двойного кодирования и символичности формы: здания говорят с горожанами через цитаты из истории и игру форм. В данной работе рассматриваются ключевые художественные приёмы классического постмодернизма, их трансформация в XXI веке и актуальность постмодернистских принципов в современной архитектуре.

Одной из характерных особенностей постмодернистской архитектуры является активное использование исторических элементов как цитат или символов. Этот стиль стремится к столкновению логик разных архитектурных эпох и языков. Архитектурный объект становится «текстом», включающим фрагменты «чужих текстов» – например, рустованные колонны, фронтоны, купола или традиционные ордера, помимо чисто современных конструкций. Главное для постмодернизма – вызвать ассоциативный диалог: здание подсознательно отсылает пользователя к знакомым историческим образам. Именно поэтому в зданиях выбираются характерные символы той или иной эпохи. Для любой постмодернистской практики характерны исторические аллюзии. Появление таких цитат часто несёт ироничный смысловой оттенок – подобно литературной игре автора со вторым кодом – и ставит задачу деконструкции культа новизны. Например, в конце XX века

появлялись проекты, где классические элементы дорический ордер, барочные детали нарочно обрамлялись яркими цветами и несвойственными пропорциями, превращаясь в игрушку из арсенала поп-культуры.

Не менее важным признаком постмодернизма стала свободная игра формами и эклектика в дизайне. В отличие от строгого функционализма модернизма, постмодернизм допускает радикальный эклектизм, который предполагает вседозволенность смешения архитектурных стилей. Это означает, что здание может соединять несовместимое: например, разные классические ордера или черты модернизма с мотивами барокко, создавая эффект коллажа архитектурных элементов. Одновременно игра понимается как вполне серьёзная стратегия поиска смысла – то есть приемы иронии и сюрприза несут интерпретационный заряд. Ироничный жест, пародийный или гротескный акцент, дестабилизирует привычные читабельные формы и заставляет зрителя активнее участвовать в разгадывании замысла. Архитектурная композиция нередко напоминает подобие визуального рассказа, где смелая форма и неожиданные детали работают как метафоры. В целом постмодернистская эклектика отличается преодолением шаблонов: она исключает слепое подражание прошлому и интерпретирует исторический опыт свободно, как бесконечный процесс превращений форм. Условная «смерть автора» в этом диалоге означает, что здание само по себе не является законченным высказыванием – смысл всегда генерируется во взаимодействии с контекстом и восприятием зрителя.

С начала XXI века интерес к классическому постмодернизму заметно ослаб. Современные авторы отмечают, что этот идеологический проект теряет свою онтологическую актуальность и подвергается всё более жёсткой критике. Архитектурные критики указывали на отсутствие новых идей: по их мнению, постмодернизм — культура, которая использует «всё какие угодно предшествующие наработки», но редко предлагает нечто по-настоящему оригинальное. В конце века даже провозглашали смерть постмодернизма как доминирующего стиля. Всё это привело к постепенному отходу от чистых постмодернистских форм. Новые поколения архитекторов стали ориентироваться на другие парадигмы: так, на смену эклектической и игровой логике пришли тенденции деконструктивизма, хай-тека, минимализма, а также возросший акцент на устойчивом развитии и цифровом дизайне. В общем, сменилось поколение архитектурных манифестов, и постмодернизм перестал быть единственно актуальной рамкой.

Несмотря на упадок «чистой» постмодернистской эстетики, многие его идеи пережили переосмысление. Эти принципы легли в основу последующего течения – деконструктивизма, где снова появилась фрагментированность и калейдоскоп смыслов. Кроме того, идея «двойного кодирования» по-прежнему живёт: архитектурное послание продолжают адресовать и экспертам, и широкой публике. Проекты XXI века часто заимствуют игровую стратегию взаимодействия со зрителем, требуя от него самостоятельной интерпретации. Одновременно архитекторы научились «упорядочивать» эклектику в новых контекстах: сохранив любовь к историческим отсылкам и символике, они теперь соединяют их с современными технологиями и социальными задачами. Например, в современной архитектуре можно встретить адаптацию цвета и формы для удовлетворения экологических и социальных требований, при этом сохраняя аллюзии на локальную традицию. Таким образом, даже когда внешний облик проектов меняется (например, появляется упор на прозрачность и «лёгкость» зданий), внутри них всё ещё живут постмодернистские приёмы «текстовой» игры.

В реальных проектах XXI века отдельные постмодернистские приёмы продолжают встречаться в переработанном виде.

Дом для Эссекса (A House for Essex), 2015, Великобритания (FAT Architects + Г. Перри). Построен как «современная интерпретация часовни»: имеет исторические аллюзии, яркий мозаичный декор и нарративный характер фасада. Проект сочетает архаичность и современную культуру, стимулируя местный арт-туризм.

Holmes Road Studios, 2016, Лондон (Peter Barber Architects). Жилой комплекс для бездомных, оформленный как «холмы алмсовых домов» (благотворительных жилищ). Характерны кирпичные своды, круглые окна и колоколовидные формы, отсылающие к традиционным постройкам. Влияние: повышает качество социального жилья и привлекает внимание к социальным проблемам.

Расширение Tate Modern (Switch House), 2016, Лондон (Herzog & de Meuron). Новый блок музея интегрирован в индустриальный контекст бывшей электростанции, использует заводские элементы, стальные фермы, кирпич, отражая контекстуализм. Этот проект не прямой «постмодерн», но продолжает идею учёта среды.

Лувр Абу-Даби, 2017, ОАЭ (Жан Нувель). Здание музея выполнено с учётом местных традиций: купол вдохновлён арабским архитектурным узором *мешрабия* и имитирует дождь света через прорези. Таким образом сочетаются исторические мотивы (арабские орнаменты) с современной формой.

The Shed, 2019, Нью-Йорк (Diller Scofidio + Renfro). Многофункциональное здание с подвижной оболочкой: металлическая оболочка скользит по рельсам, раскрывая пространство. Это пример современной игры форм и гибридизации функций галерея+концертный зал.

Подобным образом современные зодчие порой возвращаются к ритуальному или местному лексикону: будь то фасады с национальными орнаментами или доморощенными детализированными формами, явно заимствованными из местного зодчества. Идеи скрещивания стилей и культур даже легли в основу критического регионализма – направления, формирующего архитектуру с опорой на локальную идентичность. Таким образом, признаки постмодернистской эклектики и кодирования появляются и сегодня, пусть и в ином качестве: они подчёркивают многообразие современного мира и продолжают влиять на дизайн новых проектов.

Наконец, актуальность постмодернистской идеи опоры на исторический контекст подтверждается и сегодня. Архитекторы XXI века часто черпают вдохновение из локальной истории и традиций, чтобы усилить связь здания с окружающим пространством и культурой. Как уже упоминалось, постмодернизм подчёркивал «внимание к контексту» и «историзм» – то есть уважение к наследию места. Это наследие продолжает жить в современных проектах: будь то обновлённое здание в старом квартале или новый городской комплекс, в них вводятся приемы, напоминающие о характерном облике района (материал, пропорции, орнамент). Так, локальные мотивы – от простых форм до сложных асимметричных планов – используются для подчеркивания региональной идентичности и удобочитаемости архитектуры. Следовательно, постмодернистский подход к регионализму и контекстуализации всё ещё востребован: он помогает создавать гармоничную среду, где современное здание резонирует с прошлым «как многообразный диалог культур».

Анализ современных проектов подтвердил гипотезу: ключевые идеи постмодернизма продолжают присутствовать. Во-первых, исторические и культурные отсылки регулярно используются для придания смысла (см. *Дом для Эссекса* и *Лувр Абу-Даби*). Во-вторых, наблюдается широкая игра форм и контекста (пример: *The Shed* с трансформируемой оболочкой). В-третьих, даже в социальной архитектуре появляются «ироничные» или символические элементы (Holmes Road, вдохновлённый традиционными приёмами).

Таким образом, постмодернизм не умер, его влияние эволюционирует: вместо чистой эстетики мы видим идеологию, внедрённую в новые формы. В заключении формулируем выводы: «Хотя «чистый» постмодернизм ушёл из архитектурной практики, его наследие – принципиальные акценты на контексте, истории и символизме – остаются в проектировании XXI века». Приведённые примеры демонстрируют, что современные архитекторы используют «двойное кодирование» как инструмент: они одновременно отсылают к истории и общаются с широкой публикой. Полученные результаты уточняют представление о том,

как старые концепции постмодернизма работают в условиях цифрового века и новых социальных требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Дженкс, Ч. Язык архитектуры постмодернизма / Чарльз Дженкс; пер. с англ. М. Розановой. – М.: Прогресс-Традиция, 2007. – 288 с.

2) Добрицына, И.А. От постмодернизма – к нелинейной архитектуре: Автореф. дис. … д-ра архитектуры. – Москва, 2007. – 45 с.

3) Маслаков, С.В. Критика постмодернизма как глобальный тренд современности // Теория и практика общественного развития. – 2015. – №12. – С. 380-382.

4) Харрис, К. Этическая функция архитектуры: пер. с англ. / Карл Харрис. – М.: Архитектура-С, 2009. – 312 с.

5) Шарп, Е. Архитектуру постмодернизма в Англии признали наследием // The Art Newspaper Russia. – 2018. – 3 октября.

УДК 725.13

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫРАЗИТЕЛЬНОГО АРХИТЕКТУРНОГО ОБРАЗА ДВОРЦОВ БРАКОСОЧЕТАНИЯ: ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

П.Р. Федоренко

Научный руководитель - **М.Е. Баталова**, ст. преподаватель, магистр архитектуры

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается неопределенность архитектурного языка дворцов бракосочетания – типа зданий, где высокая эмоциональная нагрузка церемонии соседствует с безликостью или эклектичностью большинства существующих объектов. Проведён исторический ретроспектив формирования образа: от сакральных прототипов к советскому монументальному модернизму, затем к типовой утилитарности и постсоветскому китчу. Выявлены основные проблемы и позитивные тенденции современного проектирования. Предложена концепция дворца бракосочетания на острове Даманский в Ярославле, где образы «лебедя» и «кольца» становятся инструментом преодоления типовой безликости.

Ключевые слова: *дворец бракосочетания, архитектурный образ, типологическая идентичность, метафора в архитектуре, остров Даманский, лебедь, кольцо*

FORMATION OF AN EXPRESSIVE ARCHITECTURAL IMAGE OF WEDDING PALACES: PROBLEMS AND MODERN TRENDS

P.R. Fedorenko

Scientific Supervisor – **M.E. Batalova,** Senior Lecturer, Master of Architecture

Yaroslavl State Technical University

The article examines the architectural ambiguity of wedding palaces—a building type where the high emotional charge of the ceremony coexists with the impersonality or eclecticism of most existing structures. A historical retrospective of the image's formation is conducted: from sacred prototypes to Soviet monumental modernism, then to standard utilitarianism and post-Soviet kitsch. The main challenges and positive trends in contemporary design are identified. A concept for a wedding palace on Damansky Island in Yaroslavl is proposed, where the imagery of a "swan" and a "ring" becomes a tool for overcoming typical impersonality.

Keywords: *wedding palace, architectural image, typological identity, metaphor in architecture, Damansky Island, swan, ring*

Что может быть важнее места, где рождается семья? Дворец бракосочетания это не просто здание, а место, где начинается новая глава жизни, а архитектура становится свидетелем самого важного обещания. Он способен настраивать на торжественность через свет, пропорции, фактуру. Но почему же мы так часто видим безликие коробки там, где должна звучать поэзия? Почему бетон и стекло – честные и выразительные материалы – так редко хотят стать «лебедем», и остаются серой стеной?

В системе общественных зданий дворцы бракосочетания занимают особое место. Они – пространственная оболочка для древнего ритуала создания семьи. Однако сегодня выразительный образ у этого типа зданий скорее исключение, чем правило. Основное противоречие – между высокой эмоциональной нагрузкой церемонии и архитектурной средой, которая часто либо пугает своей тяжеловесной официальностью, либо вообще стесняется собственной функции, маскируясь под офис или торговый центр.

Цель данной статьи – на основе исторического анализа и изучения современных тенденций выявить принципы формирования выразительного архитектурного образа дворцов бракосочетания и показать их реализацию на примере авторского проекта на острове Даманский в г. Ярославль.

Развитие архитектуры зданий для регистрации брака в отечественной практике прошло путь от строгой административной функции до создания «социальных дворцов», а затем – к утрате внятного образа.

В дореволюционный период ритуал венчания был неразрывно связан с церковной архитектурой. Сакральность пространства, вертикаль сводов, приглушённый свет, запах ладана – всё работало на эмоциональный фон. Архитектура сама вела человека от входа к алтарю, благословляя на таинство.

С переходом к гражданской регистрации в ранний советский период специализированных зданий не существовало. Обряд носил сугубо бюрократический характер и протекал в кабинетах местных Советов или административных учреждениях, лишённых какой-либо эстетической выразительности. Представьте: стол, герб, печать – и вас объявляют мужем и женой. Никакой поэзии. Только функция.

Переломный момент наступил в 1960–70-х годах. В рамках борьбы с «архитектурными излишествами», но при одновременном стремлении к созданию новых социалистических обрядов начали появляться первые Дворцы бракосочетания. Самые яркие примеры – Дворец в Вильнюсе (рис. 1) или в Тбилиси (рис. 2) – представляли собой экспрессивный бетонный модернизм. Чистые линии, динамичные объёмы, игра света и тени. Архитектура транслировала идею вечности союза через мощь камня и бетона. Это был прорыв: здание перестало быть просто местом регистрации, оно стало событием.

Рис. 1. Дворец в Вильнюсе, Литва

Рис. 2. Дворец бракосочетания в Тбилиси, Грузия

Однако параллельно с уникальными объектами развивалась практика размещения отделов ЗАГС в первых этажах жилых многоэтажек. И образ утратил свою выразительность. Торжественный ритуал оказался зажат между парикмахерской и продуктовым магазином. Разве можно представить венчание в подвале или на первом этаже спального района?

Таким образом, исторический анализ показывает цикличный характер развития: от сакральности – к бюрократической безликости, затем к монументальному модернизму – и снова к потере идентичности. Современный этап требует перехода к новой парадигме.

Одной из центральных проблем является «типологическая неопределённость». Новые здания ЗАГС часто мимикрируют под коммерческую архитектуру, используя стандартное фасадное остекление и композитные материалы без должного внимания к сакральности функции. Здание перестаёт считываться как место главного события жизни. Другая крайность – архитектурный китч: упрощённые классические формы, избыточный пластиковый декор, имитация роскоши. Ни то, ни другое не работает на эмоцию.

Почему же так трудно добиться выразительности? Потому что образ не может быть приклеен к архитектуре как декор. Он должен стать ее основой.

Тем не менее, международный опыт и передовые отечественные практики демонстрируют несколько позитивных тенденций.

Рис. 3. Ribbon Chapel в Японии

Первая тенденция – архитектура-метафора. Форма здания становится физическим воплощением абстрактных понятий: любви, союза, бесконечности, чистоты. Яркий пример – Ribbon Chapel в Японии (арх. Хироси Накамура) (рис. 3), где две спиральные лестницы переплетаются и соединяются в одной точке. Архитектура буквально воспроизводит путь двух людей. В отечественной практике – Центр семьи «Казан» (рис. 4) в Татарстане, где образ традиционной чаши символизирует домашний очаг и изобилие. Однако слишком буквальная метафора превращается в китч.

Рис. 4. Центр семьи «Казан» в Татарстане

Вторая тенденция – интеграция в ландшафт и «прозрачность». Современные молодожёны всё чаще отдают предпочтение камерности и связи с природой. Павильонная архитектура, панорамное остекление, зеркальные поверхности – здание растворяется в парке или на берегу, делая природу полноправным участником церемонии. Стирается грань между интерьером и экстерьером (рис. 5).

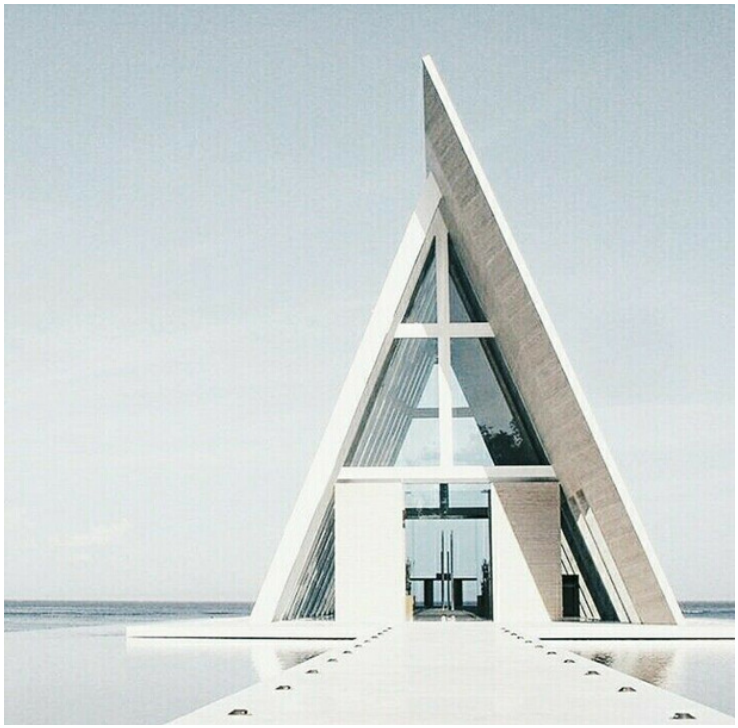


Рис. 5. Infinity Chapel (Часовня Бесконечности) в курортном комплексе Conrad Bali Resort&Spa, Нуса-Дуа, Бали

Третья тенденция – сценарное проектирование. Архитектура перестаёт быть статичной. Она организует «путь молодожёнов» от входа к алтарю, создавая кульминации и паузы. Пространство проектируется как гибкая среда, способная адаптироваться под разные форматы – от камерной регистрации до масштабного праздника.

Эти тенденции – не просто мода. Они отвечают на глубинный запрос: люди хотят не просто «расписаться», а прожить момент в достойной его красоте.

Каждая из этих тенденций находит свое отражение в предложенной дипломной концепции. Рассмотрим, как метафора, ландшафт и сценарий работают в проекте дворца бракосочетания на о. Даманский.

В рамках дипломного проектирования была разработана концепция дворца бракосочетания на острове Даманский в Ярославле. Выбор локации не случаен: остров в русле реки, отделённый от городской суеты зелёным массивом, сам по себе создаёт камерную атмосферу.

Проект представляет собой единый архитектурно-ландшафтный ансамбль, в основу которого заложены два главных символа бракосочетания — лебедь и обручальные кольца. Комплекс дворца и ресторана деликатно интегрирован в природную среду Даманского острова, превращая южную часть парка в сакральное пространство для проведения свадебных церемоний.

Главное здание Дворца получило образ лебедя – символа чистоты, грации и супружеской верности (рис. 6). Но это не фигуративная скульптура, а динамичная, «взлетающая» объемная композиция. Вертикальные белые ламели на фасаде расходятся веером, имитируя размах крыльев и изгиб шеи. За ними – сплошное остекление. Так возникает двухслойная оболочка: внешняя – пластичная, символическая, меняющаяся в

зависимости от угла зрения конструкция, а внутри – ощущение прозрачности и открывающийся вид на реку и парк. Белый цвет «фасадной оболочки» это символ чистоты и света. Здание не копирует лебедя, оно резонирует с ним, включая в более сложную образную структуру. Наряду с лебединой шеей и грандиозными взмахами крыльев в волнах фасадных ламелей без труда считываются складки подола подвенечного платья и прозрачная драпировка фаты.

Рис. 6. Проект Дворца бракосочетания в Ярославль на Даманском острове

Круглое в плане здание, представляет собой одно из колец, символизирующее бесконечность. Это панорамный ресторан для проведения свадебных банкетов. Круглая форма позволяет организовать зал без острых углов, что символизирует гармонию будущей семейной жизни. Из окон ресторана открывается вид на реку, парк и дворец.

Помимо создания архитектурного ансамбля Дворца бракосочетания, важной задачей проекта стало переосмысление территории самого Даманского острова. Невозможно просто "посадить" новый масштабный объект в существующую среду, не поработав с ее контекстом. Поэтому неотъемлемой частью концепции стала деликатная реорганизация ландшафта — потребовалось «прибрать» существующую сеть дорожек, сделав ее логичной. До вмешательства транзитная сеть парка местами выглядела хаотично. В проекте удалось систематизировать планировочную структуру острова, создав понятную и комфортную иерархию пешеходных маршрутов и наполнить ландшафт образным содержанием. Также проектом предусмотрено устройство набережной и выходящих на воду площадок, вдохновленных образом колец.

Что даёт этот проект? Он решает именно те проблемы, которые были выявлены в ходе анализа. Вместо типологической неопределённости – ясная метафора. Вместо китча – глубокая пластическая переработка образа. Вместо изоляции от природы – полная интеграция. Остров Даманский, а с ним и Ярославль, получают не просто здание ЗАГСа, а новый архитектурный символ, эмоциональное ядро парка.

Подводя итог, можно сформулировать следующие положения.

1. Исторический анализ показывает, что архитектура дворцов бракосочетания прошла путь от сакральной наполненности через бюрократическую безликость и монументальный модернизм к современной типологической неопределённости. Сегодня этот тип зданий нуждается в переосмыслении.

2. Основные проблемы – отсутствие внятного образа, мимикрия под коммерческую застройку либо, наоборот, китчевое подражание классике. Обе крайности не отвечают задаче создания запоминающегося, эмоционально насыщенного пространства.

3. Современные тенденции задают три направления: архитектура-метафора (форма как символ), интеграция в ландшафт (здание как часть природы) и сценарное проектирование (пространство как путь и спектакль).

4. Предложенный дипломный проект на острове Даманский в Ярославле демонстрирует, как эти тенденции могут быть реализованы на практике. Метафоры «лебедя» и «кольца», двухслойная фасадная система, панорамное остекление и продуманный сценарий движения создают выразительный образ, который работает на эмоциональное переживание ритуала.

Предложенные принципы могут быть использованы при проектировании новых дворцов бракосочетания и реконструкции существующих. Этот проект – всего лишь один из возможных ответов, но он доказывает главное: архитектура может говорить о любви на языке, понятном без перевода. Нужно только перестать бояться метафоры и довериться природе – как природе материалов, так и природе вокруг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Иконников, А.В. Архитектура XX века. Утопии и реальность: в 2 т. – М.: Прогресс-Традиция, 2001. – Т. 1. – 656 с. – Т. 2. – 672 с.

2) Рябушин, А.В. Творческие противоречия в новейшей архитектуре Запада / А.В. Рябушин, А.Н. Шукурова. – М.: ЦНИИ теории и истории архитектуры, 1986. – 205 с.

3) Крашенинников, А.В. Сценарное проектирование городской среды // Жилищное строительство. – 2017. – № 4(41). – С. 30–34. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/stsenarnoe-proektirovanie-gorodskoy-sredy (дата обращения: 10.04.2026).

4) Захаров, П.П. Дворцы бракосочетания: опыт типологического анализа // Архитектура и строительство России. – 2018. – № 3. – С. 44–51.

5) Архитектура дворцов бракосочетания. – URL: https://archi.ru/russia/94758/lebed-i-kolca (дата обращения: 10.04.2026).

6) Центр семьи «Казан»: метафора и конструкция // Татарстан архитектурасы. – 2017. – № 2. – С. 22–29.

7) Модернистские храмы любви: 8 ЗАГСов постсоветского пространства // news.rambler.ru: [сайт]. – 14.02.2020. – URL: https://news.rambler.ru/other/42066814-modernistskie-hramy-lyubvi-8-zagsov-postsovetskogo-prostranstva/ (дата обращения: 09.04.2026).

8) Neumann, D. Architecture of the Wedding. – New York: Princeton Architectural Press, 2016. – 240 p.

9) Ribbon Chapel by Hiroshi Nakamura // Architectural Record. – 2015. – Vol. 203, № 8. – P. 102–105. – ISSN: 0003-858X.

10) Wedding Palace in Vilnius. – URL: https://www.archdaily.com/tag/vilnius-wedding-palace (дата обращения: 09.04.2026).

11) Wedding Palace in Tbilisi. – URL: https://www.archdaily.com/tag/tbilisi-wedding-palace (дата обращения: 09.04.2026).

12) Ribbon Chapel // Hiroshi Nakamura & NAP. – URL: https://www.archdaily.com/641022/ribbon-chapel-hiroshi-nakamura-and-nap (дата обращения: 10.04.2026).

13) Infinity Chapel, Bali. – URL: https://www.archdaily.com/tag/infinity-chapel (дата обращения: 10.04.2026).

14) Artefact – Центр семьи «Казан». – URL: https://ar.culture.ru/ru/subject/centr-semi-kazan (дата обращения: 09.04.2026).

15) Сценарное проектирование городской среды (PDF). – URL: https://www.academia.edu/35769295/СЦЕНАРНОЕ_ПРОЕКТИРОВАНИЕ_ГОРОДСКОЙ_СРЕДЫ_SCENARIO_BASED_DESIGN_OF_THE_BUILT_ENVIRONMENT (дата обращения: 09.04.2026).

16) Биофильный дизайн в общественных зданиях. – URL: https://s2-russia.ru/tendentsii-v-proektirovanie-obschestvennyh-zdaniy/ (дата обращения: 09.04.2026).

УДК 721.011.12

РЕКОНСТРУКЦИЯ АНСАМБЛЯ ВОЗНЕСЕНСКИХ КАЗАРМ В ЯРОСЛАВЛЕ: СОХРАНЕНИЕ НАСЛЕДИЯ ЧЕРЕЗ СОВРЕМЕННЫЕ АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ

С.Д. Шахова, С.А. Буров

Научный руководитель – **С.А. Буров**, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается важность реконструкции исторического ансамбля Вознесенских казарм. Архитектурные решения призваны сохранить культурное наследие и в то же время адаптировать комплекс к текущим общественным потребностям города.

Ключевые слова: *реконструкция исторических ансамблей, адаптивное использование, Вознесенские казармы, благоустройство*

RECONSTRUCTION OF THE VOZNESENSKIKH BARRACKS ENSEMBLE IN YAROSLAVL: PRESERVATION OF HERITAGE THROUGH MODERN ARCHITECTURAL SOLUTIONS

S.D. Shakhova , S.A. Burov

Scientific Supervisor – **S.A. Burov**, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the importance of reconstructing the historical ensemble of the Voznesenskye barracks. The architectural solutions are designed to preserve the cultural heritage and at the same time adapt the complex to the current social needs of the city.

Keywords*: reconstruction of historical ensembles, adaptive use, Voznesenskye barracks, landscaping*

В современных условиях развития городов регенерация исторических комплексов остаётся одной из ключевых задач архитектуры. Многие здания и ансамбли XVIII–XX веков постепенно утрачивают своё первоначальное назначение и оказываются в состоянии упадка. Вместе с тем они обладают значительным потенциалом для превращения в современные общественные пространства, способные стать новыми центрами притяжения как для жителей, так и для гостей города.

Ярким примером такого подхода служит победивший проект регенерации Красных казарм в Новосибирске (студенческий конкурс 2025 года). Авторы предложили сохранить исторические краснокирпичные фасады и общий силуэт комплекса, дополнив его лёгкими современными конструкциями из стекла и металла, а также новыми функциональными объёмами для создания культурного кластера. Благодаря продуманной организации внутренних связей и качественному благоустройству территории заброшенный военный объект получает новую жизнь (рис. 1, *а* и *б*).

Ансамбль Вознесенских казарм в Ярославле представляет собой типичный пример подобного исторического комплекса. Расположенный в центральной части города, он выделяется масштабным силуэтом, выразительной архитектурой сталинского ампира и богатой историей, связанной с промышленной и военной застройкой. В настоящее время казармы нуждаются в серьёзном обновлении, чтобы соответствовать современным потребностям общественной жизни.

Актуальность проекта определяется несколькими причинами. Во-первых, в исторических городах России, включая Ярославль, остро ощущается нехватка качественных многофункциональных общественных зон в центре. Во-вторых, грамотная реконструкция

объектов культурного наследия позволяет не только сохранить их от дальнейшего разрушения, но и существенно повысить туристическую и социальную привлекательность территории.

а *б*

Рис. 1. Красные казармы до (а) и после (б) регенерации

Несмотря на выгодное расположение и архитектурную ценность, сегодня ансамбль сталкивается с целым рядом проблем: слабое благоустройство территории, отсутствие удобных связей между корпусами, а также визуальная дисгармония некоторых прилегающих зданий с исторической застройкой. Всё это снижает потенциал комплекса как полноценного общественного пространства.

Функциональное наполнение проекта направлено на создание современного многофункционального центра (рис. 3 - генеральный план). Основными архитектурными решениями стали:

1. Культурно-массовые мероприятия, выставки, театральные постановки и концерты.
2. Спортивные программы, секции, кружки.
3. Офисные помещения, смотровые площадки.

Несмотря на центральное расположение и архитектурную ценность, ансамбль сегодня испытывает ряд проблем. Территория слабо благоустроена, отсутствуют удобные пешеходные связи между корпусами, а некоторые прилегающие здания визуально дисгармонируют с исторической застройкой. Функционально комплекс не полностью раскрывает свой потенциал как общественное пространство. Эти проблемы типичны для многих исторических ансамблей и требуют комплексного архитектурного вмешательства.

Функциональный аспект реконструкции включает несколько ключевых задач, направленных на адаптацию и эффективное использование пространства (рис. 2).

Ключевыми решениями стали:

1. Надстройка зимнего сада над концертным залом на уровне третьего этажа. Стеклянная конструкция создаёт всесезонное комфортное пространство для отдыха.

2. Выдвижение фасада между концертным и спортивным залом с добавлением колоннады. Ритм колонн визуально объединяет корпуса, придаёт парадность пространству и обеспечивает удобную функциональную связь.

3. Обновление фасадов прилегающих объектов: полностью переработан фасад здания бассейна за спортивным залом, фасад электростанции и частичный фасад ауры. Все решения выполнены в едином классическом стиле с сохранением исторического ритма окон и пропорций.

4. Достройка колокольни рядом с существующими церквями. Новая колокольня усиливает вертикальные акценты ансамбля и лучше интегрирует его в окружающий сакральный контекст.

5. Благоустройство территории. Предложена чёткая сетка пешеходных и транспортных путей с включением звезд разных по размеру по всему периметру благоустройства.

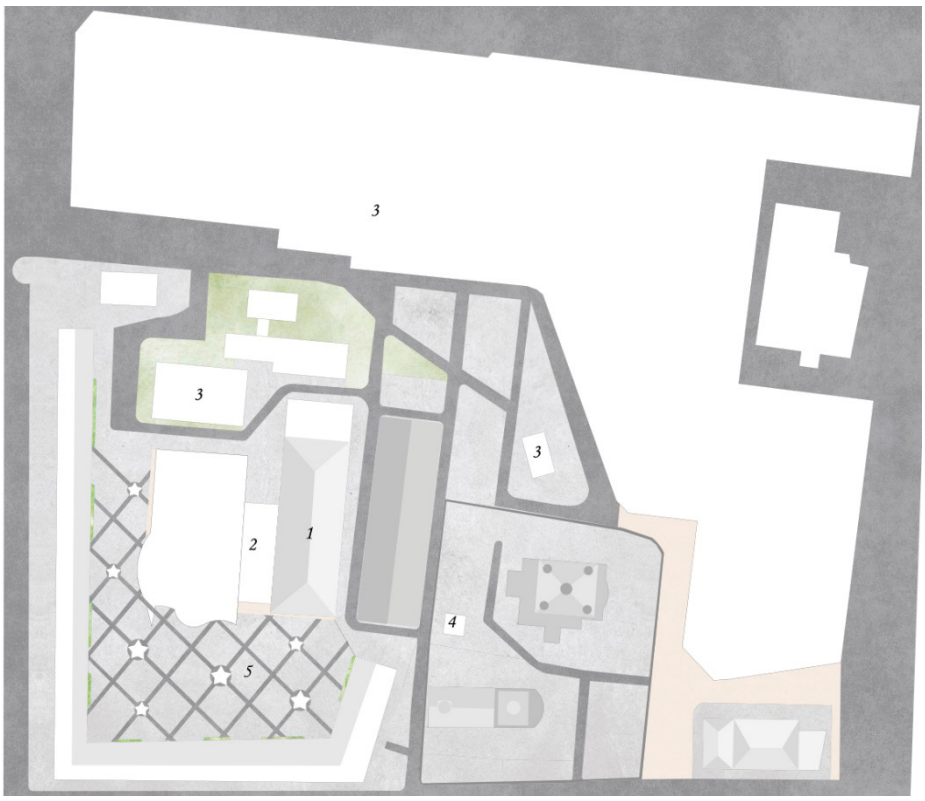


Рис. 2. Генплан

Внешний облик реконструированного ансамбля строится на принципе визуального единства старого и нового. Исторические корпуса сохраняют свою пластику и ритм проёмов, а новые элементы (зимний сад, колоннада, обновлённые фасады) выполнены в сдержанном классическом ключе. Витражное остекление зимнего сада добавляет лёгкости и прозрачности, создавая визуальную связь с благоустроенной территорией, при этом не нарушая общего монументального характера комплекса. Масштаб и характер новых вмешательств органично вписываются в окружающую историческую застройку, делая ансамбль выразительной, но не подавляющей доминантой городского ландшафта Ярославля (рис. 3).

Рис. 3. Обновленные фасады

Разработанный проект показывает, как с помощью продуманных современных архитектурных решений можно сохранить ценный объект культурного наследия и

одновременно превратить его в востребованное многофункциональное общественное пространство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Федеральный закон "Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации" от 25.06.2002 N 73-ФЗ (последняя редакция). –URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/ (дата обращения 08.04.2026)

2) Вознесенские казармы. – URL: https://aovoznesensky.ru/ (дата обращения 07.04.2026)

3) От фабрики до символа города: история башни Вознесенских казарм в Ярославле. – URL: https://yarcube.ru/newsletter/kazarmy-tower-history/ (дата обращения 08.04.2026)

4) Реновация Красных казарм в Новосибирске: смотрим 4 студенческих концепта. – URL: https://nsknews.info/news/renovatsiya-krasnykh-kazarm-v-novosibirske-smotrim-4-studencheskikh-kontsepta (дата обращения 08.04.2026)

УДК 72.03:39.2

АРХИТЕКТУРА ПАВИЛЬОНА КАК МАНИФЕСТ НАЦИОНАЛЬНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ

А.А. Юрьева

Научный руководитель – **Н.В. Хомутова**, канд. архитектуры, доцент

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена анализу архитектуры национальных павильонов на международных выставках в контексте культурной дипломатии и национальной идентичности. На примере Венецианской биеннале рассматривается, как архитектурное решение павильона становится самостоятельным высказыванием, отражающим исторические нарративы, культурные коды и современные вызовы страны.

Ключевые слова: *биеннале, архитектура, павильон, национальная идентичность, архитектурный манифест, выставка, экспозиция, инсталляция, архитектурный фестиваль*

THE PAVILION'S ARCHITECTURE AS A MANIFESTO OF NATIONAL IDENTITY

A.A. Yuryeva

Scientific Supervisor – **N.V. Khomutova**, Candidate of Architecture, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article analyzes the architecture of national pavilions at international exhibitions in the context of cultural diplomacy and national identity. Using the example of the Venice Biennale, it is considered how the architectural design of the pavilion becomes an independent statement reflecting the historical narratives, codes and modern challenges of the country.

Keywords: *biennale, architecture, pavilion, national identity, architectural manifesto, exhibition, exposition, installation, architectural festival*

В современном мире архитектура павильонов на международных выставках перестала быть просто экспозиционным пространством — она превратилась в мощный инструмент культурной дипломатии и манифест национальной идентичности. Каждый павильон становится самостоятельным архитектурным высказыванием, в котором страна не только демонстрирует свои достижения, но и формулирует собственную позицию в глобальном контексте. Через форму, материалы, пространственную организацию и сценографию раскрываются культурные коды, исторические нарративы и современные вызовы нации.

Павильон — это не только оболочка, но и сценарий переживания: пространственная организация, свет, акустика, тактильные ощущения — всё работает на создание атмосферы, погружающей посетителя в культурный код страны. Экспозиция становится диалогом между архитектурой и искусством, где каждый элемент поддерживает общий нарратив.

В эпоху глобализации, когда границы между странами становятся всё более условными, павильоны биеннале становятся площадкой для поиска баланса между универсальным и уникальным: многие страны стремятся показать не только свои традиции, но и способность к инновациям, открытость миру и готовность к диалогу. Архитектура павильона в этом случае становится метафорой национального пути: она отражает, как страна видит себя в мировом контексте и какие вопросы ставит перед собой и другими.

Ярким примером такого манифеста стал национальный павильон Омана *«Traces»* («Следы») на 19-й Международной архитектурной выставке *La Biennaledi Venezia*, проходившей в 2025 году (рис. 1). Проект, созданный в рамках главной темы биеннале «Лаборатория будущего», стал значимым архитектурным высказыванием.

В основе проекта лежит «Саблах» – традиционное оманское общественное пространство, представляющее собой сложную социальную систему, символ устойчивости и культурной преемственности. Куратором выступила архитектор Маджеда Альхинаи, которая подошла к проекту как к исследованию «пространственного интеллекта».

Связь павильона с главной темой биеннале «Лаборатория будущего» концептуально глубока. Проект предлагает «архитектуру, которая умеет слушать», где интеллект — это способность пространства адаптироваться к человеку. Это отражается в открытой планировке: отсутствие стен и порогов позволяет посетителям самим формировать пространство, что становится проявлением коллективного интеллекта. Проект стирает границы между «естественным» и «искусственным», интегрируя мудрость традиций (плетение из пальмовых листьев, узоры дверей) в современные технологии (перфорированные алюминиевые панели), и становится метафорой открытости Омана к инновациям при сохранении наследия.

Рис. 1. *«Следы»* (павильон Оман) – архитектор Маджедной Альхинаи. 19-я Международная архитектурная биеннале, 2025 г.

Павильон исследует логику *«Саблаха»* как прототипа для современных общественных пространств. Архитектор деконструирует традиционные формы - плетение из пальмовых листьев, геометрию систем *«фалаж»*, узоры дверей, которые формируют структуру, свет и атмосферу объекта.

На той же 19-й выставке Филиппинский павильон представил проект *Soil-beings, Lamánlupa* («Существа из почвы»), который является прямым ответом на главную тему биеннале.

В основе проекта лежит переосмысление отношений между человеком, архитектурой и землёй. Выставка смещает фокус с рукотворной конструкции на почву, представляя её не пассивным материалом, а живой силой. Концепция родилась в результате масштабного исследования, объединившего архитекторов, художников и представителей коренных народов. Почва была переосмыслена как *«живой архив»*, хранящий память о климате и культуре. Исторически филиппинская архитектура жила в гармонии с ландшафтом, и этот павильон - современное эхо той же философии.

Архитектор Кристиан Тенефрансия Илли и куратор Рэнан Лару-ан задаются фундаментальным вопросом: что значит строить не *на* земле, а *вместе* с ней?

Центральным элементом экспозиции стала инсталляция *«Террариум»*, собранная из почти тысячи плиток почвы со всей страны. Её вихреобразная, лишённая завершённости форма символизирует циклы жизни и возрождения (рис. 2).

Также на 19-й Международной архитектурной выставке *La Biennaledi Venezia* 2025 года ирландское бюро *Cotter&Naessens Architects* представило проект *«Assembly»* («Ассамблея»), созданный в рамках главной темы биеннале — «Лаборатория будущего».

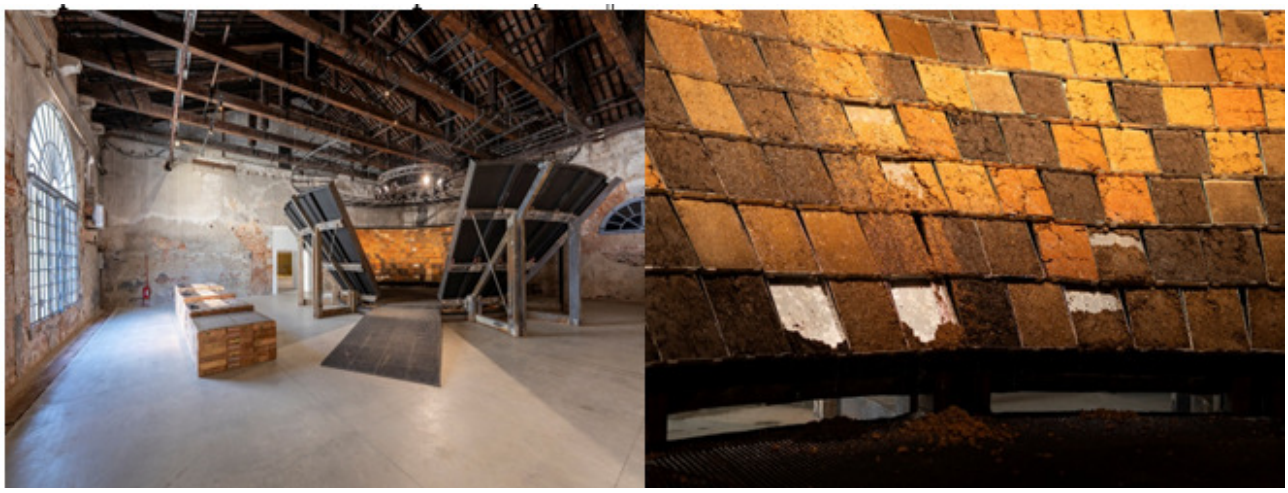


Рис. 2. «*Террариум*» (Филиппинский павильон) - Кристиан Тенефрансия Илли. 19-я Международная архитектурная биеннале, 2025 г.

В основе проекта лежит переосмысление идеи коллективного участия, вдохновлённое Гражданской ассамблеей Ирландии (2016). Этот опыт стал для архитекторов метафорой того, как пространство может способствовать вдумчивой рефлексии и достижению консенсуса.

Национальная тема павильона неразрывно связана с ирландскими традициями общественных собраний. Концепция «Ассамблея» рассматривается в двух смыслах: как место сбора и как практика совместного строительства (рис. 3).

Рис. 3. «Ассамблея» (павильон Ирландии) – бюро Cotter&Naessens Architects. 19-я Международная архитектурная биеннале, 2025 г.

Форма павильона – круглая и модульная – отсылает к типологиям ирландских хоров и парламентских залов, символизируя равенство участников и отсутствие иерархии. Этот выбор подчёркивает идею неиерархического диалога, а модульность делает проект универсальным прототипом для трансформации любого общественного пространства. Связь с традицией подчёркнута и в выборе материалов. Отказавшись от высокотехнологичных решений, архитекторы сделали ставку на ремесленный подход.

Павильон является не просто ответом на тему, а её практической реализацией. Вместо того чтобы полагаться на искусственный интеллект как единственный путь вперёд, проект предлагает обратиться к «коллективному интеллекту» – способности людей к совместному поиску решений.

Архитектура здесь становится инструментом для запуска этого процесса, доказывая, что лаборатория будущего – это в первую очередь пространство для человеческого диалога

На 18-й Международной архитектурной выставке *La Biennaledi Venezia* 2023 года, главной темой которой стала «Лаборатория будущего», французский павильон *«Ball Theatre»* («Бал Театр») от студии *Muoto* стал одним из самых ярких высказываний (рис. 4).

В этом проекте архитектура предстаёт как пространство для эксперимента, где сцена становится лабораторией утопий и инклюзивности. Идея театра как места трансформации, где можно примерить новую роль и свободно выразить себя, глубоко укоренена во французской культуре – от философских салонов эпохи Просвещения до авангардных поисков в сценическом искусстве.

Форма павильона – трансформируемая и модульная – является прямым воплощением темы биеннале. Отказавшись от статики, архитекторы создали *«пространство-сценарий»*. Деревянные конструкции позволяют менять конфигурацию сцены и зала, превращая павильон из объекта в инструмент для коллективного творчества. Такая гибкость символизирует отказ от единственно верного будущего в пользу множественности сценариев. Посетитель становится не зрителем, а участником *«постановки»*, соавтором завтрашнего дня.

Рис. 4. *«Бал Театр»* (павильон Франции) – студия Muoto.
18-я Международная архитектурная биеннале, 2023 г.

Национальная тема отражена не в декорациях, а в самой сути проекта. Павильон отсылает к традиции французских салонов как мест для дискуссий, формировавших общество, и к идее театра как площадки для социальных утопий.

На той же 18-й выставке Филиппинский павильон представил проект *«Tripade Gallina: Guts of Estuary»* («Куриная требуха: внутренности эстуария»). В основе концепции лежит переосмысление отношений между человеком и загрязнённой водной средой Манилы (рис. 5). Выставка посвящена изучению устья реки Трипа-де-Галлина – некогда естественного защитника от наводнений, а ныне свалки отходов, отравляющей жизнь горожан.

Идея павильона неразрывно связана с национальными традициями. Концепция «городской акупунктуры» отсылает к духу *«bayanihan»* — взаимовыручке и совместному труду. Использование бамбука становится данью уважения традиционным лёгким и устойчивым постройкам, адаптированным к тропическому климату.

Центральным элементом экспозиции стала модульная бамбуковая конструкция — место для встреч и исследований. Она создаёт пространство для изучения сложной экосистемы, где переплетаются люди, вода и отходы. Повествование ведёт к центру, где этнографические видео режиссёра Джаг Гарсии погружают в контекст проблемы.

Рис. 5. «Куриная требуха: внутренности эстуария» (Филиппинский павильон) – архитектурный коллектив The Architecture Collective. 18-я Международная архитектурная биеннале, 2023 г.

Павильон доказывает, что лаборатория будущего — это пространство для социального взаимодействия. Проект предлагает модель регенеративной архитектуры, где дизайн становится инструментом восстановления природы через коллективные усилия, утверждая: будущее строится на диалоге с сообществом и уважении к экосистеме.

На 17-й Международной архитектурной выставке La Biennaledi Venezia, 2021 года, павильон Филиппин под названием «*Structures of Mutual Support*» («*Структуры взаимной поддержки»*) представил исследование того, как принципы коллективного взаимодействия могут трансформировать архитектуру (рис. 6). Экспозиция была создана в рамках главной темы биеннале — «Как мы будем жить вместе?» (*How will we live together?*), предложенной куратором Хашимом Саркисом. Кураторы проекта, коллектив *Framework Collaborative*, переосмыслили этот вопрос, сместив акцент на то, как мы строим вместе.

Рис. 6. «Структуры взаимной поддержки» (Филиппинский павильон) – архитектурный коллектив Framework Collaborative. 17-я Международная архитектурная биеннале, 2021 г.

В основу проекта легла национальная традиция *баянихан* — практика взаимопомощи, когда вся деревня совместно переносила дома. Для архитекторов это не просто архаичный обычай, а живой механизм самоорганизации общества, строящий горизонтальные связи на доверии и кооперации. Павильон предлагает взглянуть на принципы *баянихана* в контексте глобальной взаимопомощи, показывая, как эта традиция служит критикой индивидуализма и доминирующих представлений об устойчивом развитии.

Идея, заложенная архитекторами, заключалась в том, чтобы показать: архитектура может быть не объектом потребления, а инструментом для построения общества. Эта философия была воплощена через создание архива и библиотеки. Пространство заполнили объекты, документы и истории, собранные во время воркшопов с жителями филиппинских общин. Таким образом, сама архитектура павильона стала метафорой совместного строительства: она была наполнена плодами коллективного труда.

Связь с темой биеннале здесь концептуальна. В эпоху глобальных кризисов павильон утверждает: жить вместе можно только строя вместе. Это манифест будущего, где архитектура становится инструментом социального взаимодействия и возрождения традиций солидарности.

На той же 17-й Международной архитектурной выставке – La Biennaledi Venezia 2021 года – Латвийский павильон представил проект *«It's Not For You! It's For the Building»* («Это не для вас! Это для здания»), созданный в рамках главной темы «Как мы будем жить вместе?» (рис. 7).

В основе концепции лежит исследование противоречивых отношений между человеком и технологиями. Латвийское бюро NRJA задаётся вопросом: как найти баланс между страхом перед технологическим прогрессом и необходимостью использовать его для решения глобальных кризисов? Инсталляция не предлагает готовых ответов, а создаёт пространство для диалога, где посетитель может переосмыслить своё отношение к «умным» системам.

Эта идея воплощена в паутине из чёрных труб, которая поначалу воспринимается как чужеродный организм, паразитирующий на историческом пространстве Арсенала. Визуальный образ «паразита» — метафора того, как технологии могут выходить из-под контроля. Однако по мере взаимодействия с ней пугающая структура оборачивается «забавным соседом», заставляя по-новому взглянуть на окружающее пространство. Выбор индустриальных материалов подчёркивает «холодную» природу технологий в противовес тёплой исторической среде.

Проект напрямую отвечает на вопрос куратора. В эпоху, когда искусственный интеллект становится неотъемлемой частью быта, павильон предлагает рассматривать архитектуру как поле для диалога между человеком и машиной. Будущее — это не война с технологиями, а поиск сбалансированного партнёрства, где инновации служат устойчивому развитию человечества.

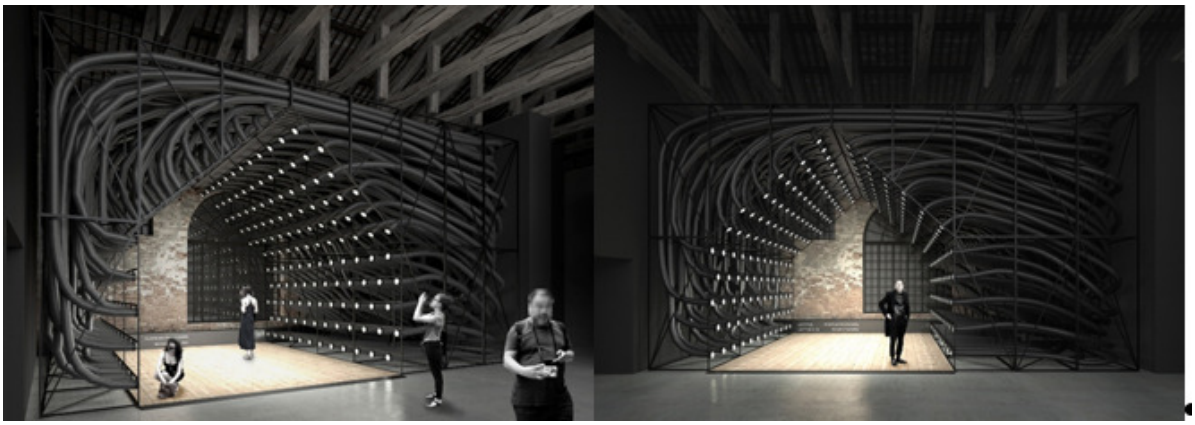


Рис. 7. *«Это не для вас! Это для здания»* (Латвийский павильон) – бюро NRJA. 17-я Международная архитектурная биеннале, 2021 г.

В 2012 году на 13-й Международной архитектурной биеннале в Венеции российский павильон представил проект *«i-city/i-land»*, ставший знаковым событием и принесший стране первую награду в истории участия – специальный приз жюри (рис. 8).

Экспозиция была создана в рамках главной темы биеннале «Общие основы. Архитектура как общий знаменатель» (*Common Ground*), предложенной куратором Дэвидом Чипперфилдом. В основу проекта легла идея инновационного центра «Сколково» как точки притяжения интеллектуального капитала. Национальная тема павильона была неразрывно связана с традицией русского авангарда и утопического мышления, став современным манифестом веры в прогресс.

Концепция экспозиции была построена на метафоре «города в городе». Павильон был разделён на две части. Первая, круглая зона с театральными бордовыми стенами, отсылала к образу Пантеона. В русской культуре ротонда всегда была символом храма знаний. Создавая «храм будущего» для технологий, архитекторы провели мост между великой классической традицией и устремлением России в будущее, подчёркивая, что новые идеи вырастают из прошлого.

Вторая часть – светлое пространство, где на планшетах посетителей оживали проекты мировых звёзд архитектуры. Проект идеально отвечал теме биеннале, демонстрируя, что архитектура — это общий язык для людей разных профессий. Использование *QR-кодов* превращало посетителя в активного участника процесса познания. Таким образом, павильон утверждал: будущее России — это интеграция в глобальный интеллектуальный контекст, где архитектура становится общим знаменателем для науки, искусства и технологий.

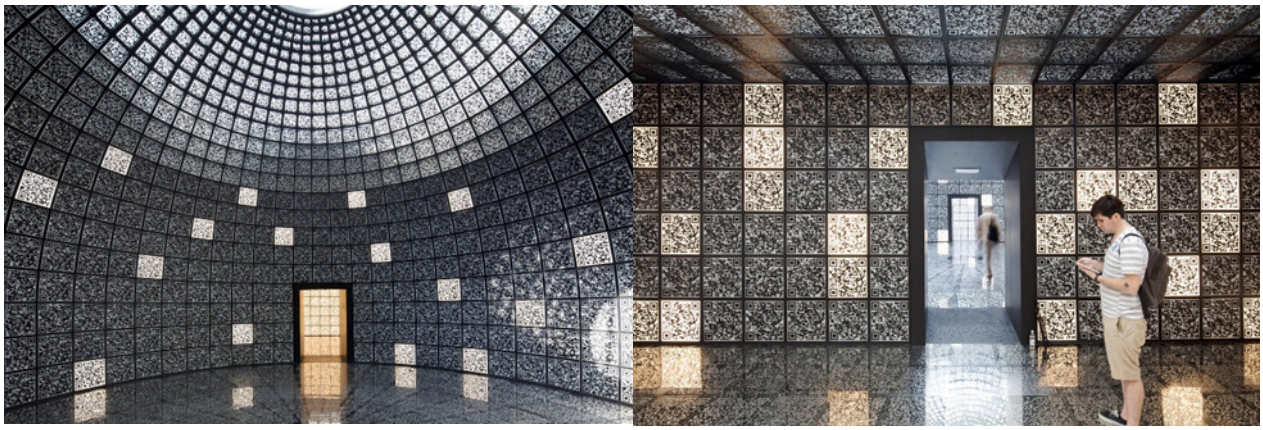


Рис. 8. *«i-city/i-land»* (Российский павильон)– бюро *SPEECH*.
13-я Международная архитектурная биеннале, 2012 г.

В 2008 году на 11-й Международной архитектурной выставке La Biennaledi Venezia Юрий Аввакумов представил свой знаменитый проект *«Born House»* («Рождённый дом»). Экспозиция, организованная совместно с архитектурным бюро «Проект Меганом», разместилась в стенах церкви Сан-Стае, став одним из самых заметных событий биеннале (рис. 9).

Проект был создан в рамках главной темы биеннале – «Архитектура помимо зданий», предложенной куратором Аароном Бецки. Эта концепция призывала выйти за рамки проектирования физических объектов, осмыслив архитектуру как социальное и философское явление.

В основе работы лежала идея «бумажной архитектуры» – направления, зародившегося в СССР в 1980-е годы, где замысел важнее реализации. Аввакумов создал метафорический «роддом» для архитектурных мыслей, исследуя генезис формы и пространства.

Архитектурное решение отличалось концептуальной строгостью. Конструкция с двускатной крышей и двойными стенами из гофрированного картона, украшенными идентичным узором, стирала границы между интерьером и экстерьером. Павильон выглядит

как хрупкое, временное убежище, чья ценность определяется не стоимостью материала, а силой замысла. Идентичный узор на внешней и внутренней сторонах стен усиливает этот эффект, становясь отражением традиционного для русской культуры двоемирия. Зритель теряется в пространстве-зазеркалье, где объект сливается с фоном.

Таким образом, инсталляция в Сан-Стае стала не просто выставочным объектом, а глубоким размышлением о генезисе архитектурной формы, доказав, что даже из простого материала, такого как картон, можно создать произведение, обладающее мощным философским подтекстом.

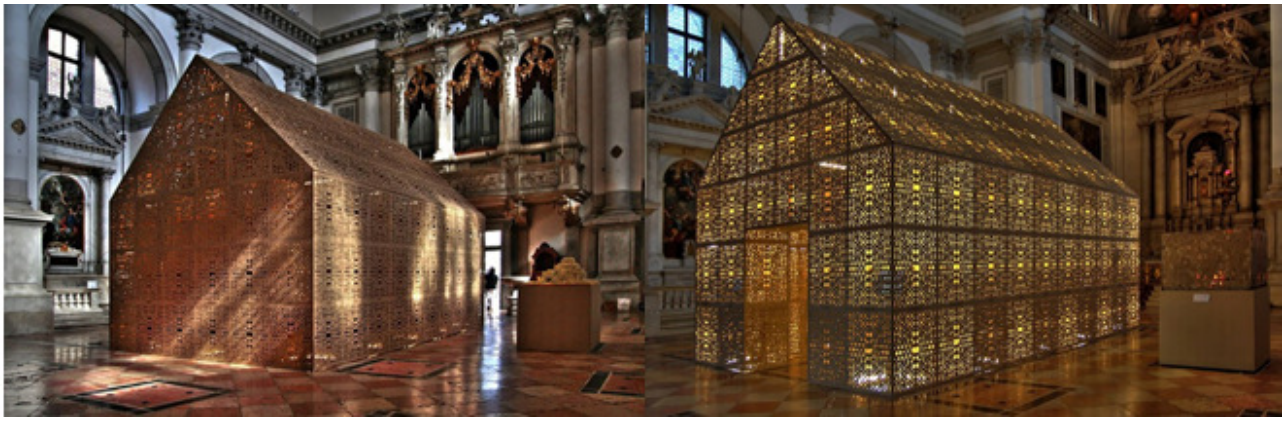


Рис. 9. *«Рождённый дом»* (Российский павильон) – Юрий Аввакумов. 11-ая Международная архитектурная биеннале, 2008 г.

Таким образом, архитектура павильона на биеннале — это не просто выставочный объект, а манифест национальной идентичности, в котором страна заявляет о себе через форму, пространство и содержание. Эти проекты становятся инструментами культурной дипломатии, способствуя межнациональному диалогу и формированию нового взгляда на будущее архитектуры. Павильоны биеннале доказывают: архитектура способна не только отражать настоящее, но и моделировать будущее, становясь площадкой для переосмысления прошлого, поиска новых ценностей и утверждения уникального голоса нации в глобальном мире.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АрхДэйли. Архитектурный портал: офиц. сайт. – URL: https://www.archdaily.com (дата обращения: 09.04.2026).
2. Archi.ru. Проекты: офиц. сайт. – URL: https://archi.ru/projects (дата обращения: 09.04.2026).

Направление 2. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ХИМИЯ

УДК 667.662

СИНТЕЗ КЕРНОГО ПИГМЕНТА НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ С МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОРТОФОСФОРНОЙ КИСЛОТОЙ

Г.Б. Ануфриева, А.Е. Терешко

Научный руководитель – **А.Е. Терешко**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В данной работе предложен способ синтеза кернового пигмента на основе магнитных частиц с применением двухстадийной модификации поверхности ортофосфорной кислотой (H_3PO_4, 0,01N). Показано, что такой подход позволяет получить стабильный диспергируемый материал.

***Ключевые слова**: керновый пигмент, магнетит, маггемит, ортофосфорная кислота, модификация поверхности*

SYNTHESIS OF KERNEL PIGMENT BASED ON MAGNETIC PARTICLES WITH ORTHOPHOSPHORIC ASID SURFACE MODIFICATION

G.B. Anufrieva, A.E. Tereshko

Scientific Supervisor – **A.E. Tereshko**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

In this work, a method for synthesizing kernel pigment based on magnetic particles using a two-stage surface modification with orthophosphoric acid (H_3PO_4, 0,01 N) is proposed. It is shown that this approach allows obtaining a stable, dispersible material.

***Keywords:** kernel pigment, magnetite, maghemite, orthophosphoric acid, surface modification*

Керновые пигменты представляют собой перспективный класс материалов, сочетающих декоративные свойства традиционных пигментов с функциональными характеристиками (магнитными, каталитическими и др.) [1, 3]. В отличие от классических неорганических пигментов, они могут применяться не только в лакокрасочной промышленности, но и в производстве умных покрытий, биомедицинских маркеров, элементов защиты документов.

Ключевой проблемой при создании керновых пигментов на основе магнетита является склонность частиц к агломерации, приводящая к неравномерному распределению цвета и снижению магнитных свойств [2]. Для решения этой проблемы перспективно использование ортофосфорной кислоты: она образует на поверхности магнетита прочный фосфатный слой, улучшающий дисперсность и стабильность частиц в различных средах [4].

Целью данной работы является разработка метода синтеза кернового пигмента с двухстадийной модификацией поверхности ортофосфорной кислотой, а также влияние обработки на свойства материала.

Реагенты: гидроксид натрия (NaOH, 5N), гексагидрат хлорида железа(III) ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$), гептагидрат сульфата железа(II) ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), ортофосфорная кислота (H_3PO_4, 0,01N раствор), деионизированная вода (H_2O).

Синтез кернового пигмента проводили методом соосаждения солей железа в воздушной среде с последующей двухстадийной обработкой ортофосфорной кислотой. Растворы солей железа помещали в трехгорловую колбу, установленную на верхнеприводной мешалке. Содержимое колбы нагревали до температуры (60±5) °С при

перемешивании со скоростью 300 об/мин. При достижении заданной температуры скорость перемешивания увеличивали до 550 об/мин и тонкой струйкой вводили раствор NaOH (5N) до достижения уровня pH > 11. При этом наблюдалось почернение раствора, что свидетельствовало об образовании магнетита. Нагрев продолжали в течение 2 часов при постоянном перемешивании. Процесс синтеза можно описать следующим уравнением реакции:

$$2FeCl_3 + FeSO_4 + 8NaOH \rightarrow Fe_3O_4(тв.) + 6NaCl + Na_2SO_4 + 4H_2O$$

По завершении синтеза раствор декантировали и промывали порошки деионизованной водой до достижения нейтрального pH. Затем к полученной суспензии магнитных частиц добавляли 0,01N раствор H_3PO_4, и перемешивали со скоростью 500 об/мин в течение 1 часа при комнатной температуре для обеспечения адсорбции эффективной адсорбции фосфатных групп на поверхности частиц [4]. Далее раствор декантировали и отмывали остатки реагентов до достижения pH = 6-7. Завершающим этапом являлась сушка порошков в вакуумном шкафу при температуре 60 °C в течение 6 часов.

Контрольный образец, не подвергавшийся модификации поверхности, получали по идентичной методике, за исключением этапа добавления ортофосфорной кислоты. На стадии после первой промывки порошок сразу отправлялся на сушку.

Во всех опытах контроль pH осуществляли с использованием pH-метра, температуру поддерживали с помощью термостатируемой бани, а скорость перемешивания регулировали на верхнеприводной мешалке. Для осаждения частиц применяли постоянный магнит с напряжённостью поля не менее 0,5 Тл.

В ходе исследования были синтезированы два образца магнитных частиц (МЧ). Сравнительная характеристика их свойств представлена в таблице 1.

Таблица 1.Результаты исследования образцов магнитных частиц

Свойства	Образцы	
	МЧ без стабилизатора	МЧ с 0,01N раствор H_3PO_4
Намагниченность	0,17	0,25
pH	6,32	6,28
Чернота	59,38	62,20
Размер частиц, мкм	7,6	4,1
Плотность	4,19	4,34

Анализ полученных данных показывает, что модификация поверхности ортофосфорной кислотой привела к существенному уменьшению размера частиц почти в 2 раза. Это свидетельствует об эффективном подавлении агломерации за счет формирования фосфатного слоя на поверхности частиц. Адсорбция фосфат-ионов создает электростатическое отталкивание между частицами, препятствуя их слипанию и способствуя лучшей диспергируемости материала [2, 4]. При этом образец с модифицированной поверхностью демонстрирует более высокую намагниченность, что может быть обусловлено формированием защитного фосфатного слоя, предотвращающего окисление магнетита до магемита с более низкими магнитными свойствами, а также улучшением однородности частиц и снижением доли немагнитных агломератов в образце [5]. Показатель черноты указывает на повышение интенсивности цвета пигмента и делает модифицируемый материал более перспективным для использования в лакокрасочных материалах, где важна насыщенность цвета покрытий [3, 6]. Вероятно, улучшение оптических характеристик связано с уменьшением размера частиц и повышением однородности. Значение pH при этом практически не изменилось, что говорит о минимальном влиянии модификации на кислотно-основные характеристики материала [7]. Незначительное снижение может быть обусловлено присутствием фосфатных групп на поверхности частиц. Такая стабильность важна для совместимости пигмента с различными связующими и матрицами в композиционных материалах.

Кроме того, наблюдается небольшое увеличение плотности. Это может быть связано с уплотнением структуры частиц за счёт адсорбции фосфатных групп, изменением пористости поверхности после модификации и формированием тонкого фосфатного слоя с собственной плотностью [8].

Таким образом, двухстадийная модификация поверхности магнитных частиц ортофосфорной кислотой позволяет получить керновый пигмент с улучшенными характеристиками: уменьшенным размером частиц и повышенной дисперсностью, более высокой намагниченностью, усиленной интенсивностью цвета, стабильной кислотностью среды и незначительно увеличенной плотностью. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода синтеза кернового пигмента и демонстрируют его перспективность для практического применения в производстве функциональных покрытий, биомедицинских маркеров и других материалов, где важны сочетание магнитных свойств и декоративных характеристик [1, 3, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohapatra, S. Synthesis and stability of functionalized iron oxide nanoparticles using organophosphorus coupling agents / S. Mohapatra, P. Pramanik // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. - 2009. - Vol. 339, no. 1-3. - P. 35-42. - DOI: 10.1016/j.colsurfa.2009.01.009.

2. Agglomeration and magnetic self-assembly of bare and polymer-modified Fe_3O_4 nanoparticles under ambient and applied fields / S.P. Yeap, J.K. Lim, J.Y. Sum [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2026. – Vol. 602. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2026.172124.

3. Miszczyk, A. Stratification of nano-pigments in anti-corrosive coatings by means of magnetic field / A. Miszczyk, K. Darowicki // Progress in Organic Coatings. – 2020. – Vol. 147. – Article 105869. – DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105869.

4. Bagheri, S. Modified iron oxide nanomaterials: Functionalization and application / S. Bagheri, N.M. Julkapli // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2016. - Vol. 416. - P. 117-133. - DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.05.042.

5. Hydrothermal synthesis of monodisperse magnetite nanoparticles / T.J. Daou, G. Pourroy, S. Bégin-Colin [et al.] // Chemistry of Materials. - 2006. - Vol. 18, № 18. - P. 4399-4404. - DOI: 10.1021/cm060805r.

6. Structural and magnetic properties of uniform magnetite nanoparticles prepared by high temperature decomposition of organic precursors / A.G. Roca, M.P. Morales, K. O'Grady, C.J. Serna // Nanotechnology. - 2006. - Vol. 17, no. 11. - P. 2783-2788. - DOI 10.1088/0957-4484/17/11/010.

7. Gupta, A.K. Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications / A.K. Gupta, M. Gupta // Biomaterials. - 2005. - Vol. 26, no. 18. - P. 3995-4021. – DOI: 10.1016/j.biomaterials.2004.10.012.

8. Cornell, R.M. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses / R.M. Cornell, U. Schwertmann. - 2nd ed. - Weinheim: Wiley-VCH, 2003. - 664 p. – DOI: 10.1002/3527602097.

УДК 547-32

РАЗРАБОТКА СИНТЕЗА 4-АЦЕТИЛФЕНИЛЦИКЛОАЛКАН-1,2-ДИКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ И ПРОИЗВОДНЫХ НА ИХ ОСНОВЕ

Е.А. Бажан, М.Д. Аникина, А.М. Шенцева

Научный руководитель – А**.А. Фирстова**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье представлены результаты работы по разработке технологии синтеза 4-ацетилфенилциклоалкан-1,2-дикарбоновых кислот и их функциональных производных как биологически активных соединений, применяемых в сельском хозяйстве. Описаны методы получения с использованием доступных реагентов и простых химических реакций.

Ключевые слова: *синтез дикарбоновых кислот, синтез производных дикарбоновых кислот, ацилирование, алкилирование, рострегулирующие вещества, сельскохозяйственные препараты*

DEVELOPMENT OF THE SYNTHESIS OF 4-ACETYLPHENYLCYCLOALKANE-1,2-DICARBOXYLIC ACIDS AND THEIR DERIVATIVES

E.A. Bazhan, M.D, Anikina, A.M. Shentseva

Scientific Supervisor – **A.A. Firstova**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article presents the results of work on the development of technology for the synthesis of 4-acetylphenylcycloalkane-1,2-dicarboxylic acids and their functional derivatives as biologically active compounds used in agriculture. The methods of obtaining these compounds using available reagents and simple chemical reactions are described.

Keywords: *synthesis of dicarboxylic acids, synthesis of dicarboxylic acid derivatives, acylation, alkylation, growth regulators, agricultural* ***chemicals***

В настоящее время актуальной проблемой сельского хозяйства является поиск новых соединений, способных улучшить качества посевного материала, увеличить продуктивность, а также повысить устойчивость к фитопатогенам, морозо- и засухостойкость.

Синтез пестицидов для борьбы с сорными растениями напрямую связан с несколькими национальными целями развития Российской Федерации, определёнными Указом Президента от 21 июля 2020 года № 474 [1]. Эти цели включают обеспечение продовольственной безопасности, технологического суверенитета, снижения негативного воздействия на окружающую среду и повышения эффективности аграрного сектора.

Научно-исследовательский проект направлен на создание и разработку технологии синтеза нового биологически активного соединения. Основные достоинства предлагаемого метода: использование доступных и недорогих реактивов на всех стадиях, сокращение числа стадий, высокий выход конечного продукта, возможность промышленного масштабирования, замещение импортных средств той же направленности и существенное сокращение себестоимость препарата.

В настоящее время поиск и разработка методов синтеза биологически активными свойствами, является важным направлением исследований. Стратегия развития производства пестицидов (средств защиты растений, СЗР) до 2030 года в России реализуется в рамках нескольких ключевых документов: Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса и Стратегии развития агропромышленного комплекса (АПК).

Известно, что соединения, содержащие фрагменты карбоновых кислот и их производных, обладают высокой биологической активностью и эффективны в качестве широкого противогрибковых [2, 3], инсектицидных [4] и гербицидных [5] препаратов. Однако в настоящее время существует проблема устойчивой резистентности патогенов к известным препаратам, высокий уровень отходов или негативное воздействие на окружающую среду. Таким образом, поиск и создание соединений, лишенных известных недостатков, являются актуальной задачей в области науки о пестицидах [6,7].

Необходимость данного научно-исследовательского проекта направлена на создание улучшенной технологии синтеза нового соединения с сохранением требуемых характеристик для биологически активных соединений (чистота, высокий выход, устойчивость). Наличие доступной сырьевой базы – основные реактивы выпускаются на территории РФ и дружественных стран и по доступным ценам, что делает проект экономически выгодным. Разработка простого и эффективного в технологическом плане метода синтеза новых соединений – 4-ацетилфенилциклоалкан-1,2-дикарбоновых кислот и их функциональных производных с сохранением высоких качественных характеристик для применения в качестве средств защиты растений, в том числе рострегулирующих средств.

Предлагаемый нами метод синтеза 4-ацетилфенилциклоалкан-1,2-дикарбоновых кислот и их функциональных производных, содержащих ароматическое кольцо и карбоксильные группы, циклогексановый и норборнановый фрагменты, представлен на рис. 1.

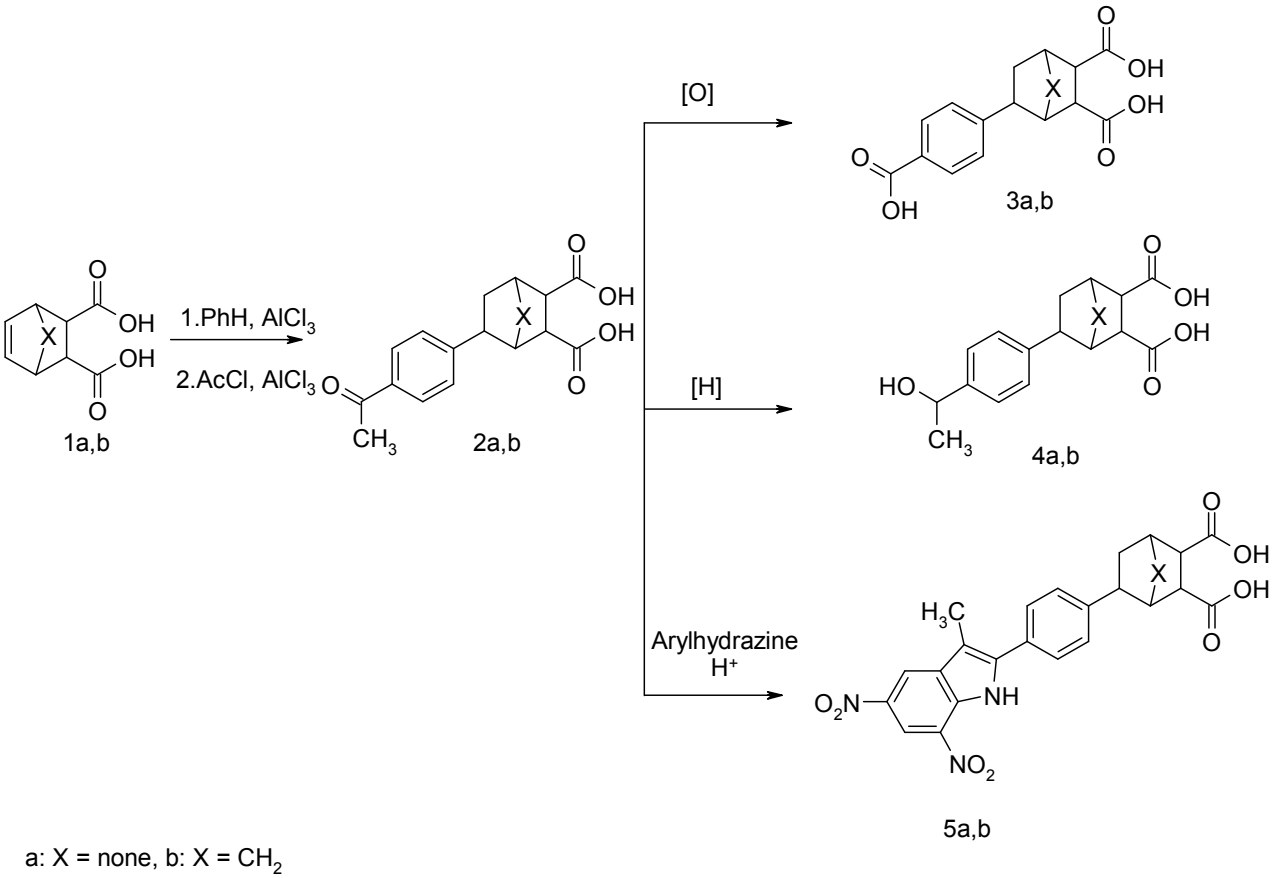


Рис. 1. Синтез 4-ацетилфенилциклоалкан-1,2-дикарбоновых кислот и их производных

Методика основана на достаточно простых реакциях, хорошо освещённых в литературе: гидролиз ангидридов, алкилирование по Фриделю-Крафтсу и ацилирование по Фриделю-Крафтсу, а также восстановлению кетонов, окисление галоформной реакцией, синтез индолов по Фишеру.

Применение предлагаемых соединений в качестве рострегулирующих средств для сельского хозяйства должно быть обосновано наличием не только биологической

активности, но и отсутствием токсичности, в том числе отсутствие отрицательного воздействия на генетический материал. В нашей работе осуществлена оценка цитогенетических и мутагенных свойств кислот и установлено, что соединения обладают антипролиферативными свойствами. Такие соединения могут быть использованы для борьбы с сорными растениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента Рос. Федерации от 21.07.2020 № 474 // Собрание законодательства Рос. Федерации. — 2020. — № 30. — Ст. 4884. – URL: https://base.garant.ru/74404210/

2) Synthesis of Benzoxazole Amides as Novel Antifungal Agents Against Malassezia furfur / B.J. Kim, J. Kin, Y. K. Kin [et al.] // Bulletin of the Korean Chemical Society. – 2010. — Vol. 31, no. 5. – P. 1270–1274. - DOI: 10.5012/bkcs.2010.31.5.1270.

3) Synthesis, structure and structure–activity relationship analysis of caffeic acid amides as potential antimicrobials / J. Fu, K. Cheng, Z. M. Zhang [et al.] // European Journal of Medicinal Chemistry. — 2010. — Vol. 45, No. 6. — P. 2638–2643. – DOI:10.1016/j.ejmech.2010.01.066.

4) Synthesis, crystal structure and larvicidal activity of novel diamide derivatives against Culex pipiens Novel coumarin derivatives: synthesis, antimicrobial activity and QSAR study / R.-Z.C. Wu, X.J. Du, L.X. Xiong [et al.] // Chemistry Central Journal. — 2012. — Vol. 6. — Art. 99. – DOI: 10.1186/1752-153X-6-99.

5) Synthesis and Herbicidal Activities of Novel 3-N-Substituted Amino-6-methyl-4-(3-trifluoromethylphenyl)pyridazine Derivatives / H. Xu, X.H. Hu, X.M. Zou [et al.] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. — 2008. — Vol. 56, No. 16. — P. 6567–6572. – DOI: 10.1021/jf800900h.

6) Synthesis, antifungal and antibacterial activity for novel amide derivatives containing a triazole moiety Synthesis, antifungal and antibacterial activity for novel amide derivatives containing a triazole moiety Design, synthesis and antimicrobial evaluation of novel pyrimidine derivatives / R.Tang, J. Linhong, M. Chengli [et al.] // Chemistry Central Journal. — 2013. — Vol. 7. — Art. 30. – DOI; 10.1186/1752-153X-7-30.

7) Synergistic Effects of Three Piper Amides on Generalist and Specialist Herbivores / L.A. Dyer, J. Richards, C.D. Dodson // Journal of Chemical Ecology. — 2003. — Vol. 29, No. 11. — P. 2499-2514. – DOI: 10.1023/A:1026310001958.

УДК 667.6

УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.О. Бакунин, А.А. Ильин

Научный руководитель – **А.А. Ильин**, д-р хим. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Проанализировано влияние различных добавок на скорость диспергирования пигментов и наполнителей при получении воднодисперсионной грунтовки, а также их влияние на физико-механические и защитные свойства отвержденных покрытий.

Ключевые слова: *функциональные добавки, защитные свойства, воднодисперсионная грунтовка, водостойкость, солестойкость*

ANALYSIS OF ADDITIVES FOR DISPERSING WATER-DISPERSION MATERIALS

D.O. Bakunin, A.A. Ilyin

Scientific Supervisor **– A.A. Ilyin,** Doctor of Chemical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The influence of various surfactants on the rate of distribution and wetting of pigments and fillers in the production of water-dispersion primer was analyzed, as well as their effect on the performance properties of the formed coatings.

Keywords*: functional additives, protective properties, water-based primer, water resistance, salt resistance*

Введение

В настоящее время во всем мире наблюдается тенденция к повышению экологических требований к производству и использованию лакокрасочных материалов и покрытий [1]. Одним из главных направлений решения данной задачи является разработке экологически безопасных материалов и покрытий без органических растворителей. Среди таких материалов особое место занимают водно-дисперсионные лакокрасочные материалы, в частности эмали и грунтовки для защиты различных металлоконструкций [2].

При разработке новых водных антикоррозионных составов критически важным аспектом является правильный подбор функциональных добавок, особенно диспергаторов. Эти компоненты оказывают существенное влияние не только на скорость и качество распределения пигментов и наполнителей в связующем веществе до требуемого размера частиц, но и на конечные характеристики покрытия, включая его антикоррозионные свойства [3, 4].

В современной лакокрасочной промышленности исторически сложилась устойчивая зависимость от импортных функциональных добавок, преимущественно европейского производства. Эти компоненты традиционно занимали доминирующую позицию на российском рынке благодаря их высокой эффективности и стабильному качеству.

Технологическая специфика производства многих водно-дисперсионных грунтовок требовала использования конкретных добавок, которые обеспечивали оптимальные параметры диспергирования пигментов и наполнителей, а также необходимые эксплуатационные характеристики готовых покрытий. Однако с 31 марта 2022 года произошло существенное изменение рыночной ситуации — поставки европейских добавок на территорию России были прекращены [5]. Это создало серьезные вызовы для отечественной лакокрасочной промышленности и потребовало оперативного поиска альтернативных решений.

Актуальность исследования альтернативных добавок обусловлена необходимостью решения нескольких ключевых задач: оптимизация энергозатратного процесса диспергирования компонентов; сохранение и улучшение эксплуатационных характеристик покрытий; обеспечение технологической независимости производства и др. задач.

Целью данного исследования было выяснить, как различные типы диспергаторов, используемых при изготовлении водно-дисперсионных грунтовок, влияют на скорость смачивания и дезагрегацию частиц пигментов и наполнетелей (время перетира) и на физико-механические и защитные показатели получаемых покрытий.

1 Объекты и методы исследований

1.1 Объекты исследований.

В качестве пленкообразующей системы разрабатываемой противокоррозионной грунтовки была использована водная акрилстирольная дисперсия.

В качестве пигмента использовали красный железооксидный пигмент, наполнителями служили тальк и фосфат цинка. Общая степень наполнения составляла от 13 до 15 объёмных процентов.

В исследованиях использовались следующие функциональные добавки:

Добавка №1 – раствор высокомолекулярного блок-сополимера с пигмент-афинными группами. Обеспечивает дефлоккуляцию пигментов за счёт стерической стабилизации;

Добавка №2 – аммониевая соль полимерной кислоты, дефлоккуляция достигается электростатическим расклиниванием;

Добавка №3 – модифицированный акриловый сополимер в водном растворе, дефлоккуляция обоснованна комбинированным механизмом (электростатический и стерический);

Добавка №4 – синтетический неионогенный полимер с пигмент-афинными группами, рекомендуется для стабилизации наполнителей, органических и неорганических пигментов, а также сажи. Обеспечивает стерическую стабилизацию.

1.2 Методы исследований.

1.2.1 Методы диспергирования.

Предварительное диспергирование компонентов пигментной пасты проводили на диссольвере фрезой при окружной скорости около 3 метров в секунду на протяжении 10 минут. Окончательное диспергирование производилось в погружной бисерной мельнице при скорости вращения ротора 2000 оборотов в минуту. Требуемая степень перетира составляла примерно 30 микрон (оценивалась по клину — гриндометру) [6].

1.2.2 Определение оптимальной дозировки диспергаторов

Для каждой функциональной добавки сначала подбирали оптимальное количество, которое обеспечивает минимальную вязкость пигментной пасты (при минимальной вязкости достигается наилучшее смачивание и распределение частиц). Исследовали зависимость вязкости от содержания добавки. В результате были определены следующие оптимальные дозировки:

- добавка №1 — 5,0 мас. %;
- добавка №2 — 1,0 мас. %;
- добавка №3 — 2,0 мас. %;
- добавка №4 — 3,0 мас. %.

1.2.3 Приготовление образцов покрытий и методы испытаний

На основе полученных пигментных паст приготовили четыре серии образцов покрытий водно-дисперсионной грунтовки. Грунтовки наносили пневматическим распылением на стальные пластины из стали марки 08КП в два слоя. Общая толщина покрытия составляла 60 микрон. Каждый слой сушили при температуре 80 °С в течение двух часов. Перед испытаниями образцы выдерживали семь суток.

Защитные свойства оценивали двумя способами:

Испытание на стойкость к воздействию повышенной температуры и влажности воздуха [7].

Испытание в камере соляного тумана согласно методике [8].

Кроме того, измеряли адгезию по ГОСТ 31149 (метод решётчатого надреза), прочность покрытия при ударе по ГОСТ 4765 и эластичность по ГОСТ 6806.

2 Результаты исследований и их обсуждение

2.1 Влияние функциональных добавок на скорость перетира

Для каждого состава снимали зависимость степени перетира от времени диспергирования в бисерной мельнице. Требуемая тонкость помола (30 мкм) достигалась за разное время. Самые быстрые результаты показала добавка №4: нужный размер частиц был получен за 24 минуты. С добавкой №1 процесс занял 40 минут, с добавкой №2 — 30 минут, с добавкой №3 — также 30 минут. Таким образом, использование функциональной добавки №4 позволяет существенно сократить самую энергоёмкую стадию производства грунтовки.

2.2 Результаты коррозионных испытаний

Результаты испытаний показали, что тип функциональной добавки сильно влияет на долговечность покрытий в агрессивных средах.

В камере влажности (повышенная температура + влажный воздух) покрытие с добавкой №4 продержалось 288 часов без видимых разрушений. С добавкой №1 – 222 часа, с добавкой №2 – 202 часа, с добавкой №3 – 288 часов (добавки №3 и №4 показали одинаковый результат в этом тесте).

В соляном тумане разница оказалась заметнее: покрытие с добавкой №4 выдержало 448 часов, тогда как с добавками №1 – 201 час, с №2 – 244 часа, с №3 – 288 часов. Добавка №4 явно превосходит остальные по противокоррозионной стойкости.

2.3 Механические свойства покрытий

Дополнительно оценили адгезию, ударную прочность и эластичность. При испытании адгезионных свойств все составы показали одинаковый результат — 1 балл. Во время испытаний прочности при ударе лучшие значения (50 см) демонстрируют покрытия с добавками №1 и №4. Показатель эластичности (изгиб на стержне) всех четырех образцов демонстрируют минимальное значение 1 мм, что свидетельствует о высокой эластичности полученных покрытий. Таким образом, по механическим свойствам значимых различий нет, все составы показали близкие результаты.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы:

Тип функциональной добавки существенно влияет и на скорость диспергирования, и на эксплуатационные свойства готовых покрытий.

Наименьшее время перетира до 30 мкм (24 минуты) обеспечивает функциональная добавка №4 — синтетический неионогенный полимер с пигмент-афинными группами.

Покрытия, полученные с использованием добавки №4, показывают наилучшую стойкость в условиях повышенной влажности и особенно в соляном тумане (448 часов), что превосходит результаты остальных трёх добавок.

Испытания физико-механических свойств полученных покрытий показали отсутствие значительного влияния добавок на данные свойства.

Таким образом, для производства водно-дисперсионной акрил-стирольной противокоррозионной грунтовки рекомендуется применять функциональную добавку №4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Куликова, Н.Г. Водно-дисперсионные лакокрасочные материалы // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2017. – № 3. – С. 42–45.

2) Дринберг, А.С. Новые лакокрасочные материалы для строительства и промышленности // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2016. – № 12. – С. 38–41.

3) Ермилов, П.И. Пигменты и пигментированные лакокрасочные материалы / П.И. Ермилов, Е.А. Индейкин, И.А.Толмачев. – Л.: Химия, 1987. – 200 с.

4) Казакова, Е.Е. Водно-дисперсионные акриловые лакокрасочные материалы строительного назначения. – М.: Пэйнт-Медиа, 2003. – С. 3–29.

5) Главная задача – обеспечить отрасль сырьем // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2022. – № 11. – С. 22–23.

6) ГОСТ 34303-2017. Материалы лакокрасочные. Метод определения степени размельчения.

7) ISO 6270-2:2017. Paints and varnishes – Determination of resistance to humidity – Part 2: Condensation (interior climate).

8) ГОСТ 9.401. ЕСЗКС Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов, метод Б (без надреза).

УДК 667.662

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОГО ПИГМЕНТА ИОНООБМЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

С.В. Варгасова, А.Е. Терешко, А.А. Ильин

Научный руководитель – **А.Е. Терешко**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В ходе работы синтезирован противокоррозионный пигмент путем механохимического внедрения в поверхностные слои частиц природного диоксида кремния ионов кальция. Определены основные пигментные свойства. Проведено исследование противокоррозионной активности пигмента.

Ключевые слова: *противокоррозионный пигмент, диоксид кремния, гидроксид кальция, поляризационные исследования*

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF AN ION-EXCHANGE ANTICORROSIVE PIGMENT

S.V. Vargasova, A.E. Tereshko, A.A. Ilyin

Scientific Supervisor – **A.E. Tereshko,** Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

In the course of the work, an anticorrosive pigment was synthesized by mechanochemical incorporation of calcium ions into the surface layers of particles of natural silicon dioxide. The main pigment properties are determined. A study of the anticorrosive activity of the pigment has been conducted.

Keywords: *anticorrosive pigment, silicon dioxide, calcium hydroxide, polarization studies.*

На сегодняшний день перед лакокрасочной промышленностью стоит актуальная задача – повышение противокоррозионных свойств лакокрасочных материалов, которая может быть решена за счет разработки новых противокоррозионных пигментов, обладающих пониженной токсичностью, себестоимостью и повышенной эффективностью. Российское и европейское законодательство требует снижения содержания или исключения содержания в составе противокоррозионных полимерных покрытий свинца, хрома, цинка, стронция, меди и других токсичных компонентов.

Одним из подходов к решению данного вопроса служит разработка эффективных, без содержания тяжелых металлов, противокоррозионных пигментов из возобновляемого сырья.

Для решения экологических проблем и замены противокоррозионных пигментов, которые имеют в своем составе токсичные компоненты, были разработаны ионообменные противокоррозионные пигменты торговых марок Shieldex™, Dowex™ и Activox™, которые замедляют скорость коррозионных процессов в покрытиях, не нанося ущерб окружающей среде. Это одни из первых противокоррозионных пигментов, полученных из диоксида кремния, механизм действия которых заключался в ионном обмене.

Процесс ионного обмена представляет собой перераспределение ионов между основным активным компонентом и контактирующим раствором электролита или окружающей средой.

Механизм действия ионообменных пигментов заключается в том, что вода и агрессивные ионы различных газов, проникающие в покрытие, активируют высвобождение ионов металла и основного вещества - диоксида кремния, которые мигрируют к поверхности раздела покрытие/подложка, а на поверхности металла (из-за того, что на металле имеются микронеоднородности) начинают развиваться анодные и катодные области. В результате

такого проникновения коррозионноактивных ионов на анодном участке металл переходит в степень окисления 2+, а иногда 3+. На катодном участке происходит реакция взаимодействия воды с образованием гидроксил ионов. Вследствие чего гидроксил ионы взаимодействуют с ядром диоксида кремния, образуя воду и анион SiO_3^{2-}. Далее ионы кальция взаимодействуют с анионами SiO_3^{2-}. В результате этих реакций образуется силикат кальция и силикат железа - вещества, замедляющие процесс коррозии, которые образуют микропленку, обеспечивая анодную и катодную защиту. [1]

Некоторые исследования показывают, что защитное действие от проникновения в покрытие коррозионноактивных компонентом может быть связано не только с ионным обменном, но и с процессом пассивации стали, который возникает из-за высокого pH под покрытием в присутствии противокоррозионного пигмента (pH ~ 9).

С целью улучшения качества пигментированных лакокрасочных материалов и снижения энергозатрат на диспергирование пигменты модифицируют, микрокапсулируют или получают в виде выпускных форм. При модифицировании повышается устойчивость пигментной дисперсии к флокуляции в процессе диспергирования и при дальнейших стадиях обработки. [2-3]

Синтез противокоррозионного пигмента ионообменного действия осуществляли сначала в дисольвере, а затем в бисерной мельнице. Диоксид кремния, сухой порошок гидроксида кальция и воду загружали в дисольвер и выстраивали нужную частоту вращения дискофрезной мешалки. Затем перемещали пигментную пасту в бисерную мельницу для дальнейшего проведения синтеза. Полученный образец пигмента подвергался сушке. В таблице 1 приведены некоторые свойства противокоррозионного пигмента.

Таблица 1. Пигментные свойства противокоррозионного пигмента

Показатель	Значение
pH водной вытяжки пигмента	9,24
Содержание водорастворимых солей, %	0,88
Маслоемкость, г/100г	82,4
Размер частиц, мкм	1,7

Противокоррозионную активность пигмента определяли потенциодинамическим методом путем сопоставления поляризационных кривых, а также рассчитываемых на их основе токов коррозии. Катодные и анодные поляризационные кривые приведены на рис. 1.

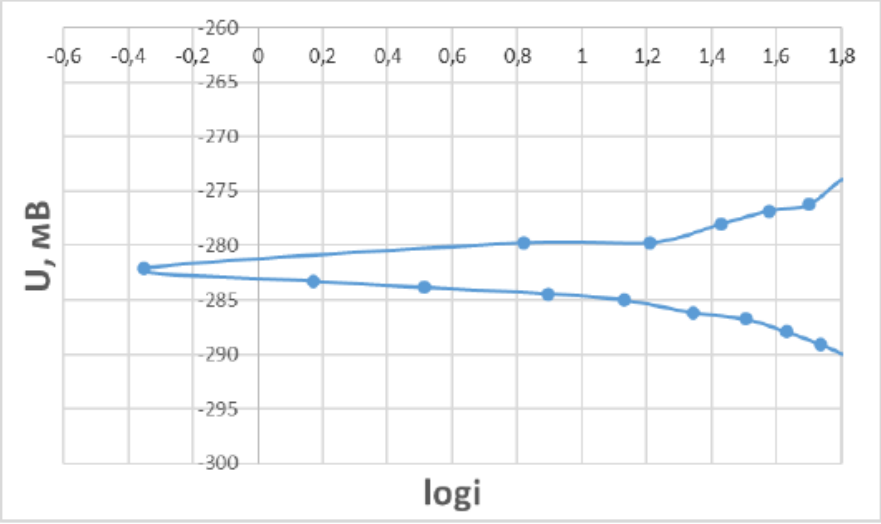


Рис. 1. Поляризационные кривые стали в суспензии пигмента в 3%-ном растворе хлорида натрия

Введение в 3%-ный водный раствор хлорида натрия модифицированного диоксида кремния приводит к существенному уменьшению плотности тока коррозии примерно в 2,5 раза. Это говорит об ингибирующем действии синтезированного пигмента на поверхности стали.

Таким образом, потенциодинамическими исследованиями установлено, что пигмент, полученный на основе диоксида кремния, может использоваться в качестве ингибитора коррозии в составе лакокрасочных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Ильин, А.А. Экологически чистые противокоррозионные пигменты на основе растительного сырья / А.А. Ильин, Е.А. Индейкин // От химии к технологии. Шаг за шагом. – 2021. Том 2, вып. 4. – С. 14-17. – URL:

2) Толмачев, И.А.. Пигменты и их применение в красках: Краткое руководство для инженеров технологов / Толмачев И.А., Петренко Н.А. – М.: Пэйнт-Медиа, 2012. – 144 с.

3) Ермилов, П.И. Пигменты и пигментированные лакокрасочные материалы: Учеб. пособие для вузов / П.И. Ермилов, Е.А. Индейкин, И.А. Толмачев. – Л.: Химия, 1987. – С. 8, 10, 104-106, 128.

УДК 547.853:547.816.4

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ЗАМЕЩЕННЫХ ХРОМЕНО[4,3-*d*]ПИРИМИДИН-2-ТИОНОВ

Е.В. Волков, Е.С. Макарова, Ж.В. Чиркова

Научный руководитель – **Ж.В**. **Чиркова**, д-р хим. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В настоящей работе представлены получение и характеристика тиоурониевых солей на основе хромено[4,3-d]пиримидин-2-тионов. Соединения выделены в виде индивидуальных диастереомеров, их структура подтверждена методами ЯМР 1H,13C и масс-спектрометрии. Показано, что синтезированные вещества обладают умеренным антибактериальным действием в отношении чувствительных штаммов грамположительных и грамотрицательных бактерий, а также грибковой культуры.

Ключевые слова: *хромены, тиомочевины, хромено[4,3-d]пиримидин-2-тионы, S-алкилирование, антимикробная активность*

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF SUBSTITUTED CHROMENO[4,3-*d*]PYRIMIDINE-2-THIONES

E.V. Volkov, E.S. Makarova, Zh.V. Chirkova

Scientific Supervisor – **Zh.V. Chirkova,** Doctor of Chemical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

This paper presents the preparation and characterization of thiouronium salts based on chromeno[4,3-d]pyrimidine-2-thiones. The compounds were isolated as individual diastereomers, and their structures were confirmed by 1H, 13C NMR and mass spectrometry. The synthesized compounds were shown to exhibit moderate antibacterial activity against sensitive strains of gram-positive and gram-negative bacteria, as well as fungal cultures.

Keywords: *chromenes, thioureas, chromeno[4,3-d]pyrimidine-2-thiones, S-alkylation, antimicrobial activity*

Циклические производные тиомочевины на протяжении длительного времени вызывают интерес исследователей благодаря их биологической активности [1]. Препараты такие Тиопентал и Тиоаминал, находят применение в качестве анальгетиков и снотворных средств. Кроме того, пятичленный тиомочевинный фрагмент входит в структуру лекарственного препарата Энзалутамид [2].

В 2020 году были опубликованы данные о выраженной антибактериальной активности медных комплексов, содержащих 4-тиоксо[1,3,5]оксадиазоциновые фрагменты [3]. Однако работы, посвящённые изучению антимикробных свойств S-алкилзамещённых тиомочевин, немногочисленны [4]. Имеются также сведения, что включение в молекулу хроменового гетероцикла может способствовать проявлению противовирусной активности [5].

Цель данной работы – разработка методики синтеза тиоурониевых солей на основе хроменопиримидинтионов и оценка их антимикробного потенциала для выявления новых перспективных хемотипов.

Сульфанильные производные пиримидинтионов широко применяются для получения различных пиримидинов, поскольку метилтиольная группа в таких соединениях может быть замещена другим гетероатомом [6]. Вместе с тем сведения о синтезе тиоурониевых солей дигидропиримидинов встречаются редко [7].

Для получения новых замещённых хромено[4,3-d]пиримидинов и опреления их антибактериальной активности были синтезированы тиоурониевые соли 3 (схема 1). Взаимодействие (4R*,4aS*,10bR*)-диастереомеров 1a–d [8] с алкилирующими реагентами 2a–c (метилиодид – a, метиловый эфир бромуксусной кислоты – b,

4-хлорфенацилбромид – c) проводили в ацетоне при 20–40 °C до растворения исходных веществ. После удаления растворителя полученный маслянистый остаток обрабатывали дихлорметаном, что приводило к выпадению белого твёрдого осадка. Выходы тиоурониевых солей 3 варьировались от 58 до 87%.

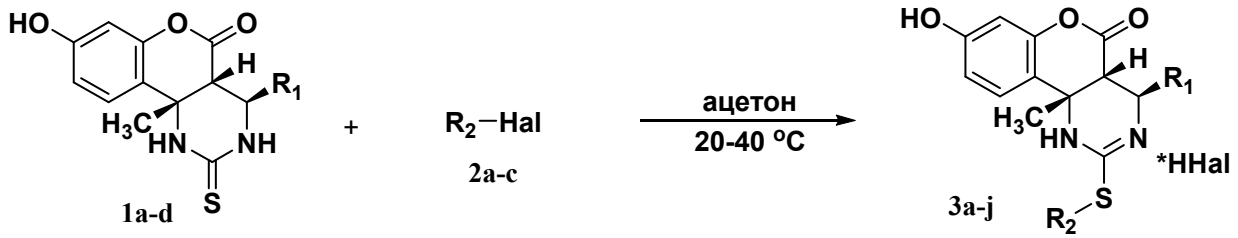


Схема 1

3a – R_1=4-Cl-C_6H_4, R_2=Me, Hal=I (84%);
3b – R_1=4-MeO-C_6H_4, R_2=Me, Hal=I (83%);
3c – R_1=C_6H_5, R_2=$CH_2C(O)OMe$, Hal=Br (87%);
3d – R_1=4-Cl-C_6H_4, R_2=$CH_2C(O)OMe$, Hal=Br (84%);
3e - R_1=C_6H_5, R_2=4-Cl-$C_6H_4C(O)CH_2$, Hal=Br (70%);
3f – R_1=4-Cl-C_6H_4, R_2=4-Cl-$C_6H_4C(O)CH_2$, Hal=Br (58%).

Структура всех синтезированных соединений 3a–f надёжно подтверждена совокупностью данных ИК-спектроскопии, ЯМР (1H,13C,NOESY) и масс-спектрометрии. Как показал анализ спектров ЯМР, конфигурация (4R*,4aS*,10bR*)-диастереомеров в продуктах 3a–f полностью сохраняется.

Полученные вещества прошли скрининг на антибактериальную и противогрибковую активность. Исследования выполнены методом двукратных серийных разведений на чувствительных культурах: грамотрицательные бактерии *Escherichiacoli* C600, *Pseudomonasfluorescens* A1, грамположительные – *Staphylococcusaureus* *ATCC-25923*, и культуре гриба *Candidaalbicans* ATCC 10231 (табл. 1).

Все протестированные соединения проявили умеренную антибактериальную активность. Наиболее эффективным в отношении *Staphylococcusaureus* ATCC-25923 оказалось соединение **3a**, значение МИК составило 128 мкг/мл. Данное вещество можно рассматривать как отправную точку для дальнейшей разработки новых антибактериальных препаратов.

Таблица 1. Результаты проверки антибактериальных свойств

№	Структура	Gram "+"	Gram "–"		МИК Грибы *Candida ATCC 10231*, мкг/мл
		МИК *Staphylococcus aureus ATCC-25923*, мкг/мл	МИК *Escherichia coli C600*, мкг/мл	МИК *Pseudomonas fluorescens A1*, мкг/мл	
1	**3a**	128	128	128	256
2	**3b**	256	256	>256	>256
3	**3c**	256	256	>256	>256
4	**3d**	256	128	128	>256
5	**3e**	256	>256	>256	>256
6	**3f**	256	>256	>256	>256
7	*Контроль: антибиотик "Пефлоксацин"*	*<8*	*<8*	*<8*	*<8*

В соответствии с прогнозом программы PASS, тиоурониевые соли хроменопиримидинов с вероятностью до 70% могут выступать в роли ингибиторов фосфатаз. Чтобы проверить гипотезу о возможном механизме антибактериального действия через

подавление бактериальной фосфатазы, был выполнен молекулярный докинг соединения **3а** с мембранной фосфатазой BacA с использованием пакета AutodockVina 1.2.7.

Трёхмерная модель BacA (PDB ID: 5OON) взята из базы белковых структур. Подготовка белка осуществлялась в Auto Dock Tools (ADT): удалены молекулы воды, добавлены полярные атомы водорода, рассчитаны заряды Гастайгера, типы атомов приведены в соответствие с силовым полем AutoDock 4.

Центр сайта связывания определён по положению каталитических остатков Glu21, Ser27 и Arg174. Расчётная сетка с координатами центра x=26.6, y=20.0, z=20.0 и размерами 19×19×19 Å охватывала полость активного центра.

Трёхмерная структура лиганда построена с помощью библиотек meeko и rdkit, проведена энергетическая минимизация, назначены вращающиеся связи. Докинг выполнялся с параметрами exhaustiveness=32 и energyrange=3, генерировалось девять режимов связывания на каждый запуск.

Визуализация выполнена в программах Discovery Studio 2025 Client и PyMOLStereo 3D Zalman (рис. 1 и 2).

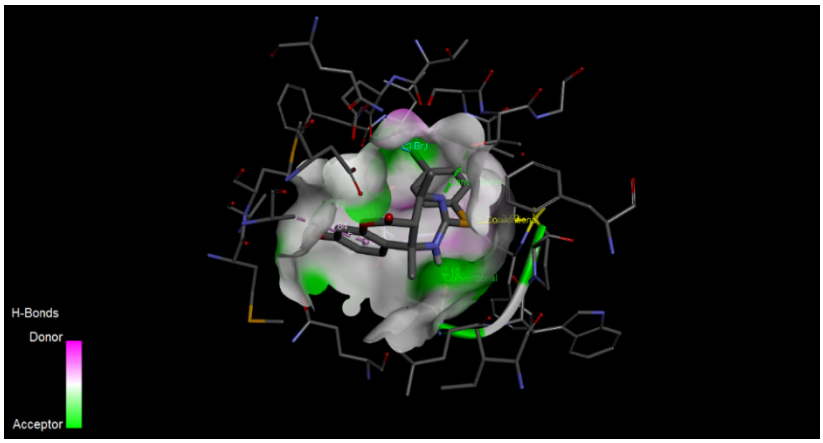


Рис. 1. 3D-визуализация mode 2 соединения 3а в программе Discovery Studio 2025

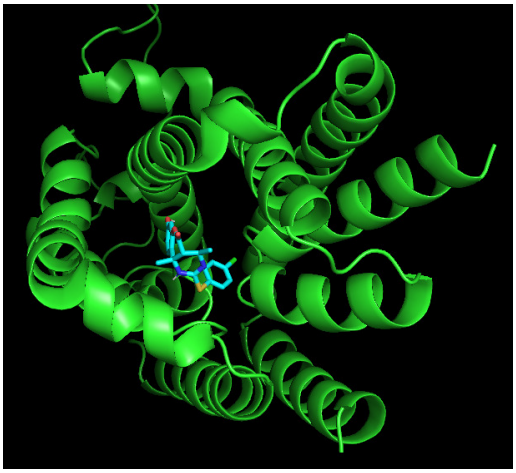


Рис. 2. 3D-визуализация mode 2 соединения 3а в программе PyMOLStereo 3D Zalman

Молекулярный докинг соединения **3а** в активный центр BacA выявил девять возможных режимов связывания с расчётным сродством от –8,12 до –7,36 ккал/моль. Наилучший результат (mode 1, сродство –8,12 ккал/моль) сопровождался лишь ван-дер-ваальсовыми контактами с Arg174. Второй режим (mode 2, сродство –8,05 ккал/моль, среднеквадратичное отклонение 3.46 Å от первого режима) продемонстрировал чёткую ориентацию лиганда с образованием взаимодействий, затрагивающих все три каталитических остатка.

Сравнение с референсным ингибитором, описанным Юкичем с соавт. (IC50 = 42 мкМ, аффинность –6,93 ккал/моль), показывает, что соединение **3а** обладает более высокой расчётной аффинностью, что указывает на потенциально более высокую ингибирующую активность. Галогенная связь с Glu21 может дополнительно стабилизировать комплекс, поскольку такие взаимодействия обычно вносят вклад в энергию связывания порядка 2–5 ккал/моль по сравнению с ван-дер-ваальсовыми контактами.

Результаты insilico дают основания для дальнейшей медико-биологической оптимизации и экспериментальной проверки соединения **3а** как ингибитора BacA, а также требуют более детального исследования взаимосвязи «структура – активность».

Таким образом, предложен эффективный подход к синтезу новых тиоурониевых солей 2-тиогексагидрохромено[4,3-d]пиримидин-5-онов, и изучена их антимикробная активность insilico и invitro.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Novel pyrimidinic selenourea induces DNA damage, cell cycle arrest, and apoptosis in human breast carcinoma / F.A. Barbosa, T. Siminski, R.F. Canto, G.M. Almeida, N.S. Mota, F. Ourique, R.C. Pedrosa, A.L. Braga // Eur. J. Med. Chem. – 2018. – Vol. 155. – P. 503-515. DOI: 10.1016/j.ejmech.2018.06.026

2) CLSI. Methods for Dilution Antimicrobial Susceptibility Tests for Bacteria that Grow. – Aerobically: Approved Standard. – 9th ed. – Wayne, PA: Clinical and Laboratory Standards Institute, 2012. – (CLSI document; M07-A9).

3) Enzalutamide with Standard First-Line Therapy in Metastatic Prostate Cancer / I.D. Davis, A.J. Martin, M.R. Stockler [et al.] // N. Engl. J. Med. – 2019. – Vol. 381, no. 2. – P. 121. – DOI: 10.1056/NEJMoa1903835

4) A Condensation of Biginelli Products with 1,3-Benzenediols: a Facile Access to Diastereomerically Pure Hexahydro-5 H -chromeno[4,3- d]pyrimidin-5-ones / S.I. Filimonov, Z.V. Chirkova, M.V. Kabanova, E.S. Makarova, A.A. Shetnev, V.A. Panova, K.Y. Suponitsky // Chemistry Select. – 2019. – Vol. 4, no. 33. – P. 9550. – DOI: 10.1002/slct.201901997.

5) Towards discovery of inhibitors of the undecaprenyl-pyrophosphate phosphatase BacA by virtual high-throughput screening. / M. Jukič [et al.] // Comput Struct Biotechnol J. – 2022 – Vol. 20. – P. 2360-2371. – DOI:10.1016/j.csbj.2022.05.010

6) Synthesis of novel bridged dinitrogen heterocycles and their evaluation as potential fragments for the design of biologically active compounds / J. Hashim, N. Arshad, I. Khan, S. Nisar, B. Ali, M.I. Choudhary // Tetrahedron. – 2014. – Vol. 70, no. 45. – P. 8582. – DOI: 10.1016/j.tet.2014.09.069

7) Copper(i) halide and palladium(ii) chloride complexes of 4-thioxo[1,3,5]oxadiazocines: Synthesis, structure and antibacterial activity / A.S. Kuzovlev, D.A. Volkova, V. ParfenovaI [et al.] // New J. Chem. – 2020. – Vol. 44, no. 19. – P. 7865. – DOI: 10.1039/C9NJ05958J.

УДК 666.117.2:661.693.2

ЛЕГКОПЛАВКИЕ ГЕРМАНАТНЫЕ СТЕКЛА

П.В. Жишкевич

Научный руководитель **– Е.Е. Трусова**, канд. техн. наук, доцент

Белорусский государственный технологический университет

Представлены результаты исследований легкоплавких стекол для спая с металлами и керамикой. Разработанные составы стекол характеризуются низкими температурами и широким диапазоном величин температурного коэффициента линейного расширения.

Ключевые слова: *легкоплавкие стекла, германатная матрица, низкотемпературные спаи*

LOW-MELTING GERMANATE GLASSES

P.V. Zhishkevich

Scientific Supervisor – **E.E. Trusova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Belarusian State Technological University

The results of studies of low-melting glasses for soldering metals and ceramics are presented. The developed glass compositions are characterized by low temperatures and a wide range of linear thermal expansion coefficients.

Keywords: *low-melting glasses, germanate matrix, low-temperature seals*

Легкоплавкие стекла представляют собой отдельный класс стекломатериалов и могут применяться для спаев с металлами, стеклом или керамикой, герметизации полупроводниковых приборов с целью защиты их от механических воздействий и химической коррозии. В некоторых случаях применение легкоплавкого стекла обусловлено ограничениями, накладываемыми на максимальную температуру спаивания. Как правило, легкоплавкие стекла имеют температуру плавления в диапазоне 700–1000 °С, что значительно ниже, чем у традиционных стекол (которые плавятся при температуре около 1400–1500 °С).

Все легкоплавкие стекла условно можно разделить на оксидные, бескислородные и комбинированные. К оксидным стеклам относятся: свинец-содержащие; боратные; фосфатные; висмут–, талий–, ванадийсодержащие; теллур–, германий–, цинкосодержащие стекла и др. К бескислородным стеклам относятся фторсодержащие, халькогенидные стекла и стекла, содержащие ион Cl^-. К комбинированным легкоплавким стеклам относятся оксихалькогенидные и оксифторидные стекла.

Основными требованиями к легкоплавким стеклам, помимо низкой температуры плавления, являются согласование температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с соединяемыми материалами, хорошая смачиваемость и адгезия, а также химическая стабильность и электроизоляционные свойства.

В настоящее работе для разработки легкоплавких стекол принято сечение в стеклообразующей четырехкомпонентной системе $PbO–TeO_2–GeO_2–B_2O_3$ с переменным содержанием 15–45 мол. % PbO; 30–60 мол. % TeO_2; 10–40 мол. % GeO_2 при постоянном содержании B_2O_3.

В данной системе оксид свинца значительно снижает температуру стеклования и увеличивает поляризуемость, оксид теллура обеспечивает высокую плотность и низкую энергию фононов, а оксид бора и оксид германия выступают в роли классических стеклообразователей, позволяя регулировать структурную сетку и, как следствие, ТКЛР и вязкость стекла.

Синтез стекол осуществляется при температуре 900 ºС в газопламенной печи периодического действия с выдержкой при максимальной температуре 30 мин. Для снятия внутренних напряжений стекла отжигались в электрической муфельной печи при температуре 300 °С. Все стекла хорошо проварились и имели желтый цвет.

Спектры пропускания разработанных стекол характеризуются поглощением в УФ и видимой области спектра и высокой крутизной участка спектра, отвечающего краю полосы поглощения. С увеличением содержания оксида свинца край полосы поглощения постепенно смещается из УФ области спектра (410 нм для 15 мол. % PbO) в сторону больших длин волн (462 нм для 45 мол. % PbO), сопровождаясь усилением поглощения в видимой части спектра, что согласуется с усилением окраски разработанных составов стекол.

Исследование кристаллизационных свойств разработанных стекол выявила высокую устойчивость стеклообразного состояния и небольшую область составов склонных к кристаллизации. При максимальной концентрации TeO_2 60 мол. % стекло полностью закристаллизовалось. Область составов с 50 мол. % TeO_2 имели признаки кристаллизации в интервале 703–685 ºС и 508–451 ºС при содержании 10 мол. % GeO_2 и 455,8–449 ºС при содержании 20 мол. % GeO_2. Данные составы могут быть перспективны для получения на их основе стеклоцементов. В отличие от некристаллизующихся стекол при спаивании стеклоцементов необходимо, чтобы стекло вначале расплавилось, образуя прочный контакт со спаиваем материалом, а затем закристаллизовалось, образуя механически прочный спай.

Плотность стекол находится в интервале 4851–5408 кг/м^3. Присутствие оксидов тяжёлых металлов оксида германия, теллура и оксида свинца в составе стекол вносит определенный вклад в значение плотности стекол. Поскольку атомная масса оксида свинца больше атомной массы оксида германия, то эквимолекулярная замена GeO_2 на PbO при постоянном содержании оксида TeO_2приводит к повышению плотности стекол. Замена PbO на TeO_2 и TeO_2 на GeO_2 приводит к закономерному снижению данного показателя.

Для получения спая легкоплавкого стекла с другим материалом основным требованием является соблюдение соответствия величин их ТКЛР. Невыполнение этого требования приведет к отколу спая, развитию трещин и других пороков, связанных с механическим нарушением целостности покрытия, развитию напряжений, возникающих в стекле при спаивании его с металлом или керамикой. ТКЛР стекол изучен с помощью дилатометра DIL402 PC NETZSCH и находится в интервале $(108{,}7–145{,}4)\cdot10^{-7}$ К$^{-1}$. Замена GeO_2 на PbO при постоянном содержании оксида TeO_2приводит к повышению ТКЛР стекол, так же как и замена PbO на TeO_2. При замене TeO_2 на GeO_2 ТКЛР стекол снижается. Характер кривых не носит прямолинейный характер, что свидетельствует о некотором нерегулярном изменении упруго-геометрических параметров химических связей и иллюстрирует преобразования в структуре стекла, вероятно, координационного типа.

Дилатометрическая температура начала деформации стекла (вязкость порядка 10^{11}Па·с) изменяется в интервале 360–420 ºС.

Структура стекол изучена методом рамановской спектроскопии. Использован лазер с длиной волны 532 нм. Запись спектров проводилась в одинаковых условиях при комнатной температуре (рис. 1).

На приведенных спектрах можно выделить следующие характеристические полосы. Слабовыраженная полоса при 320 см$^{-1}$ может быть отнесена к колебаниям Pb–O. Полоса рассеивания при 470 см$^{-1}$ характерна для валентных колебаний мостиковых связей Ge–O–Ge в тетраэдрах [GeO_4], интенсивность которой возрастает с увеличением содержания GeO_2 до 40 мол. %. Полоса рассеивания при 735 см$^{-1}$ может интерпретироваться как результат валентных колебаний связей Te–O в структурных единицах [TeO_3], образование которых стимулируется присутствием модифицирующих оксидов, в первую очередь PbO. Полоса рассеивания в высокочастотной части спектра при **1335** см$^{-1}$ отражает валентные колебания связей бора $B^{III}–O–B^{IV}$ или колебания связей [BO_3] групп, но с немостиковым кислородом ($B^{III}–O^-$).

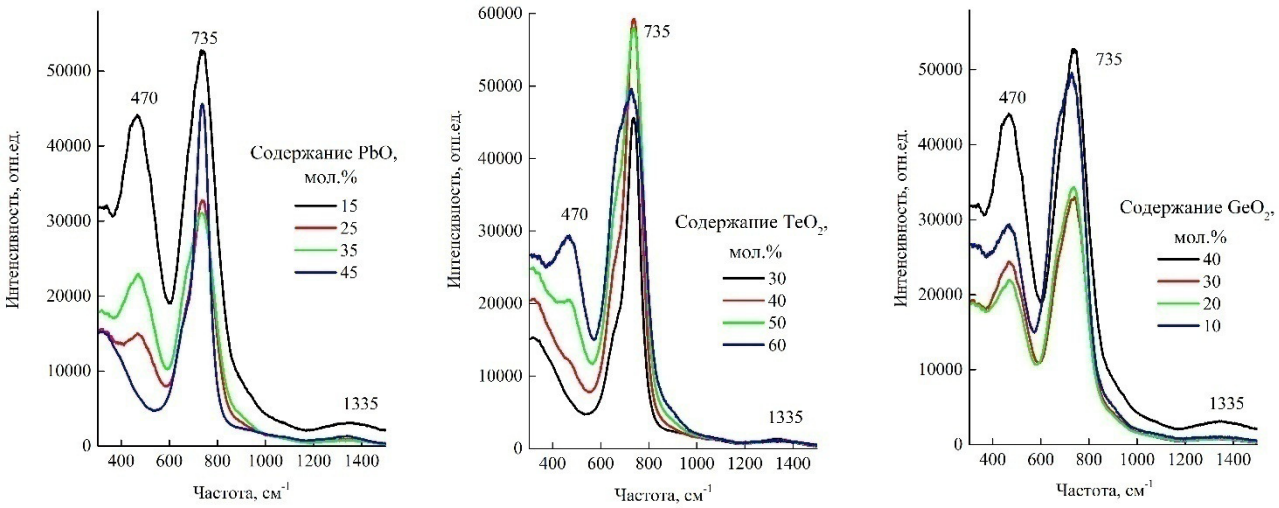


Рис. 1. Рамановские спектры стекол при различном содержании компонентов

Таким образом, в результате проведенных исследований разработаны составы легкоплавких, которые могут быть использованы в приборостроении и радиоэлектронной технике для пассивации, герметизации спаев с различного рода металлами, стеклами и керамиками.

УДК 547.818.1

ВОССТАНОВЛЕНИЕ 3-НИТРО-3,4-ДИГИДРО-2*H*-ТИОПИРАНОВ ДО 3-АМИНО-3,4-ДИГИДРО-2*H*-ТИОПИРАНОВ

Е.Е. Журавлева, И.Д. Карпов, К.Л. Овчинников

Научный руководитель – **К.Л. Овчинников**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Показана возможность восстановления нитрогруппы в неаннелированных 3-нитро-3,4-дигидро-2H-тиопиранах. Использование цинковой пыли в качестве восстановителя в данной реакции приводит к 3-амино-3,4-дигидро-2H-тиопиранам.

Ключевые слова: *восстановление 2H-тиопиранов, 3-нитро-3,4-дигидро-2H-тиопираны, восстановление нитросоединений, получение 3-амино-3,4-дигидро-2H-тиопиранов*

REDUCTION OF 3-NITRO-3,4-DIHYDRO-2*H*-THIOPYRANS TO 3-AMINO-3,4-DIHYDRO-2*H*-THIOPYRANS

E.E. Zhuravleva, I.D. Karpov, K.L. Ovchinnikov

Scientific Supervisor – **K.L. Ovchinnikov,** Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The possibility of reducing the nitro group in unannulated 3-nitro-3,4-dihydro-2H-thiopyrans is demonstrated. Using zinc dust as a reducing agent in this reaction leads to 3-amino-3,4-dihydro-2H-thiopyrans.

Keywords*: reduction of 2H-thiopyrans, 3-nitro-3,4-dihydro-2H-thiopyrans, reduction of nitro compounds, production of 3-amino-3,4-dihydro-2H-thiopyrans*

2*H*-Тиопираны, по сравнению со своими кислородными аналогами являются гораздо менее исследованным классом гетероциклических соединений. В биологических объектах сравнительно недавно были обнаружены алкалоиды, содержащие тиопирановый цикл, такие как Эпикокцин А, Гарликнины и Эутипеллазины. Помимо медицинского использования тиопираны находят применение в технике: они используются в качестве органических проводников, фотоинициаторов для различных видов полимеризации, излучающих материалов для OLED-дисплеев, обладают фотохромными свойствами и применяются при изготовлении фоторезистов [1].

Недавно нами был разработан эффективный способ восстановления 3-нитро-2*H*-тиопиранов с помощью 2-фенилбензимидазолина [2]. Настоящая работа посвящена восстановлению нитрогруппы в 3-нитро-3,4-дигидро-2*H*-тиопиранах.

Реакции восстановления 3-нитро-2*H*-тиопиранов описаны в немногих публикациях [3-7]. Показано, что под действием боргидрида натрия гидрированию подвергается двойная связь между атомами C(3) и C(4) тиопиранового цикла, что приводит к 3-нитро-3,4-дигидро-2*H*-тиопиранам. В качестве растворителей были применены метанол [5] и смесь ТГФ/MeOH (10:1) [6]. В результате целевые продукты были выделены с выходами 15 - 30%.

3,4-Дигидро-2*H*-тиопираны могут быть восстановлены до соответствующих аминотиопиранов. В роли восстановителей были применены системы Zn/AcOH [3, 4] и Zn/HCl [5-7]. Упоминания об одностадийном синтезе аминотиопиранов непосредственно из 3-нитро-2*H*-тиопиранов отсутствуют. Также отметим, что во всех источниках описано восстановление лишь для ариланнелированных тиопиранов.

В качестве исходного соединения для восстановления нами был выбран 3-нитро-2,6-дифенил-3,4-дигидро-2*H*-тиопиран **1**. Уравнение реакции представлено на рис. 1. В качестве восстановителя использовалась цинковая пыль.

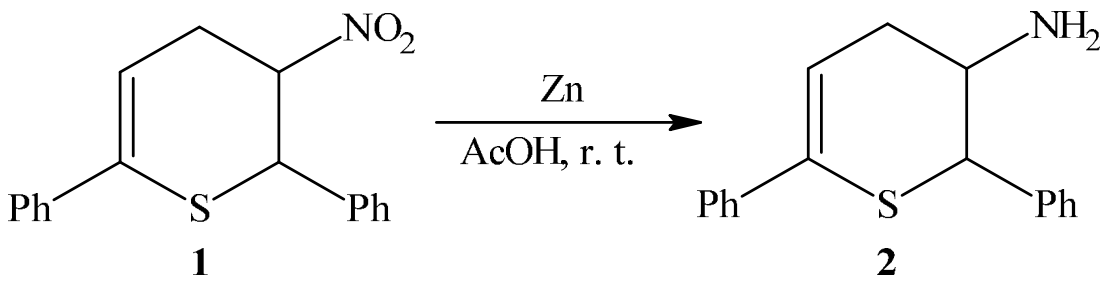


Рис. 1. Схема восстановления 2,6-дифенил-3-нитро-3,4-дигидро-2*H*-тиопирана

Было показано, что при проведении процесса при комнатной температуре в результате реакции образуется 2,6-дифенил-3,4-дигидро-2*H*-тиопиран-3-амин **2**. Продукт был выделен с выходом 79%.

Строение полученного вещества подтверждено инструментальными методами анализа (ИК- и ЯМР-спектроскопии, а также HRMS).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Candeias, N.R. Thiopyrans and Their Benzo Derivatives / N.R. Candeias, A. Efimov // Comprehensive Heterocyclic Chemistry IV. – 2021. – P. 512-670.

2) Karpov, I.D. A one-pot synthesis of 3-nitro-2H-thiopyrans and their selective reduction to 3-nitro-3, 4-dihydro-2H-thiopyrans / I.D. Karpov, A.V. Kolobov, I.P. Filippov, N.V. Rostovskii, K.L. Ovchinnikov // Chemistry of Heterocyclic Compounds. – 2024. – Vol. 60, № 5. – P. 251-256.

3) Assessment of dopamine D1 receptor affinity and efficacy of three tetracyclic conformationally-restricted analogs of SKF38393 / A.H. Clark, J.D. McCorvy, V.J. Watts, D.E. Nichols // Bioorganic & Medicinal Chemistry. – 2011. Vol. 19, iss. 18. – P. 5420–5431.

4) Analogues of doxanthrine reveal differences between the dopamine D1 receptor binding properties of chromanoisoquinolines and hexahydrobenzo[a]phenanthridines / J.P. Cueva, B.R. Chemel, J.I. Juncosa Jr., M.A. Lill, V.J. Watts, D.E. Nichols // European Journal of Medicinal Chemistry. – 2012. – Vol. 48. – P. 97-107.

5) Пат. № 110372663 КНР, МПК C07D 335/08. Sulfur-containing heterocyclic compound and application thereof as derivative of DPP4 inhibitor / Li Jingya, Zhao Wenjuan, Zhao Zhenjiang, Li Dan, Fang Xiaoyu / КНР. – опубл. 25.10.19.

6) Design, Synthesis and SAR Studies of Novel and Potent Dipeptidyl Peptidase 4 Inhibitors // N. Luo, X. Fang, M.Su, X. Zhang, D. Li, H. Li, S. Li, Z. Zhao // Chinese Journal of Chemistry. – 2021. – Vol. 39, iss. 1. – P. 115–120.

7) Synthesis of tetrahydrothiopyrano[2,3-b]indoles via [3+3] annulation of nitroallylic acetates with indoline-2-thiones / P. Basu, C. Hazra, T.V. Baiju, I.N.N. Namboothiri // New Journal of Chemistry. – 2020. – Vol. 44, iss. 4. – P. 1389-1399.

УДК 676.1:676.2.082.7

ВЛИЯНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ И КЛЕЕВЫХ СОСТАВОВ НА СВОЙСТВА РЕСТАВРАЦИОННОЙ БУМАГИ

В.Г. Карабань, И.Л. Грибачев, С.А. Гордейко

Научный руководитель – **С.А. Гордейко**, канд. техн. наук, доцент

Белорусский государственный технологический университет

Изготовлены образцы реставрационной бумаги из различных волокнистых полуфабрикатов с применением разных крахмальных клеев. Исследовано влияние состава и типа клея на физико-механические свойства реставрационной бумаги.

Ключевые слова: *волокнистый полуфабрикат, клеевой состав, реставрационная бумага.*

THE EFFECT OF FIBER SEMI-FINISHED PRODUCTS AND ADHESIVES ON THE PROPERTIES OF RESTORATION PAPER

V.G. Karaban, I.L. Gribachev, S.A. Gordeyko

Scientific Supervisor – **S.A. Gordeyko**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Belarusian State Technological University

Samples of restoration paper were produced from various fibrous semi-finished products using different starch adhesives. The effect of adhesive composition and type on the physical and mechanical properties of the restoration paper was studied.

Keywords: *fibrous semi-finished product, adhesive, restoration paper*

Сложность выбора наилучшего материала для реставрации связана с тем, что готовая бумага зачастую не соответствует необходимым физико-механическим параметрам и способности сочетаться с оригиналом. Также важным фактором выступает вид клея, от которого напрямую зависят прочность сцепления волокон.

Для решения этой проблемы в условиях отдела реставрации Национальной библиотеки Республики Беларусь были изготовлены образцы бумаги на листодоливочной машине из следующих композиционных материалов:

– бескислотный картон 100%;
– бескислотный картон 75% + хлопковая масса 25%;
– хлопковая масса 100%;
– правдинская бумага 100%;
– правдинская бумага 75% + хлопковая масса 25%.

Полученные образцы бумаги подвергали поверхностной обработки следующими клеевыми составами:

– обойный клей «Пуфас»;
– клей из пшеничного крахмала;
– заварной клей из картофельного крахмала;
– мучной клей;
– обойный клей «Пуфас» + «Полидез» (1%).

Клеевые составы различаются по происхождению, способу приготовления и свойствам.

Обойный клей «Пуфас» – это синтетический клей на основе метилцеллюлозы, он не требует варки, образует прозрачную эластичную пленку, устойчив к старению, но необратим.

Клей из пшеничного крахмала – натуральный, требует варки, дает матовую хрупкую пленку, обратим, но может давать желтоватый оттенок.

Заварной клей из картофельного крахмала также натуральный, варится, но в отличие от пшеничного образует более эластичную и прочную пленку, глубже проникает в волокна.

Мучной клей варится из муки, содержит не только крахмал, но и клейковину, дает плотную пленку, но может желтеть и быть питательной средой для микроорганизмов.

«Пуфас» + «Полидез» – это бинарная система, где «Пуфас» выступает основным связующим, обеспечивая прочность и эластичность склейки, а «Полидез» добавляет гидрофобные свойства, снижая влажность бумаги, но при этом создает микроканалы, повышающие капиллярную впитываемость.

Таблица 1. Результаты испытаний полученных образцов реставрационной бумаги

Вид композиционного материала	**Поверхностная проклейка состава**	**Влажность, %**	**Зольность, %**	**Капиллярная впитываемость, мм**	**Белизна, %**	**Разрывная длина в сухом состоянии, м**
1	2	3	4	5	6	7
Бескислотный картон 100%	обойный клей «Пуфас»	3,58	1,09	13	23,06	6190
	клей из пшеничного крахмала	4,21	0,71	12	23,51	5750
	заварной клей из картофельного крахмала	3,60	0,58	11	20,73	7570
	мучной клей	3,52	0,78	11	21,92	6375
	обойный клей «Пуфас» + «Полидез» (1%)	3,06	0,42	16	25,81	5350
Бескислотный картон 75% + хлопковая масса 25%	обойный клей «Пуфас»	2,53	1,18	15	28,61	5680
	клей из пшеничного крахмала	2,99	0,46	17	30,32	5570
	заварной клей из картофельного крахмала	3,12	0,74	10	24,62	6540
	мучной клей	3,17	0,69	13	31,31	6465
	обойный клей «Пуфас» + «Полидез» (1%)	3,25	0,85	15	33,27	4550
Хлопковая масса 100%	обойный клей «Пуфас»	1,25	0,92	8	51,57	3700
	клей из пшеничного крахмала	1,95	0,76	10	57,06	3405
	заварной клей из картофельного крахмала	1,22	0,69	4	51,71	5070
	мучной клей	1,71	0,44	7	51,26	3980
	обойный клей «Пуфас» + «Полидез» (1%)	0,67	0,84	15	54,95	2770
Правдинская бумага 100%	обойный клей «Пуфас»	2,18	3,54	11	22,77	4870
	клей из пшеничного крахмала	1,91	3,08	17	24,07	3840
	заварной клей из картофельного крахмала	1,26	4,12	12	24,53	5915
	мучной клей	2,05	2,88	13	20,59	5385
	обойный клей «Пуфас» + «Полидез» (1%)	0,55	3,08	12	25,77	4130
Правдинская бумага 75% + хлопковая масса 25%	обойный клей «Пуфас»	2,06	1,76	12	27,00	5270
	клей из пшеничного крахмала	2,85	0,92	14	27,27	3125
	заварной клей из картофельного крахмала	1,91	1,99	16	28,26	5320
	мучной клей	1,87	0,71	9	25,76	5010
	обойный клей «Пуфас» + «Полидез» (1%)	1,60	1,12	7	30,03	3455
Результаты процесса старения бумаги (ГОСТ 29331–92)						
правдинская бумага 75% + хлопковая масса 25%	обойный клей «Пуфас»	1,85	3,22	11	24,51	4095
Бескислотный картон 75% + хлопковая масса 25%	обойный клей «Пуфас» + «Полидез» (1%)	1,91	2,14	10	22,29	6035
Бескислотный картон 75% + хлопковая масса 25%	клей из пшеничного крахмала	2,18	2,32	11	26,71	4335

Влажность готовых образцов бумаги определяли в соответствии ГОСТ ISO 287-2014 (таб. 1). Значения данного показателя варьировались от 0,55 до 4,21%. Самые низкие значения (0,55–0,67%) были у образцов с поверхностной обработкой обойным клеем «Пуфас» и «Полидез», это предположительно связано с тем, что «Полидез» покрывает волокна водоотталкивающей пленкой, и бумага не «тянет» влагу из воздуха. Но при контакте с водой эта же пленка создает микроканалы, по которым жидкость быстро поднимается вверх – отсюда высокая капиллярная впитываемость. Эффект высокой капиллярной впитываемости при обработке Полидезом проявился только у двух образцов (с хлопком и бескислотным картоном), в связи с тем, что «Полидез» создает каналы лишь в подходящей среде – там, где волокна длинные и чистые. В правдинской бумаге много минеральных наполнителей, которые забивают поры и не дают образоваться четким каналам для быстрого подъема воды. Наибольшей влажностью (до 4,21%) обладает образец бескислотного картона с клеем из пшеничного крахмала, так как крахмалы сами по себе гигроскопичны и притягивают влагу.

Капиллярную впитываемость готовых образцов бумаги определяли в соответствии ГОСТ 12602-93. Значения данного показателя варьировались от 4 мм до 17 мм. Капиллярная впитываемость показывает, как быстро бумага впитывает влагу (клей). Минимальная впитываемость (4 мм) у чистой хлопковой массы с крахмальными клеями. Максимальная впитываемость (до 17 мм) у образцов с добавлением обойного клея «Пуфас» и «Полидез», особенно в сочетании с хлопком и правдинской бумагой. Для реставрации обычных листов важна умеренная впитываемость. Если бумага впитывает клей быстро и много, то клей будет уходить вглубь, и место ремонта станет жестким. Если впитываемость слишком низкая, клей не схватится, и заплатка отвалится. Оптимальные показатели выявлены у образцов из бескислотного картона с крахмальными клеями (10–13 мм) – они достаточно впитывают, чтобы клей работал, но не настолько, чтобы он «проваливался» насквозь.

Зольность готовых образцов бумаги определяли в соответствии ГОСТ 7629-93. Значения данного показателя варьировались от 0,42 до 4,12%. Самые низкие значения 0,42–0,48% у образцов из бескислотного картона с крахмальными клеями – там практически нет минеральных веществ, бумага состоит в основном из чистой целлюлозы. Самые высокие показатели (до 4,12%) у правдинской бумаги, особенно с заварным клеем. Это говорит о том, что в такую бумагу добавляют много наполнителей. Для реставрации книжных страниц низкая зольность важна потому, что некоторые наполнители со временем могут вымываться или вступать в химические реакции, повреждая оригинал.

Белизну готовых образцов бумаги определяли в соответствии ГОСТ 30113-94. Значения данного показателя варьировались от 20,59 до 57,06%. Самые высокие значения белизны (до 57,06%) у чистой хлопковой массы с пшеничным крахмалом. Хлопок сам по себе белый, так как не содержит лигнина, а пшеничный крахмал прозрачный и не дает желтизны. Правдинская бумага показывает среднюю белизну (20–28%), так как возможно содержит небеленую древесную массу с лигнином либо макулатуру высоких сортов. Самые низкие показатели белизны у бескислотного картона с мучным клеем (около 20%), что может быть связано с тем, что мука дает легкий сероватый или желтоватый оттенок. Для реставрации страниц важно подобрать бумагу, максимально близкую по белизне к оригиналу.

Прочность готовых образцов бумаги определяли в соответствии ГОСТ ISO 1924-96. Прочность образцов характеризовалась показателем разрывная длина, максимальное значение которого достигается у бескислотного картона с заварным клеем (до 6540 м), так как заварной клей на поверхности образца бумаги образует эластичную и прочную пленку, которая глубоко проникает внутрь листа, образуя дополнительные связи типа межволоконных. Высокие показатели разрывной длины (6200–6800 м) также были у образцов бескислотного картона с другими клеями. Добавка «Полидез» в большинстве случаев снижает прочность.

Процесс старения образцов бумаги проходил в соответствии ГОСТ 21331-92. Испытуемые образцы подвергали термическому старению в сушильном шкафу с принудительной циркуляцией нагретого до (150±2) °С воздуха и выдерживали в течение 24,0 ч ± 10 мин, что обеспечивало равномерное термическое воздействие на каждый образец. После завершения процесса искусственного старения исследуемых образцов было выявлено, что почти у всех образцов снизилась прочность (разрывная длина) на 10–15% и уменьшилась белизна на 2–4%. Лучше всего сохранились образцы с композитным клеем «Пуфас» (содержащим синтетические компоненты), так как такие составы устойчивее к нагреванию и деформационным превращениям. Однако для реставрации книжных страниц важна не только стойкость к старению, но и обратимость. Крахмальные клеи растворяются в воде, а синтетические компоненты – нет. Поэтому, несмотря на большую потерю прочности при старении, крахмальные клея предпочтительнее при проведении реставрации, поскольку они более сродсвенны бумаге, не содержат дополнительных химических добавок.

Таким образом, следует стараться избегать введения препарата Полидез, снижающего прочность бумаги. Предпочтительно использовать натуральные клеи.

По результату исследования наилучший эффект наблюдался у образцов бескислотного картона с крахмальными клеями, которые по своим свойствам могут оказывать бифункциональное действие на готовый образец, то есть придавать дополнительную прочность, обеспечивать оптимальную капиллярную впитываемость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Куприянова, И.В. Консервация и реставрация музейных предметов: учебное пособие / И.В. Куприянова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Барнаул: Алтайский государственный институт культуры, 2023. – 291 с.

2) Ситдиков, А.Г. Научные принципы и методы реставрации и консервации бумаги: учебно-методическое пособие / А.Г. Ситдиков, А.А. Деденева, Е.Е. Воробьева. – Казань: Издательство Казанского университета, 2020. – 60 с.

3) Рожкова, Г.С. Гигиена и реставрация библиотечных фондов: практическое пособие / Г.С. Рожкова. – Москва, 1985. – 158 с.

4) Добрусина, С.А. Стабилизация бумаги документов / С.А. Добрусина. – Москва: Межрегиональный центр библиотечного сотрудничества, 2014. – 174 с.

5) Лоцманова, Е.М. Атлас повреждений бумаги, блока, переплета библиотечных и архивных материалов / Е.М. Лоцманова, Е.С. Быстрова. Российская национальная библиотека, Федеральный центр консервации библиотечных фондов. – Санкт-Петербург, 2011. – 105 с.

6) Консервация и реставрация книг: методические рекомендации / Всесоюзная государственная библиотека иностранной литературы. – Москва: ВГБИЛ, 1987. – 210 с.

7) Привалов, В.Ф. Обеспечение сохранности архивных документов на бумажной основе: методическое пособие / В.Ф. Привалов; Росархив, ВНИИДАД. – Москва, 2003. – 112 с.

8) Мымрина, Е.В. Технологические приемы оперативной реставрации библиотечных фондов / Е.В. Мымрина, Р.М. Сальникова. – Санкт-Петербург: Российская национальная библиотека, 2024. – 132 с.

9) ГОСТ ISO 287-2014. Бумага и картон. Определение влажности продукции в партии. Метод высушивания в сушильном шкафу. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 12 с.

10) ГОСТ 12602-93. Бумага и картон. Определение капиллярной впитываемости. Метод Клемма. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. – 8 с.

11) ГОСТ 7629-93. Бумага и картон. Метод определения золь. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. – 10 с.

12) ГОСТ 30113-94. Бумага и картон. Метод определения белизны. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 11 с.

13) ГОСТ ISO 1924-96. Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 11 с.

14) ГОСТ 21331-92. Бумага и картон. Ускоренное старение. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2004. – 6 с.

УДК 547.853.1

СИНТЕЗ ЗАМЕЩЕННЫХ МЕТИЛ (*E*)-СТИРИЛПИРИМИДИН-5-КАРБОКСИЛАТОВ

А.С. Карандеева, Е.Н. Макарушко, М.В. Самородова

Научный руководитель – **Ж.В. Чиркова**, д-р хим. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Целью представленной работы является получение замещённых метил (E)-стирилпиримидин-5-карбоксилатов. Метод синтеза целевых структур заключается в конденсации дигидропиримидин-2(1H)-онов с замещёнными ароматическими альдегидами в среде хлористого железа(III). Для полученных соединений определены физико-химические параметры, а их структура доказана методами ЯМР-спектроскопии и масс-спектрометрии.

Ключевые слова: *метил (E)-стирилпиримидин-5-карбоксилаты, ароматические альдегиды, хлористое железо, ацетонитрил*

SYNTHESIS OF SUBSTITUTED METHYL (*E*)-STYRYLPYRIMIDINE-5-CARBOXYLATES

A.S. Karandeeva, E.N. Makarushko, M.V. Samorodova

Scientific Supervisor – **Zh.V. Chirkova**, Doctor of Chemical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The aim of the presented work is to obtain substituted methyl (E)-styrylpyrimidine-5-carboxylates. The synthesis method of the target structures is based on the condensation of dihydropyrimidine-2(1H)-ones with substituted aromatic aldehydes in the medium of iron(III) chloride. The physical and chemical parameters of the obtained compounds have been determined, and their structure has been proven using NMR spectroscopy and mass spectrometry.

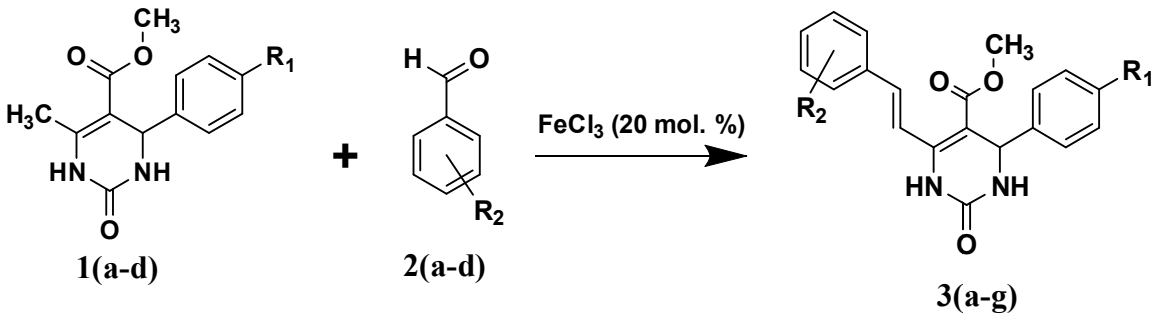
Keywords*: methyl (E)-styrylpyrimidine-5-carboxylates, aromatic aldehydes, iron chloride, acetonitrile*

Значительное количество биологически активных соединений, обладающих полезными для человека свойствами, содержат в своём составе азотсодержащие гетероциклы пиримидинового ряда. Их производные как природного, так и синтетического происхождения нашли широкое применение в клинической практике для терапии широкого ряда заболеваний, включая инфекционные [3,4,9,12], неврологические [6,11], онкологические [2,7] и иные заболевания.

Одним из классических подходов к синтезу пиримидиновых циклов является реакция Биджинелли [5], позволяющая посредством трёхкомпонентной конденсации синтезировать 3,4-дигидропиримидин-2(1*H*)-оны. Последующее введение стирильной группы в указанный класс гетероциклов позволило обнаружить ряд веществ, демонстрирующих разноплановую биологическую активность [10]. Последнее осуществимо путем винилогенной альдольной конденсации продуктов Биджинелли с альдегидами при использовании железа (III) в качестве катализатора [8].

Целью работы является разработка метода синтеза замещенных метил 2-оксо-4-арил-6-стирил-1,2,3,4-тетрагидропиримидин-5-карбоксилатов.

Реакция между исходными веществами **1(a-d)** и замещёнными ароматическими альдегидами **2(a-c)** протекала в среде кипящего ацетонитрила с обратным холодильником в течение 24 ч. при добавлении каталитических количеств $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (20 мол.%) [1]. В результате синтезированы новые метил (*E*)-стирилпиримидин-5-карбоксилаты **3(a-g)** с выходом до 49% (схема 1). Данные о выходах соединений 3(a-g) приведены в таблице 1.



1: R_1 = H (**a**), R_1 = Cl (**b**), R_1 = F (**c**), R_1 = Me (**d**);
2: R_2 = 4-Cl (**a**), R_2 = 4-F (**b**), R_2 = 4,5-Cl (**c**);
3: R_1 = H, R_2 = 4-F (**a**); R_1 = Cl, R_2 = 4-Cl **(b)**; R_1 = Cl, R_2 = 4-F (**c**); R_1 = F, R_2 = 4-F (**d**);
R_1 = F, R_2 = 4,5-Cl (**e**); R_1 = Me, R_2 = 4-Cl (**f**); R_1 = Me, R_2 = 4-F (**g**)

Схема 1

Таблица 1. Выход продуктов 3(a-g)

№	Соединение **3**	R_1, R_2	Выход, %
1	**a**	R_1 = H, R_2 = 4-F	33
2	**b**	R_1 = Cl, R_2 = 4-Cl	21
3	**c**	R_1 = Cl, R_2 = 4-F	27
4	**d**	R_1 = F, R_2 = 4-F	49
5	**e**	R_1 = F, R_2 = 4,5-Cl	41
6	**f**	R_1 = Me, R_2 = 4-Cl	28
7	**g**	R_1 = Me, R_2 = 4-F	15

Полученные вещества **3** подвергали очистке посредством перекристаллизации из изопропанола. Структура полученных соединений доказана методами ЯМР-спектроскопии и масс-спектрометрии. Масс-спектр соединения **3c** представлен на рис. 1.

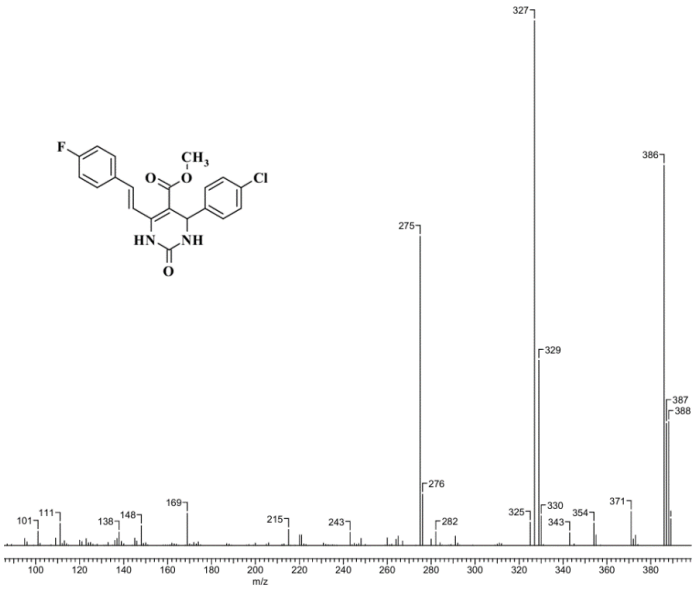


Рис. 1. Фрагмент масс-спектра соединения 3c

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синтез замещенных метил 2-оксо-4-арил-6-стирил-1,2,3,4-тетрагидропиримидин-5-карбоксилатов / Ж.В. Чиркова, А.С. Карандеева, Н.А. Богданова, Е.Н. Макарушко, Е.В. Волков, М.В. Самородова // От химии к технологии шаг за шагом. – 2026. – № 7. – С. 76-83. – URL: https://ystu.editorum.ru/ru/nauka/journal/236/view

2. Bafail, R.S.M. Anti-parkinsonian, anti-inflammatory, anti-microbial, analgesic, anti-hyperglycemic and anticancer activities of poly-fused ring pyrimidine derivatives / R.S.M. Bafail, W.A. Samman // Tropical Journal of Pharmaceutical Research. – 2024. – № 23.

3. Synthesis, characterization, antimicrobial activity and anticancer of some new pyrazolo[1, 5-a]pyrimidines and pyrazolo [5, 1-c] 1,2,4-triazines / M.A. Hosny, Y.H. Zaki, W.A. Mokbel, A. O Abdelhamid // Medicinal Chemistry. – 2020. – Т. 16, № 6. – С. 750-760.

4. Jadhav, P.A. Recent advances in antimicrobial activity of pyrimidines: a review / P.A. Jadhav, A.Baravkar // Asian J Pharm Clin Res. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 4-10.

5. Kappe, C.O. Multicomponent reactions. – Weinheim: Wiley-VCH, 2005. – С. 95-120.

6. Kundu, D. Purines and pyrimidines: metabolism, function and potential as therapeutic options in neurodegenerative diseases / D. Kundu, V.K. Dubey // Current Protein and Peptide Science. – 2021. – Т. 22, № 2. – С. 170-189.

7. Manna, T. Anticancer potential and structure activity studies of purine and pyrimidine derivatives: an updated review / T. Manna // Molecular Diversity. – 2025. – Т. 29, № 1. – С. 817-848.

8. Mostafa, A.S. Synthesis and anticancer activity of new dihydropyrimidinone derivatives / A.S. Mostafa // Eur. J. Med. Chem. – 2018. – № 156. – С. 304-315.

9. Radwan, M.A.A. Synthesis, molecular docking and antimicrobial activity of new fused pyrimidine and pyridine derivatives / M.A.A. Radwan // Bioorganic Chemistry. – 2020. – Т. 96. – С. 103516.

10. Shutalev, A. D. Simple synthesis of 4-aryl-6-styryl-1,2,3,4-tetrahydropyrimidin-2-ones by the alkaline hydrolysis of Biginelli compounds / A. D. Shutalev, A. N. Aksenov // Mendeleev Commun. – 2005. – № 15. – С. 73-75.

11. Singh, S. Naturally inspired pyrimidines analogues for alzheimer’s disease / S. Singh // Current Neuropharmacology. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 136-151.

12. Zhuang, J. Recent development of pyrimidine-containing antimicrobial agents / J. Zhuang, S. Ma // ChemMedChem. – 2020. – Т. 15, № 20. – С. 1875-1886.

УДК 674-419.3

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИСТВЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

М.В. Карпов, А.Г. Потахин, О.Н. Галактионов

Научный руководитель – **О.Н. Галактионов**, д-р техн. наук, доцент

Петрозаводский государственный университет

Переработка и использование сырья лиственной древесины – одна из острых проблем лесоперерабатывающего комплекса России. Ограниченное применение лиственной древесины обусловлено ее анатомическими и биологическими особенностями, однако, существуют технологии производства строительных материалов и изделий из сырья лиственной древесины, в том числе низкокачественного. В статье рассмотрены основные способы применения лиственной древесины в строительной отрасли.

Ключевые слова: *лиственная древесина, строительство, переработка древесины, конструкционные материалы, отделочные материалы*

USE OF HARDWOOD IN CONSTRUCTION

M.V. Karpov, A.G. Potakhin, O.N. Galaktionov

Scientific Supervisor – **O.N. Galaktionov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Petrozavodsk State University

The processing and use of hardwood raw materials is one of the pressing issues facing the timber processing industry in Russia. The limited use of hardwood is due to its anatomical and biological characteristics, nevertheless, there are technologies for manufacturing building materials and products wood raw materials, including low-quality wood. This article examines the main methods of using deciduous wood in the construction industry.

Keywords: *hardwood, construction, wood processing, structural materials, finishing materials*

Лиственные породы составляют от 26 до 30% от всего запаса древесины России, их долевое участие в составе лесов незначительно увеличивается, что ведет к увеличению запасов древесного сырья из лиственной древесины, однако, применение лиственной древесины в промышленном комплексе нашей страны и строительной сфере на данный момент сильно ограничено [4, 6].

Ограниченное применение лиственной древесины связано, в первую очередь, с ее анатомическими и биологическими особенностями – структурно лиственные породы сложнее хвойных из-за чего их обработка отличается высокой трудоемкостью и, следовательно, высокими затратами. Лиственные породы подвержены гниению, хуже сопротивляются воздействию окружающей среды, соответственно сфера применения лиственных пород в промышленности России крайне ограничена.

Однако наличие большого количества сырья лиственной древесины и ее доступность помогают найти применение в сферах, которые ранее не рассматривались как основные, например, строительство или мебельная промышленность. Лиственное сырье находит применение в производстве плитных строительных материалов – береза перерабатывается в шпон, из которого производят фанеру, ограничено лиственные породы применяются при производстве OSB, твердолиственные породы (дуб, орех, бук) применяются в мебельной промышленности. Однако важно понимать, что большая часть лиственной древесины не находит применения, так как является или низкокачественной, или тонкомерной, то есть не отвечает запросам производителей в размерных характеристиках (диаметре) сортимента или качестве, также многие мягколиственные породы не находят применения в промышленности из-за их биологических и анатомических особенностей [6].

Предлагается разработать модернизированные процессы существующих технологий изготовления плитных и массивных клееных материалов, которые позволят использовать их в других отраслях промышленности. В большей степени подобными изделиями интересуется строительная отрасль. Сфера строительства заинтересована в экономически доступных конструкционных и отделочных материалах из древесины. Основные требования к изделиям из подобных конструкционных материалов – воспринимать основные нагрузки, действующие на здания и атмосферные воздействия достаточно длительное время; отделочным материалам – воспринимать нагрузку от деятельности людей (истирание, вымывание и т.д.). Таким образом, можно выделить два набора основных характеристик видов строительных материалов: конструкционные материалы должны отличаться высокой прочностью, чтобы сопротивляться главным нагрузкам на здание и сооружения; отделочные материалы должны отличаться высокими эстетическими характеристиками и функциональными особенностями (устойчивость к бытовой химии, устойчивость к истиранию и т.д.). Древесные материалы отвечают данным требованиям в полной мере [7].

На данный момент предлагается усовершенствование существующих древесных изделий. Разработанный перспективный материал «Гофрошпон» может применяться в качестве отделочного, конструкционного и изоляционного материала. Конструктивно материал «Гофрошпон» является логическим развитием существующих плитных материалов – фанеры и OSB. Главная идея заключается в уменьшении объемного веса изделия за счет замены внутренних слоев конструкции гофрированными. Изменение внутренних слоев конструкции также позволило улучшить характеристики звукопоглощения и сократить теплопроводность изделия за счет наличия во внутренних пустотах воздуха, исключить сквозные мостики холода и прямой контакт слоев, что дополнительно улучшило звукопоглощение из-за перераспределения звуковых волн в слоях конструкции и снизило теплопроводность из-за непрямого контакта внешних слоев конструкции материала [2-4].

Материал «Гофрошпон» разработан в двух основных версиях – конструкционный и отделочный, конструкционная модификация материала отличается утолщенными внешними слоями для улучшения несущей способности, отделочная модификация отличается уменьшенной толщиной слоев из-за необходимости снижения объемного веса. Конструкция материала «Гофрошпон» представлена на рис. 1 (отделочная версия материала «Гофрошпон»).

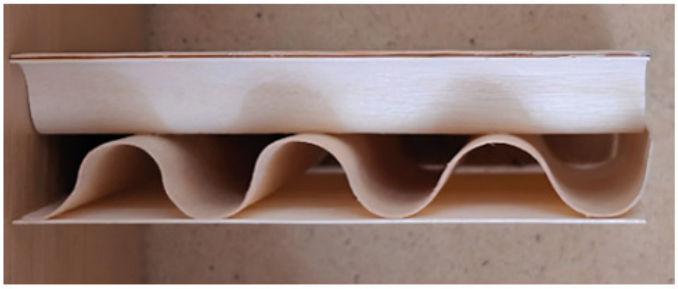


Рис. 1. Конструкция материала «Гофрошпон»

Разработка подобных плитных материалов позволит улучшить применение лиственной древесины в промышленном комплексе России, что улучшит положение как строительной отрасли, так как сокращаются капитальные затраты на строительные материалы, так и лесной комплекс, так как находится применение всего комплекса ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Исследование теплопроводности перспективного строительного материала "Гофрошпон" / О.Н. Галактионов, А.А. Кузьменков, Ю.В. Суханов, М.В. Карпов, А.Г. Потахин // Инженерный вестник Дона / Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. – Ростов-на-Дону, 2025. – № 1. - С. 407-417. - URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80436632

2) Исследование звукопроводности перспективного строительного материала «Гофрошпон» / О.Н. Галактионов, А.А. Кузьменков, А.С. Васильев, М.В. Карпов, А.Г. Потахин // Инженерный вестник Дона / Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. – Ростов-на-Дону, 2025. – № 1. – С. 690-699. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80436657.

3) Карпов, М.В. Применение древесины и древесного сырья для производства строительных материалов (на примере лесопромышленного комплекса Республики Карелия) / М.В. Карпов, А.А. Кузьменков, О.Н. Галактионов // Деревянное малоэтажное домостроение: экономика, архитектура и ресурсосберегающие технологии: сборник статей научно-практической конференции (13 ноября 2023 г.) / ПетрГУ. - Петрозаводск: Изд-во Петропресс, 2023. - С.136-142.

4) Мусько, Н.П. Влияние породы дерева на свойства плитных материалов / Н.П. Мусько, Н.В. Коренева // Ползуновский вестник. – 2016. – №3. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-porody-dereva-na-svoystva-plitnyh-materialov (дата обращения: 26.03.2026)

5) Исследование паропроницаемости гофропанелей из неликвидной древесины / А.Г. Потахин, Ю.В. Суханов, М.В. Карпов, О.Н. Галактионов // Актуальные проблемы развития лесного комплекс. – Вологда, 2024. – С.193-197.

6) Юрьев, Ю.Л. Проблемы переработки неликвидной лиственной древесины / Ю.Л. Юрьев, В.Б. Терентьев, С.А. Самойленко // Леса России и хозяйство в них. – 2013. – № 1(44). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-pererabotki-nelikvidnoy-listvennoy-drevesiny (дата обращения: 26.03.2026)

7) Wood raw materials and wood waste use for the building materials production (on the example of the Republic of Karelia timber industry) / A.A. Kuzmenkov, O.N. Galaktionov, M.V. Karpov, E.G. Emelyanova // E3S Web of Conferences / EDP Sciences - Web of Conferences. – France, 2023. – Iss. 458. - C. 07025. - URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345807025.

УДК 668.6

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ АКТИВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (ПАВ)

А.Н. Колосова, А.Е. Терешко

Научный руководитель – **А.Е. Терешко**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Исследована возможность влияния синергизма или конкуренции взаимодействия системы: различной среды и ПАВ.

Ключевые слова: *поверхностно-активные вещества, ионогенные поверхностно активные вещества, неионогенные поверхностно активные вещества, синергизм*

THE INFLUENCE OF THE MEDIUM ON THE SURFACE ACTIVITY OF SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES

A.N. Kolosova, A.E. Tereshko

Scientific Supervisor – **A.E. Tereshko**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The possibility of the influence of synergy or competition between the interaction of a system of different: environments and surfactants is investigated.

Keywords: *surfactants, ionogenic surfactants, neoinogenic surfactants, synergism*

Введение

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) широко используются в различных отраслях промышленности для улучшения свойств поверхностных. Однако их поведение существенно изменяется в зависимости от среды, что важно для стабилизации дисперсных систем, эмульсий и пен. Цель данной работы – изучение влияния различных сред (ПВС, глицерин, КМЦ, ОП-7, ПЭГ-4000) на основные поверхностные характеристики ряда ПАВ: критическую концентрацию мицеллообразования (ККМ), поверхностную активность, предельную адсорбцию и размер молекулярной площадки.

Исследования проводились в различных средах и при различной концентрации. В качестве среды использовались: вода, поливинилового спирта (ПВС), глицерина, КМЦ, ОП-7, ПЭГ-4000. В качестве исследуемых обзоров использовались следующие ПАВ: BYK-21, acrisol2020, Orotan-731A, Orotan-681, сульфанол, триполифосфат натрия, ОС-20.

Результаты исследований и их обсуждение

Таблица 1. Изучение свойств в воде

Наименование ПАВ	ККМ, моль/л	Поверхностная активность, мН/м	Предельная величина адсорбции, моль/м^2	Размер молекулярной площадки ПАВ, м^2
BYK-21	0,095	0,37	$1,97*10^{-4}$	$8,4*10^{-21}$
acrisol2020	0,052	0,15	$1,31*10^{-4}$	$12,8*10^{-21}$
O-681	0,015	0,30	$1,23*10^{-4}$	$13,5*10^{-21}$
Orotan-731A	0,218	0,37	$1,52*10^{-4}$	$10,9*10^{-21}$
Сульфанол	0,199	0,44	$1,07*10^{-4}$	$15,5*10^{-21}$
Триполифосфат натрия	0,100	0,20	$9,03*10^{-5}$	$18,4*10^{-21}$
ОС-20	0,0534	0,27	$1,52*10^{-4}$	$10,9*10^{-21}$

В таблице №1 приведены экспериментальные данные ПАВ, в качестве среды использовалась вода. На основании данных, можно заметить, что в воде наибольшую поверхностную активность проявили сульфанол (0,44 мН/м), BYK-21 и Orotan-731A (по 0,37 мН/м). По величине ККМ минимальное значение отмечено у Orotan-681 (0,015 моль/л), что свидетельствует о его высокой склонности к мицеллообразованию. Наибольшая предельная адсорбция зафиксирована для BYK-21 ($1{,}97 \cdot 10^{-4}$ моль/м²), а наименьшая — для триполифосфат натрия ($9{,}03 \cdot 10^{-5}$ моль/м²). Размер молекулярной площадки варьировался от $8{,}4 \cdot 10^{-21}$ (BYK-21) до $18{,}4 \cdot 10^{-21}$ м² (триполифосфат натрия), это указывает на различия в ориентации молекул на поверхности раздела фаз. Таким образом, вода является референтной средой, относительно которой в дальнейшем оценивается влияние других сред.

Таблица 2. Изучение свойств в ПВС

Наименование ПАВ	ККМ, моль/л	Поверхностная активность, мН/м	Предельная величина адсорбции, моль/м^2	Размер молекулярной площадки ПАВ, м^2
BYK-21	0,186	0,625	$1{,}43*10^{-4}$	$11{,}6*10^{-21}$
acrisol2020	0,817	0,310	$1{,}44*10^{-4}$	$11{,}5*10^{-21}$
O-681	0,0501	0,216	$1{,}54*10^{-4}$	$10{,}4*10^{-21}$
Orotan-731A	0,155	0,155	$1{,}50*10^{-4}$	$11{,}1*10^{-21}$
Сульфанол	0,275	0,503	$1{,}58*10^{-4}$	$10{,}2*10^{-21}$
Триполифосфат натрия	0,126	0,260	$1{,}75*10^{-4}$	$9{,}2*10^{-21}$
ОС-20	0,135	0,385	$1{,}36*10^{-4}$	$10{,}9*10^{-21}$

В среде ПВС наблюдается изменение поверхностной активности по сравнению с водой. У BYK-21 активность возрастает с 0,37 до 0,625 мН/м, что свидетельствует о синергизме между BYK-21 и ПВС. Аналогично поверхностная активность увеличивается у сульфанола с 0,44 до 0,503 мН/м. ОС-20 также демонстрирует рост с 0,27 до 0,385 мН/м. Но для acrisol2020, Orotan-731A и Orotan-681 активность снижается. Размер молекулярной площадки в ПВС для большинства ПАВ находится в диапазоне близком по значению к воде.

Таблица 3. Изучение свойств в глицерине

Наименование ПАВ	ККМ, моль/л	Поверхностная активность, мН/м	Предельная величина адсорбции, моль/м^2	Размер молекулярной площадки ПАВ, м^2
BYK-21	0,107	0,632	$1{,}64*10^{-4}$	$10{,}1*10^{-21}$
acrisol2020	0,0741	0,550	$1{,}36*10^{-4}$	$12{,}2*10^{-21}$
O-681	0,0794	0,432	$1{,}36*10^{-4}$	$11{,}8*10^{-21}$
Orotan-731A	0,1901	0,538	$1{,}39*10^{-4}$	$11{,}9*10^{-21}$
Сульфанол	0,100	0,548	$0{,}88*10^{-4}$	$18{,}3*10^{-21}$
Триполифосфат натрия	0,0661	0,572	$1{,}23*10^{-4}$	$13*10^{-21}$
ОС-20	0,0891	0,592	$1{,}79*10^{-4}$	$9{,}25*10^{-21}$

В среде глицерина замечается значительное улучшение показателей всех исследуемых ПАВ. Таким образом, глицерин особенно сильно увеличивает активность тех ПАВ, которые в воде были малоактивны (acrisol2020, триполифосфат натрия, ОС-20). Предельная величина адсорбции в глицерине варьируется от $0{,}88 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}79 \cdot 10^{-4}$ моль/м². Размер молекулярной площадки в глицерине несколько увеличился для большинства ПАВ, что может указывать на изменение ориентации молекул. Возможно, это может быть связно из-за сольватации полярных групп.

Таблица 4. Изучение свойств в КМЦ

Наименование ПАВ	ККМ, моль/л	Поверхностная активность, мН/м	Предельная величина адсорбции, моль/м^2	Размер молекулярной площадки ПАВ, м^2
BYK-21	0,0631	0,612	$1,47*10^{-4}$	$11,3*10^{-21}$
acrisol2020	0,0513	0,576	$1,57*10^{-4}$	$10,6*10^{-21}$
O-681	0,0617	0,442	$1,69*10^{-4}$	$9,54*10^{-21}$
Orotan-731A	0,0794	0,452	$1,21*10^{-4}$	$13,7*10^{-21}$
Сульфанол	0,0977	0,520	$1,43*10^{-4}$	$11,2*10^{-21}$
Триполифосфат натрия	0,0813	0,470	$1,08*10^{-4}$	$14,9*10^{-21}$
ОС-20	0,0794	0,623	$1,54*10^{-4}$	$10,8*10^{-21}$

Как видно из данных таблицы 4 КМЦ также способствует повышению поверхностной активности большинства ПАВ, хотя и в меньшей степени, чем глицерин. Для Orotan-681 и триполифосфата натрия значения чуть ниже по сравнению с глицерином, но выше, чем в воде. Предельная адсорбция в КМЦ варьируется от $1,08 \cdot 10^{-4}$ до $1,69 \cdot 10^{-4}$ моль/м².

Таблица 5. Изучение свойств в ОП-7

Наименование ПАВ	ККМ, моль/л	Поверхностная активность, мН/м	Предельная величина адсорбции, моль/м^2	Размер молекулярной площадки ПАВ, м^2
BYK-21	0,0676	0,602	$1,48*10^{-4}$	$11,2*10^{-21}$
acrisol2020	0,891	0,520	$1,45*10^{-4}$	$11,5*10^{-21}$
O-681	0,100	0,508	$1,43*10^{-4}$	$11,3*10^{-21}$
Orotan-731A	0,100	0,486	$1,58*10^{-4}$	$10,5*10^{-21}$
Сульфанол	0,0562	0,492	$1,47*10^{-4}$	$10,9*10^{-21}$
Триполифосфат натрия	0,0955	0,490	$1,48*10^{-4}$	$10,4*10^{-21}$
ОС-20	0,170	0,538	$1,50*10^{-4}$	$11,1*10^{-21}$

В ОП-7 все исследуемые ПАВ также показывают повышенную активность. Предельная адсорбция находится в узком диапазоне $1,43 \cdot 10^{-4}$ до $1,58 \cdot 10^{-4}$ моль/м², что может свидетельствовать о формировании однородного адсорбционного слоя. Размер молекулярной площадки варьируется $10,4 \cdot 10^{-21}$ до $11,5 \cdot 10^{-21}$ м². Однако можно заметить, что acrisol2020 в среде ОП-7 показывает аномально высокое значение критической концентрации мицелообразованию по сравнению с другими средами (вода, ПВС, глицерин, КМЦ). Это может указывать на подавление мицеллообразования в пользу адсорбции на поверхности.

Таблица 6. Изучение свойств в ПЭГ-4000

Наименование ПАВ	ККМ, моль/л	Поверхностная активность, мН/м	Предельная величина адсорбции, моль/м^2	Размер молекулярной площадки ПАВ, м^2
BYK-21	0,102	0,558	$1,52*10^{-4}$	$10,9*10^{-21}$
acrisol2020	0,104	0,482	$1,42*10^{-4}$	$11,7*10^{-21}$
O-681	0,107	0,530	$1,74*10^{-4}$	$9,24*10^{-21}$
Orotan-731A	0,105	0,493	$1,43*10^{-4}$	$11,7*10^{-21}$
Сульфанол	0,107	0,462	$1,71*10^{-4}$	$9,4*10^{-21}$
Триполифосфат натрия	0,144	0,540	$1,81*10^{-4}$	$8,87*10^{-21}$
ОС-20	0,0933	0,580	$1,69*10^{-4}$	$9,8*10^{-21}$

В ПЭГ-4000, также увеличивает поверхностную активность всех ПАВ по сравнению водой. Предельная адсорбция варьируется от $1{,}42 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}81 \cdot 10^{-4}$ моль/м². Размер молекулярной площадки в ПЭГ-4000 самый маленький среди всех сред (воды, ПВС, глицерин, КМЦ, ОП-7) для некоторых ПАВ: Orotan-731A, триполифосфат натрия, ОС-20. Это указывает на высокую поверхность плотности молекул.

Заключение

На основании приведенных данных, можно заметить, что среда оказывает влияние на поверхностную активность исследуемых ПАВ. Вода была основой средой, в отношении которой проводилась оценка влияния других сред. Глицерин, КМЦ, ОП-7, ПЭГ-4000, равномерно усиливают поверхностную активность исследуемых ПАВ. В ПАС происходит избирательное изменение свойств, для ряда ПАВ: BYK-21, сульфанол, триполифосфат натрия, ОС-20 наблюдаются положительные изменения.

Практическая часть заключалась в возможности выбора среды и оценивания влияния на регулирование поверхностных свойств ПАВ в технологических процессах (стабилизация эмульсии, пенообразование). Наиболее универсально себя проявил глицерин, КМЦ и ОП-7 были выборочны. Следующим этапом планируется изучение свойств при изменении концентрации среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Поверхностно-активные вещества / под ред. А.А. Абрамзона, Г.М. Гаевой. – Л.: Химия, 1979. –376 с.

2) Русанов, А.И. Мицеллообразование в водных растворах поверхностно-активных веществ. – СПб.: Химия, 1992.

3) Ланге, К.Р. Поверхностно-активные вещества: Синтез, свойства, анализ, применение. СПб.: Профессия, 2004. – С. 214. .

4) ГОСТ 29232-91. Анионные и неионногенные поверхностно-активные вещества. Определение критической концентрации мицеллобразования. Метод определения поверхностного натяжения с помощью пластины, скобы или кольца. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004

УДК 667.613

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ПИГМЕНТ-СВЯЗУЮЩЕЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАФОРЕЗНЫХ ПОКРЫТИЙ

И.Г. Кольцов[1,2], А.А. Ильин[2], А.В. Рундин[2]

Научный руководитель – **А.А. Ильин**, д-р хим. наук, профессор

[1]ЗАО «НПК ЯрЛИ», г. Ярославль
[2]Ярославский государственный технический университет

Рассмотрено влияние соотношения пигмент/связующее на декоративные, физико-механические и защитные свойства покрытий на основе эпоксидной катафорезной грунтовке. Наилучший комплекс свойств демонстрируют покрытия с соотношением пигмент/связующее, находящееся в диапазоне 0,20-0,30

Ключевые слова: *соотношение пигмент/связующее, декоративные, физико-механические, защитные свойства, эпоксидный аддукт*

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE PIGMENT-TO-BINDER RATIO ON THE CHARACTERISTICS OF CATAPHORESIS COATINGS

I.G. Koltsov[1,2], A.A. Ilin[2], A.V. Rundin[2]

Scientific Supervisor – **A.A. Ilin**, Doctor of Chemical Sciences, Professor

[1]ZAO «NPK YarLI», Yaroslavl
[2]Yaroslavl State Technical University

The influence of the pigment-to-binder ratio on the decorative, physical-mechanical, and protective properties of coatings based on epoxy cataphoresis primer has been examined. The best set of properties is demonstrated by coatings with a pigment-to-binder ratio in the range of 0,20–0,30.

Keywords*: pigment-to-binder ratio, decorative properties, physical-mechanical properties, protective properties, epoxy adduct*

Разработанный более 50 лет назад метод электроосаждения лакокрасочных материалов остается до настоящего времени одним из основных способов окраски [1]. Его широкое распространение обусловлено рядом существенных преимуществ, среди которых низкие потери лакокрасочного материала (при крупносерийном производстве), высокое качество получаемых покрытий на изделиях сложной формы, высокий уровень экологической безопасности, возможность автоматизации технологического процесса [2]. Осаждение лакокрасочного материала на катоде, в отличие от осаждения на аноде, позволяет получать покрытия с более высоким уровнем защитных свойств. Технология нанесения на сегодняшний день достаточно хорошо проработана и широко используется для эффективного окрашивания всех видов металлических изделий [3]. Однако остается ряд нерешённых вопросов, обусловленных сложным составом водно-дисперсионных лакокрасочных материалов. Поскольку отдельные компоненты выполняют различные функции, критически важно оценить, как их соотношение влияет на технологические параметры нанесения и эксплуатационные свойства получаемых покрытий при катодном электроосаждении.

Цель настоящей работы – исследование влияния соотношения пигмент/связующее в составе катафорезной грунтовки на декоративные и физико-механические свойства сформированных покрытий.

Образцы грунтовки с различным соотношением пигмент/связующее получали смешением основного связующего и пигментной пасты так, чтобы массовая доля нелетучих веществ составляла около 20,5%. В качестве разбавителя использовали обессоленную воду.

Пигментная паста представляла собой нейтрализованный уксусной кислотой эпоксиаминный аддукт (рис. 1) с добавлением диоксида титана, каолина, сульфата бария, сажи и целевых добавок.

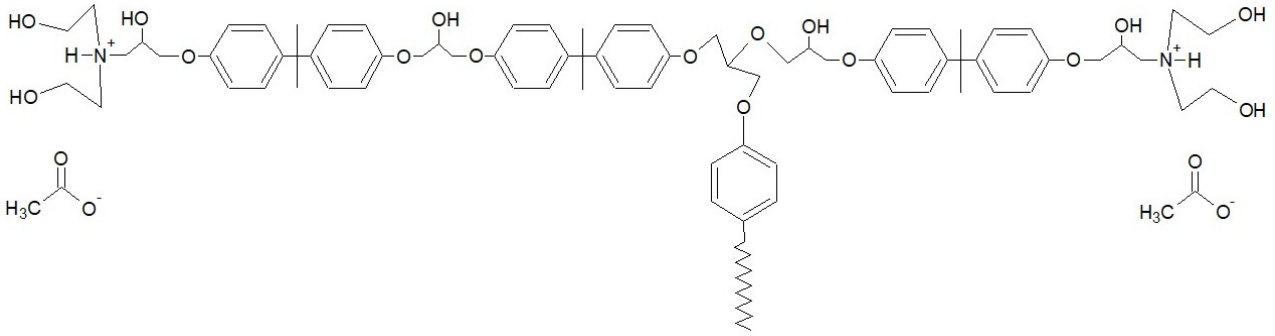


Рис. 1. Общая структурная формула эпоксиаминного аддукта нейтрализованного уксусной кислотой

Было приготовлено 11 образцов грунтовки с расчётным соотношением пигмент-связующее от 0 до 0,5. Приготовление: в ёмкость с обессоленной водой при перемешивании (15 мин) вводили связующее, затем добавляли пигментную пасту (кроме образца №1). Стабилизация дисперсии – 24 ч при перемешивании. Покрытия наносили на стальные пластины 08пс с цинк-фосфатным покрытием в потенциостатическом режиме (напряжение до 400 В) при 30–30,5 °С в течение 135 с (15 с подъём, 120 с осаждение). Отверждение – 15 мин при 170 °С. Толщина всех покрытий, определенная по ГОСТ 31993-2013, составляла 19–22 мкм.

В работе использовались следующие методы испытания покрытий: оценка внешнего вид по ГОСТ 9.407-2015;блеска по ГОСТ 31975-2017; шероховатости по ГОСТ 9.032-74, прочности при растяжении по ГОСТ 29309-92; проникающую способность по ГОСТ 9.413-2007; стойкости к воздействию соляного тумана по ГОСТ 9.401-2018, адгезии по ГОСТ 31149-2014; твёрдости по карандашу ГОСТ Р 54586-2011.

Результаты испытаний покрытий приведены в таблице. Установлено, что увеличение соотношения пигмент/связующее уменьшает блеск покрытия, что вполне ожидаемо, т.к. с ростом содержания пигмента увеличивается его часть, находящаяся в приповерхностном слое рассеивающим отраженный свет. При этом покрытия, сформированные при отношении пигмент/связующее до 0,30, являются однородными, гладкими, без кратеров, пор и морщин. Превышение этого значения приводит к появлению шагрени, резко возрастает шероховатость верхних слоев покрытий. Увеличение соотношения пигмент/связующее также отражается на физико-механических свойствах покрытий. С ростом содержания пигмента проницаемость адгезионных пленок снижается из-за удлинения пути диффузии и уменьшения доли полимера, через который и происходит проникновение коррозионно активных веществ в подложке окрашенного изделия. Прочность при разрыве уменьшается из-за концентрации напряжений в полимерной фазе вокруг твердых частиц пигмента. Адгезия и твердость по карандашу остается на высоком уровне без изменений во всем диапазоне исследования соотношения пигмент/связующее.

Максимальная стойкость сформированных покрытий наблюдается при соотношении пигмент/связующее 0,20–0,30. Экстремальное влияние пигмента объясняется тем, что пигменты и наполнители создают эффективный барьер против коррозии, однако, их избыточное содержание нарушает плотность сшивки эпоксиаминного аддукта, ухудшая защитные свойства покрытия.

Таблица 1. Свойства катафорезных покрытий

Соотношение пигмент связующее	Блеск, единиц блеска, угол измерения 60°	Шероховатость R_a, мкм	Прочность при растяжении по Эриксену, мм	Проникающая способность, см	Стойкость покрытия в камере соляного тумана, ч
0,00	101-103	0,241	9,5	21,3	500
0,05	86-88	0,242	9,3	20,8	620
0,10	83-85	0,24	9,1	20,9	620
0,15	79-81	0,235	8,4	21,0	840
0,20	75-77	0,244	8,3	20,8	1000
0,25	66-68	0,258	7,9	20,9	1000
0,30	68-70	0,317	7,5	20,8	1000
0,35	59-61	0,317	7,1	20,6	840
0,40	62-64	0,382	6,9	20,5	620
0,45	57-59	0,549	6,4	20,1	500
0,50	48-50	0,715	6,2	19,8	500

Таким образом, катафорезная грунтовка с соотношением пигмент/связующее 0,20-0,30 демонстрирует наилучшие декоративные, физико-механические и защитные свойства формируемых покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Крылова, И. А. Электроосаждение как метод получения лакокрасочных покрытий / И.А. Крылова, Л.Б. Котлярский, Т.Г. Стуль. – М.: Химия, 1974. – 135 с.

2) Яковлев, А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: учебник для вузов / А.Д. Яковлев. – 6-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2024. – 446 с.

3) Новая технология получения электрофоретического покрытия на деталях вертолёта, эксплуатирующихся в условиях фреттинг-коррозии / М.Ю. Квасников, В.А. Замшин, В.Л. Кудло, Н.С. Ильина, В.В. Чинов, В.М. Непочатов // Вестник ВИАМ. – 2019. – № 4. – С. 49–55. – DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-49-55.

УДК 517.925

СИНТЕЗ СТИРИЛПИРИДИНОВ И ПОЛУЧЕНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ *N*-ФТАЛИМИДОАЗИРИДИНОВ

П.А. Коробицына, В.В. Сиднева

Научный руководитель – **В.В. Сиднева**, ст. преподаватель, канд. хим. наук

Ярославский государственный технический университет

Разработан метод получения ранее не описанных продуктов конденсации ароматических альдегидов и 2-метил-5-этилпиридина. Эти соединения представляют интерес как объекты для изучения реакций азиридинирования, раскрытия азиридинового цикла, а также в качестве потенциальных биологически активных веществ.

Ключевые слова: *стирилпиридины, конденсация Кнёвенагеля, азиридины, N-фталимидоазиридины*

SYNTHESIS OF STYRYLPYRIDINES AND THE PREPARATION OF *N*-PHTHALIMIDOAZIRIDINES BASED THEREON

P.A. Korobitsyna, V.V. Sidneva,

Scientific Supervisor – **V.V. Sidneva**, Candidate of Chemical Sciences, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

A method has been developed for the preparation of previously undescribed structures derived from aromatic aldehydes and 2-methyl-5-ethylpyridine. These compounds are of interest both as subjects for studying reactions involving aziridination, aziridine ring opening and as potential biologically active agents.

Keywords: *styrylpyridines, Knoevenagel condensation, aziridines, N-phthalimidoaziridines*

В настоящее время гетероциклические аналоги стильбена широко востребованы в различных областях науки и технологии. Благодаря ценным фотофизическим и фотохимическим свойствам стильбеноподобные молекулы применяются для создания различных фотонных и оптоэлектронных устройств (OLED, OFET), в качестве сенсоров на катионы металлов, оптических маркеров для биологических и медицинских исследований. Фотохимическое поведение стильбенов, у которых одна из фенильных групп замещена гетероциклом, не отличается от поведения исходных карбоциклических соединений. Так, для них характерны фотохимические реакции *E-Z*-изомеризации, [2+2]- циклоприсоединения и электроциклизации [1].

Объектом исследования являются органические молекулы, основой которых выступает структурный скелет *орто*-стильбазола, широко распространены в медицинской химии и химии материалов. Так, эти гетероциклы проявляют высокую антиоксидантную, противоопухолевую и противовоспалительную активность [2].

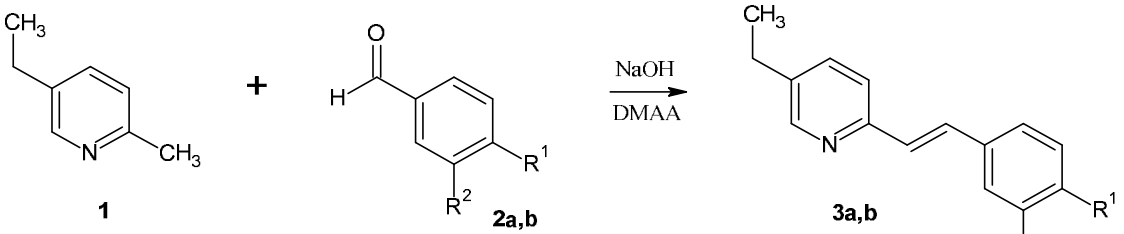
Так же они могут использоваться как промежуточное соединение в синтезе различных физиологически активных соединений и красителей.

Реакция ароматического альдегида с метилпиридином, классифицируемая как конденсация Кнёвенагеля, дает стабильные продукты с идентифицированной *транс*-конфигурацией известные как стирилпиридины, также известные как стильбазолы [3]. Реакция Кнёвенагеля определяется как реакция между альдегидом или кетоном и любым соединением, содержащим активную метильную и метиленовую группу, в присутствии органического основания, аммиака или их солей.

В работе [4] показан стандартный способ получения стирилпиридинов путем, взаимодействия между α-пиколинами и производными бензальдегида проводимый в

уксусном ангидриде. Превращения также осуществляют с использованием солей метилпиридиния в среде бутанола или смеси бутанол–толуол.

Нами предложен оригинальный подход к построению структуры, содержащей азотсодержащие функциональные группы, а именно третичный амин и нитрогруппу. Соответствующие структуры приведены на рис. 1.



3a $R^1 = N(CH_3)_2$ $R^2 = H$

3b $R^1 = H$ $R^2 = NO_2$

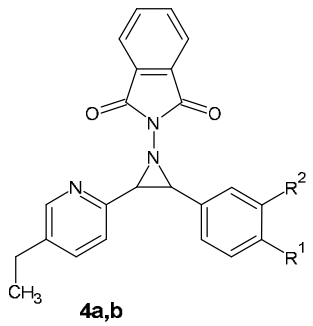
Рис. 1. Реакция образования стирилпиридинов

Стандартная методика синтеза стирилпиридинов с использованием уксусного ангидрида или уксусной кислоты оказалась не применимой для наших конечных продуктов. Был предложен метод получения данных соединений путем взаимодействия ароматического альдегида **2a,b** с метилпиридином**1** в растворе с ДМАА при 140 °С в течение 30 ч с NaOH в качестве основания. Выходы продуктов **3a,b** реакции представлены в таблице 1.

Таблица 1. Условия и выходы реакции образования стирилпиридинов.

Номер	*R*	Температура, °С	Время, ч.	Выход, %
3a	$N(CH_3)_2$	140	30	61,38
3b	NO_2	140	20	8,9

Синтетические азиридины широко используются в качестве универсальных хиральных строительных блоков для синтеза различных биологически и фармацевтически важных молекул [5]. Их популярность обусловлена уникальной особенностью структуры: энергия напряжения трехчленного цикла является движущей силой множества различных реакций, идущих с его раскрытием. Поэтому нами была исследована возможность введения полученных соединений в реакцию окислительного азиридирования *N*-аминофталимидатетраацетатом свинца. Полученные продукты представлены на рис. 2, структура соединений **4a,b** подтверждена с помощью ИК-спектроскопии, установлена температура плавления.



4a $R^1 = N(CH_3)_2$ $R^2 = H$

4b $R^1 = H$ $R^2 = NO_2$

Рис. 2. Продукты реакции окислительного азиридирования *N*-аминофталимида тетраацетатом свинца

Разработан метод получения ранее не описанных продуктов конденсации ароматических альдегидов и 2-метил-5-этилпиридина. Эти соединения представляют интерес как объекты для изучения реакций с раскрытием азиридинового цикла, так и в качестве потенциальных биологически активных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Алиев, Т.М. Синтез и фотохимические свойства стирилзамещенных моно- и бис(стирил)азагетероциклов: дис. ... канд. хим. наук. – М., 2023. – 150 с.

2) Сорокин, С.П. Синтез орто-стильбазолов (2-стирилпиридинов) / С.П. Сорокин, О.В. Ершов // Химия гетероциклических соединений. –2022. – Т. 58, № 11. – С. 582-584.

3) Percino, M. J**.** X-Ray Crystal Structures of a 1-(p-fluorophenyl)-2-(-pyridyl)ethene Intermediate and the 1-(p-fluorophenyl)-2-(-pyridyl)ethanol Compound Obtained from the Condensation Reaction of 2-Methylpyridine and p-Fluorobenzaldehyde / M. J. Percino // The Open Crystallography Journal. – 2008. – Vol. 1. – P. 37–41.

4) Nguyen, T.B. Photodimerization of Stilbazoles Promoted by Oxalic Acid in Suspension / T.B. Nguyen, T.M. Nguyen, P. Retailleau // Chem.–Eur. J. – 2020. – Vol. 26. – P. 4682-4689.

5) Synthesis of N-phthalimidoylaziridines via oxidative aziridination of α,β-unsaturated ketones / M.A. Kazakova [et al.] // Organic & Biomolecular Chemistry. – 2023. – Vol. 21, № 24. – P. 5042-5048. – DOI: 10.1039/D3OB00424D.

УДК 66.099.2:676.08

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИЛА НА ПРОЧНОСТЬ ГРАНУЛ ПРИ ГРАНУЛИРОВАНИИ МЕТОДОМ ОКАТЫВАНИЯ

В.А. Крисанова

Научный руководитель – **А.А. Липин**, д-р техн. наук, доцент

Ивановский государственный химико-технологический университет

Утилизация жидких отходов методом капсулирования является одним из перспективных направлений. Для капсулирования необходима предварительная переработка жидких отходов путем совместного гранулирования с различными дисперсными материалами методом окатывания. Данное исследование направлено на подбор исходных компонентов гранул и установление влияния состава гранул на их прочность.

Ключевые слова: *гранулирование; жидкие отходы; дисперсный материал; тарельчатый гранулятор; статическая прочность*

INFLUENCE OF DISPERSED MATERIAL COMPOSITION ON GRANULE STRENGTH DURING GRANULATION BY ROLLING

V.A. Krisanova

Scientific Supervisor – **A.A. Lipin**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Liquid waste disposal by encapsulation is one of the promising areas. For encapsulation, it is necessary to pre-process liquid waste by co-granulation with various dispersed materials using the rolling method. This study aims to select the initial components of the granules and determine the effect of the granule composition on their strength.

Keywords: *granulation; liquid waste; particulate material; pan granulator; static strength*

Тематика настоящего исследования касается проблемы накопления значительного количества жидких токсичных отходов. Они образуются в результате очистки сточных вод предприятий различных отраслей промышленности и полигонов твердых коммунальных отходов. Жидкие токсичные отходы подлежат переработке или захоронению на специальных полигонах. При этом существующие технологии и методы переработки таких отходов часто служат источником новых загрязнений.

Перспективным способом утилизации является капсулирование отходов, то есть помещение их в герметичную оболочку. Это сведёт к минимуму их негативное воздействие на окружающую среду. Капсулирование жидких отходов напрямую затруднительно, сначала требуется перевести их в твёрдую форму, а затем наносить оболочку на частицы дисперсного материала. Для получения качественной оболочки наиболее подходящей формой частиц являются шарообразные гранулы. Для создания таких гранул предлагается использовать гранулирование методом окатывания [4]. Этот процесс заключается в формировании однородных частиц заданного размера путём окатывания порошкообразных материалов с добавлением жидких связующих [1-3], в роли которых выступают жидкие отходы. Если в качестве порошкообразных материалов использовать твердые отходы, например, золу, то становится возможной одновременная утилизация жидких и твердых отходов.

Для эффективного применения такого способа утилизации отходов необходимо, чтобы конечные гранулы были достаточно прочными к механическим воздействиям, а используемые компоненты были доступными и дешевыми. Поэтому целью работы являлось установление зависимости прочности получаемых гранул от их состава.

В качестве дисперсных материалов использовались зола, гипс и известковая мука, в качестве жидкого связующего – концентрированный раствор солей, содержащий сульфаты и хлориды. Гранулирование осуществлялось в тарельчатом грануляторе с диаметром тарели 200 мм и высотой борта 68 мм при скорости вращения тарели 40 об/мин и угле наклона тарели 40°. Навеска дисперсного материала или смеси материалов загружалась в тарель гранулятора. Солевой раствор, используемый в роли связующего, из мерника с помощью

перистальтического насоса-дозатора подавался через механическую форсунку в верхнюю часть тарели на поднимающийся слой сыпучего компонента. Гранулирование велось при постоянном обогреве от ИК-излучателя. Для предотвращения налипания материала на стенки тарели в ней был установлен скребок. Соотношение масс твердой фазы и жидкого связующего составляло 1:1 во всех опытах. Состав дисперсной фазы варьировался: использовались как отдельные материалы (зола, гипс, известковая мука), так и их бинарные и тройные смеси (табл. 1). При использовании нескольких компонентов они смешивались в равном количестве.

Испытание полученных гранул на статическую прочность осуществлялось с помощью прибора-измерителя прочности гранул ИПГ-1М. Среднее значение статической прочности для гранул из каждой опытной серии приведено в табл. 1. Прочерк означает, что прочность была ниже порога чувствительности прибора.

Прочность гранул, полученных из смесей веществ (опыты № 4-7), выше, чем гранул, полученных из индивидуальных веществ (опыты №1-3). Образцы, полученные из золы, не обладали достаточной прочностью. Добавка гипса или известковой муки к золе повышала прочность гранул. Наиболее прочными оказались гранулы, полученные из смеси известковой муки и гипса (опыт №6), а также трехкомпонентные гранулы (опыт №7). Гипс обладает вяжущими свойствами, в его присутствии образование и рост гранул происходят быстрее. Добавление известковой муки в состав гранул повышало их прочность.

Таблица 1. Зависимость прочности гранул от их состава

№ опыта	Состав	Прочность гранул, Н
1	Зола	-
2	Гипс	10
3	Известковая мука	16
4	Зола + гипс	22
5	Зола + известковая мука	32
6	Известковая мука + гипс	40
7	Зола + гипс + известковая мука	39

Таким образом, установлено, что прочность гранул, полученных в процессе совместного гранулирования жидких техногенных отходов с дисперсными материалами, зависит от состава исходных компонентов. Наибольшую статическую прочность показали гранулы, полученные из смесей следующих составов: известковая мука и гипс в массовом соотношении 1:1; зола, гипс и известковая мука в массовом соотношении 1:1:1. Эти составы рекомендуются к применению для переработки жидких отходов совместным гранулированием с ними.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Исследование процесса гранулирования ильменитового концентрата методом окатывания. / С.В. Лановецкий, О.А. Федотова, В.З. Пойлов, В.А. Шеин, О.Г. Мелкомукова // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2019. – Т. 62, вып. 10. – С. 124–130. – DOI: 10.6060/ivkkt.20196210.5948.

2) Выявление механизма образования гранул порошкообразных материалов при мокром гранулировании в быстроходном роторном грануляторе / А.Е. Лебедев, А.А. Мурашов, И.С. Гуданов, А.А. Ватагин, Д.С. Долгин, Ф.С. Орлов // От химии к технологии шаг за шагом. – 2025. – Т. 6, № 2. – С. 50-56. – DOI: 10.52957/2782-1900-2025-6-2-50-56. – URL: https://ystu.editorum.ru/ru/nauka/journal/236/view

3) Сковородников, П.В. Особенности процесса гранулирования органоминеральных удобрений методом окатывания / П.В. Сковородников, М.В. Черепанова // Известия ТПУ. – 2019. – Т. 330, № 9. – С. 51–59. – DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2255.

4) Стрельникова, В.О. Исследование влияния режимно-технологических параметров работы тарельчатого гранулятора на качественные показатели удобрения на основе карбамида с наполнителем из фосфогипса с применением математического моделирования / В.О. Стрельникова, Ю.А. Таран, В.М. Фуфаева // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2025. – № 72. – С. 66-72. – DOI: 10.36807/1998-9849-2025-72-98-66-72.

УДК 54.057:547.537

ЦИКЛОАЛКИЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ *ТРЕТ*-БУТИЛБЕНЗОЛА: СИНТЕЗ И ЖИДКОФАЗНОЕ ОКИСЛЕНИЕ

К.С. Кудрявцева, Е.И. Баёв, И.С. Калачев, Е.А. Курганова

Научный руководитель – **Е.А. Курганова**, д-р хим. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Разработаны научные и прикладные основы, исследованы основные стадии синтеза пара-трет-бутилциклогексилбензола и пара-трет-бутилциклопентилбензола.

Ключевые слова: *пара-трет-бутилфенол, циклогексанон, циклопентанон, алкилирование, аэробное окисление, кислотное разложение*

CYCLOALKYL DERIVATIVES OF TERT-BUTYLBENZENE: SYNTHESIS AND LIQUID-PHASE OXIDATION

K.S. Kudryavtseva, E.I. Bayov, I.S. Kalachev, E.A. Kurganova

Scientific Supervisor – **E.A. Kurganova**, Doctor of Chemical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

Scientific and applied foundations have been developed, and the main stages of the synthesis of para-tert-butylcyclohexylbenzene and para-tert-butylcyclopentylbenzene have been investigated.

Keywords: *para-tert-butylphenol, cyclohexanone, cyclopentanone, alkylation, aerobic oxidation, acid decomposition.*

Синтез алкилароматических соединений является важным химико-технологическим процессом, используемым как в научных исследованиях, так и эксплуатируемым в производстве. Алкилирование является одним из основных способов получения алкилароматических соединений [1]. Последние широко используются главным образом как промежуточные продукты в основном органическом и нефтехимическом синтезе. Так, например, изопропилбензол (ИПБ), получаемый алкилированием бензола пропиленом, является промежуточным соединением кумольной технологии, может быть окислен до гидропероксида, который, способен разлагаться до фенола и ацетона и обеспечивать тем самым многотоннажное производство последних. Описанная трёхстадийная кумольная технология широко распространена во всём мире, объединяя такие преимущества как: синтез двух ценных продуктов химической промышленности, доступное сырьё и высокий выход промежуточных и целевых продуктов. Важнейшая стадия технологии – жидкофазное окисление изопропилбензола [2]. Данный процесс, являясь основным способом получения ряда ценных кислородсодержащих соединений, характеризуется труднодостижимостью высокой конверсии (в связи со строгими требованиями техники безопасности) и селективности ввиду ограничений эффективности протекания процесса в присутствии инициаторов. Целевые продукты кумольной технологии – это фенол и ацетон. Фенол широко применяется в производстве фенолформальдегидных смол, бисфенола А, лекарственных субстанций и др., его мировое производство достигает примерно 12 млн тонн / год, соединение является востребованным химическим продуктом, спрос на который стабилен и растёт. Ацетон же в свою очередь хоть и является также многотоннажным продуктом, но не обладает таким же высоким спросом, как фенол. Из-за неравного спроса на эти два продукта, создаваемое в рамках технологии предложение с экономической точки зрения снижает рентабельность. Таким образом, невысокие показатели стадии жидкофазного окисления и

неравномерный спрос на ацетон являются значительными недостатками данной технологии, что в свою очередь обуславливает актуальность разработок и научных исследований усовершенствования и поиска новых способов получения фенола и его производных совместно с алициклическими и алифатическими кетонами [3, 4].

В настоящей работе предлагается способ совместного получения фенола / *пара-трет*-бутилфенола совместно с циклогексаноном / циклопентаноном. Способ заключается в получении циклоалкилароматического соединения и его *пара-трет*-бутильного производного, которые подвергаются жидкофазному окислению кислородом при атмосферном давлении до соответствующего гидропероксида, который разлагается катализаторами кислотного типа до (алкил)фенола и циклического кетона (рис. 1).

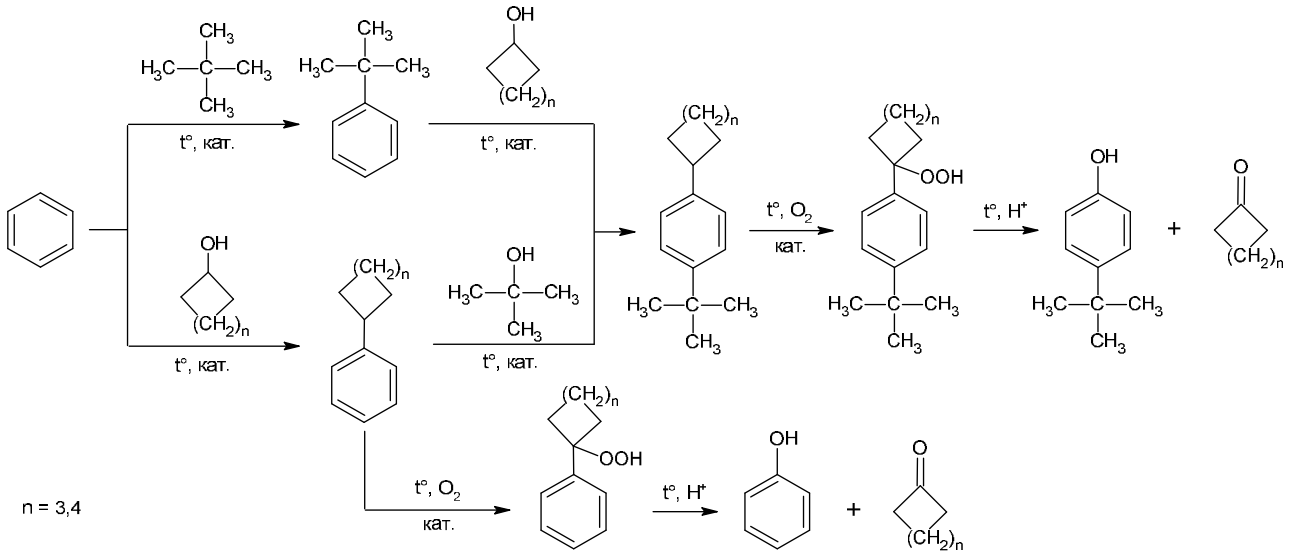
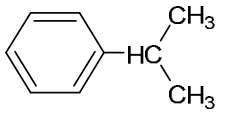
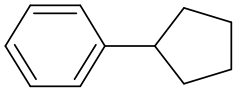
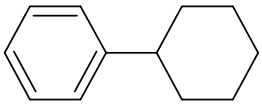
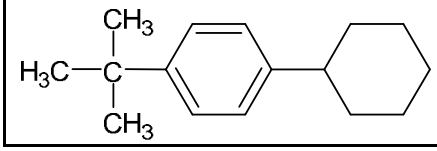


Рис. 1. Гидропероксидный способ получения фенола/ *пара-трет*-бутилфенола совместно с циклогексаноном/циклопентаноном

В процессе выполнения работы были изучены закономерности алкилирования бензола и его производных органическими спиртами в соответствии с вышеописанной схемой синтеза *моно-* и диалкилароматических углеводородов при катализе концентрированной серной кислотой. Найдены условия, позволяющие получать: циклогексилбензол (ЦГБ) с выходом 75%, циклопентилбензол (ЦПБ) – 90%, *трет*-бутилбензол – 68%, *пара-трет*-бутилциклогексилбензол (ПТБЦГБ) – 72% и *пара-трет*-бутилциклопентилбензол (ПТБЦПБ) – 76%.

Результаты изучения процесса жидкофазного аэробного окисления показывают, что использование *N*-гидроксифталимида позволяет значительно повысить содержание гидропероксида соответствующего углеводорода в продуктах реакции. Циклогексилбензол и его производное с *трет*-бутильной группой в *пара*-положении демонстрируют меньшую реакционную способность при окислении в присутствии *N*-гидроксифталимида по сравнению с изопропилбензолом, однако использование органического катализатора позволяет достигать более высоких показателей, чем окисление в присутствии гидропероксидных инициаторов или металлсодержащих катализаторов. Также полученные данные показывают, что введение *трет*-бутильной группы в *пара*-положение молекулы циклогексилбензола приводит к снижению её реакционной способности при окислении. Параметр окисляемости, полученный при кинетических исследованиях инициированного АИБН окисления алкилароматических субстратов, количественно отражает описанную выше закономерность между структурой углеводородов и их способностью к окислению (табл. 1).

Таблица 1. Параметры окисляемости изучаемых алкиларенов при температуре 50 °С

Окисляемый углеводород	Сокращённое название	[RH], моль/л	$k_2/\sqrt{2k_6}$
	ИПБ	7,17	$2{,}98\cdot 10^{-3}$
	ЦПБ	6,37	$2{,}91\cdot 10^{-3}$
	ЦГБ	5,91	$4{,}56\cdot 10^{-4}$
	ПТБЦГБ	3,09*	$4{,}84\cdot 10^{-4}$

Таким образом, проведённое исследование описывает синтез как циклоалкиларенов, так и их *пара-трет*-бутильных производных, а также включает изучение реакции их жидкофазного окисления в присутствии *N*-гидроксифталимида и АИБН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Химическая технология органических веществ. // Т.П. Дьячкова [и др.]. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2008. – Ч.2. – 100 с.

2) Закошанский, В.М. Альтернативные технологии получения фенола / Рос. хим. журн. – 2008. – Т. LII, № 4. – С. 53–65.

3) Xu, S. Process Intensification on the Selective Catalytic Oxidation of Cumene with Ionic Liquids / S. Xu, J. Zhang, B. Chen, Z. Lei // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2018. – Vol. 130. – P. 88–92.

4) Elumalai, V. A scalable and green one-minute synthesis of substituted phenols / V. Elumalai, J.H. Hansen // RSC Advances. – 2020. – Vol. 10(66). – P. 40582–40587.

УДК 615.21

СИНТЕЗ N-КОНЪЮГАТОВ ГЛУТАТИОНА С ПОТЕНЦИАЛЬНО ВЫСОКОЙ ПРОТИВОВОСПАЛИТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

А.Г. Лазарева, А.А. Наметкина, Д.Е. Сверчкова

Научный руководитель – **Н.В. Красникова**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В настоящем исследовании расматриваются методы синтеза и биологическая активность N-коньюгатов глутатиона и ибупрофена. Работа направлена на получения новых субстанций со сниженной гастро- и гепатотоксичностью, обладающих потенциально высокой противовоспалительной активностью.

Ключевые слова: *глутатион, ибупрофен, нестероидные противовоспалительные препараты*

SYNTHESIS OF GLUTATHIONE N-CONJUGATES WITH POTENTIALLY HIGH ANTI-INFLAMMATORY ACTIVITY

A.G. Lazareva, A.A. Nametkina, D.E. Sverchkova

Scientific Supervisor – **N.V. Krasnikova**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This study examines the methods of synthesis and the biological activity of N-conjugates of glutathione and ibuprofen. The work aims to obtain new substances with reduced gastro- and hepatotoxicity and potentially high anti-inflammatory activity.

Keywords*: glutathione, ibuprofen, non-steroidal anti-inflammatory drugs*

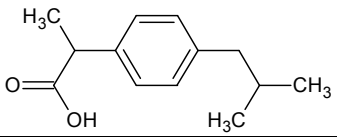
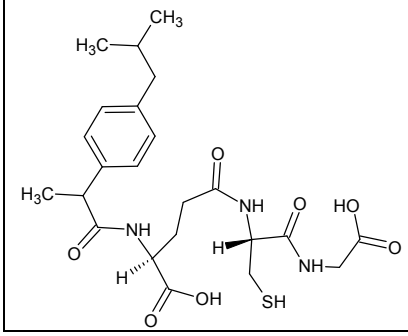
Одной из важнейших задач современной медицинской химии является создание высокоэффективных отечественных нестероидных противовоспалительных препаратов (НПВС), характеризующихся выраженным противовоспалительным эффектом и минимизацией побочных реакций. Препараты, широко применяемые в медицинской практике, зачастую имеют существенные недостатки, включая высокую гастро- и гепатотоксичность, а также низкую способность проникать через гематоэнцефалический барьер (ГЭБ). Это ограничивает эффективность лечения заболеваний центральной нервной системы (ЦНС). В настоящее время ведутся исследования, направленные на создание новых молекул со сниженной гастротоксичностью, в том числе путем химической модификации молекулы НПВС [1, 2].

Одним из перспективных направлений в этой области является конденсирование молекул НПВС с внутриклеточным трипептидом глутатионом. Глутатион содержит тиольную (-SH)-группу, за счет которой он является универсальным антиоксидантом, способным к нейтрализации свободных радикалов и снижении окислительного стресса в клетках.

В настоящей работе рассматривается химическая модификация молекулы ибупрофена фрагментом глутатиона, активно участвующего в транспорте биологически активных субстанций через клеточные мембраны. Эта модификация потенциально может обеспечить высокую способность активной фармацевтической субстанции проникать через гематоэнцефалитический барьер и сниженную токсичность [3].

Биологическая активность и значение LD50 для целевого соединения были оценены с помощью программного обеспечения PASSOnline и ProTox 3.0 (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение токсичности ибупрофена и контъюгата ибупрофен-глутатион

Формула соединения	LD50, мг/кг	Класс опасности	Гепатотоксичность (Pa*)
	**299**	**3**	**0,66**
	**5000**	**5**	**0,09**

*Pa - вероятность проявления активности

Для проведения исследования активную фармацевтическую субстанцию ибупрофен выделяли из твердой лекарственной формы согласно литературной методике [4]. Для этого твердую лекарственную форму измельчали и растворяли в циклогексане при температуре 50 °С в течение часа при постоянном перемешивании. Далее смесь фильтровали, фильтрат упаривали. Для очистки активной фармацевтической субстанции от возможных остатков вспомогательных веществ использовали метод переосаждения. Навеску выделенного ибупрофена растворяли в 50% этаноле в присутствии 10% мольного избытка щелочи с дальнейшим подкислением соляной кислотой. Чистота и строение были доказаны методами ТСХ и ИК-спектроскопии (рис. 1). Выход составил 63%.

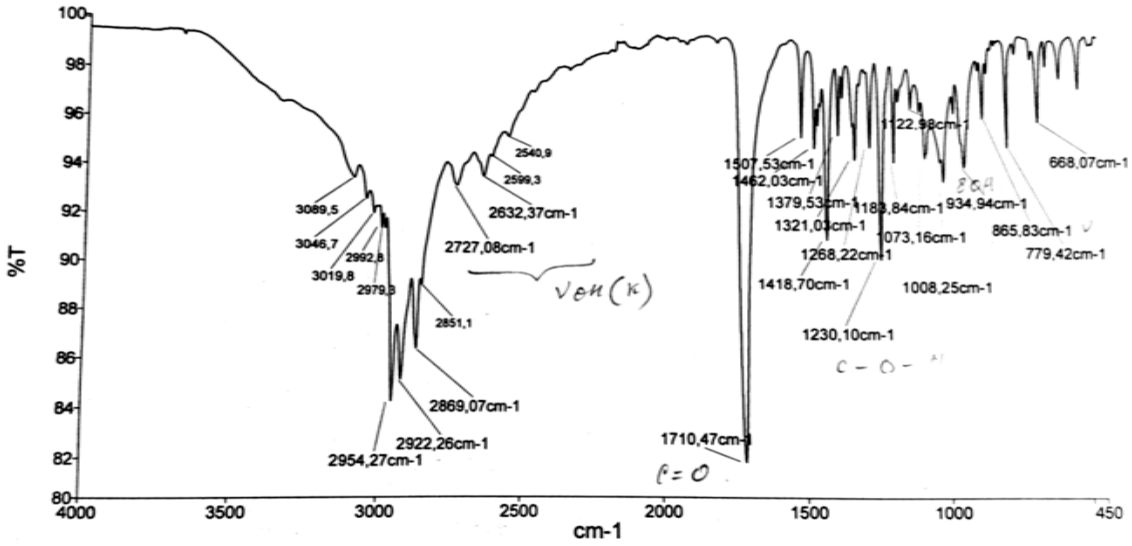


Рис. 1. ИК-спектр ибупрофена выделенного из твердой лекарственной формы

Для синтеза N-конъюгатов глутатиона были предложены две различные методики синтеза (рис. 2).

Согласно первой методике (рис. 2, А), был получен хлорангидрид ибупрофена (b) реакцией с хлористым тионилом при кипячении в течение 4х часов, в качестве катализатора был использован ДМФА. Далее полученный хлорангидрид малыми порциями прикапывали к

щелочному раствору (pH 10-11) глутатиона (c) в смеси вода:ТГФ в соотношении 1:1. Для выделения продукта ацилирования (e) реакционную смесь упаривали до 1/3 от исходного объема и подкисляли на ледяной бане до pH = 1-2.

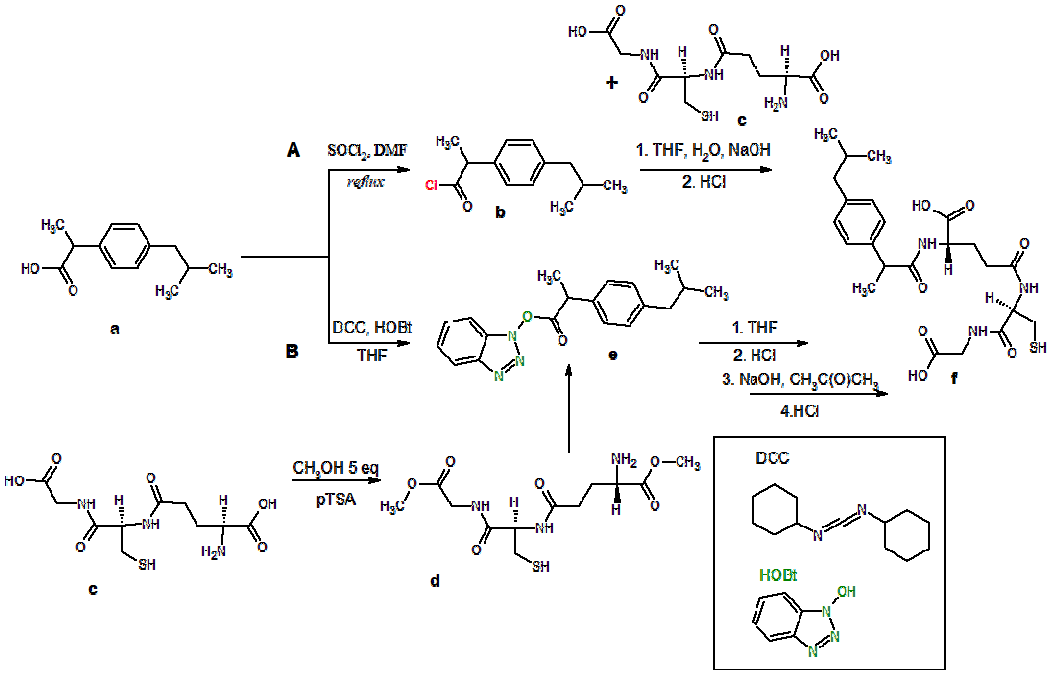


Рис. 2. Схема синтеза целевого соединения

Для проведения синтеза по второй методике (рис. 2, B) глутатион (c) был переведен в форму диметилового эфира (d) с использование п-толуолсульфоновой кислоты в качестве катализатора. Навеску ибупрофена (a) растворяли в абсолютированном ТГФ и добавляли 5% мольный избыток ДЦК и HOBt, реакционную смесь перемешивали в течение 2х часов при комнатной температуре. Далее к РС добавляли 10% мольный избыток диметилового эфира глутатиона (d) и перемешивали в течение 10 часов. Для выделения продукта реакции реакционную смесь фильтровали и упаривали при мягких условиях до 1/3 от исходного объема. Далее подкисляли реакционную смесь соляной кислотой до pH = 1-2. Продукт реакции был выделен в виде диметилового эфира, для снятия сложноэфирной группы навеску растворяли в ацетоне и 10% мольном избытке 5% щелочи с дальнейшим подкислением.

Выход целевого продукта составил 58-60%. В настоящее время ведется анализ строения и чистоту полученных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Пахомова И.Г., Белоусова Л.Н. Поражения верхних отделов желудочно-кишечного тракта, ассоциированные с приемом нестероидных противовоспалительных препаратов // Эффективная фармакотерапия. Неврология. – 2014. – Вып. №5 (49). – URL: https://umedp.ru/articles/porazheniya_verkhnikh_otdelov_zheludochnokishechnogo_trakta_assotsiirovannye_s_priemom_nesteroidnykh.html

2) Лазебник Л.Б., Алексеенко С.А., Белова Г.В. и др. Рекомендации по профилактике и лечению эзофаго-гастро-энтеро-колопатий, индуцированных нестероидными противовоспалительными препаратами (НПВП) - 2025 // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2024. – URL: https://www.nogr.org/jour/article/view/2924

3) Sestili P and Fimognari C (2020) Paracetamol-Induced Glutathione Consumption: Is There a Link With Severe COVID-19 Illness?. Front. Pharmacol. 11:579944. doi: 10.3389/fphar.2020.579944

4) US5300301A. Isolation of ibuprofen from tablets / Lakin, M.B., Shockley, T.H., Zey, E.G.; патентообладатель CNA Holdings LLC. – Заявл. 01.12.1992 ; опубл. 05.04.1994.

УДК 615.281

СИНТЕЗ КАТИОННЫХ АМФИФИЛЬНЫХ (ДИАЛКИЛАМИНО)АЛКИЛАМИДОВ N-АЦИЛЗАМЕЩЕННЫХ ДИПЕПТИДОВ С ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

А.А. Наметкина, Д.Е. Сверчкова, К.Ю. Орлова

Научный руководитель – **Н.В. Красникова**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В настоящем исследовании рассматриваются методы синтеза и биологическая активность N-ацилзамещенных дипептидов, содержащих в своей структуре каркасный гидрофобный фрагмент адамантана, остатки таких L-аминокислот, как L-фенилаланин и L-триптофан, а также катионный фрагмент третичного амина (3-диэтиламино)пропиламина. Предполагается, что особое амфифильное строение данных соединений позволяет эффективно взаимодействовать с клеточной стенкой бактерий и приводить к ее гибели.

Ключевые слова: *1-адамантанкарбоновая кислота, 4-(1-адамантил)бензойная кислота, ультракороткие пептиды, пептидомиметики, (3-диэтиламино)пропиламин*

SYNTHESIS OF CATIONIC AMPHIPHILIC (DIALKYLAMINO)ALKYLAMIDES OF N-ACYL SUBSTITUTED DIPEPTIDES WITH POTENTIAL ANTIMICROBIAL ACTIVITY

A.A. Nametkina, D.E. Sverchkova, K.Y. Orlova

Scientific Supervisor – **N.V. Krasnikova**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This study examines the methods of synthesis and the biological activity of N-acyl-substituted dipeptides containing a hydrophobic adamantane scaffold, L-amino acid residues such as L-phenylalanine and L-tryptophan, and a cationic tertiary amine fragment (3-diethylamino)propylamine. It is hypothesized that the unique amphiphilic structure of these compounds allows them to effectively interact with bacterial cell walls, leading to their destruction.

Keywords*: 1-adamantancarboxylic acid, 4-(1-adamantyl)benzoic acid, ultra-short peptides, peptidomimetics, (3-diethylamino)propylamine*

На данный момент одним из перспективных направлений в исследованиях химико-биологической направленности является дизайн и разработка методов синтеза новых синтетических пептидомиметиков амфифильного строения. Введение катионных и гидрофобных фрагментов в структуры ультракоротких молекул пептидного строения позволяют им взаимодействовать с отрицательно заряженными компонентами и гидрофобными цепями жирных кислот в мембранах микроорганизмов мишеней (микробы, вирусы), что приводит к их дестабилизации и лизису клеток. Еще одной важной особенностью данной группы соединений является отсутствие резистентности у патогенных микроорганизмов [].

В настоящем исследовании были рассмотрены методы синтеза восьми новых N-ацилзамещенных дипептидов с фрагментами 1-адамантанкарбоновой и 4-(1-адамантил)бензойной кислот, а также пептидомиметики с катионным фрагментом (3-диэтиламино)пропиламина на их основе.

Для синтеза целевых соединений была предложена следующая схема синтеза (рис. 1).

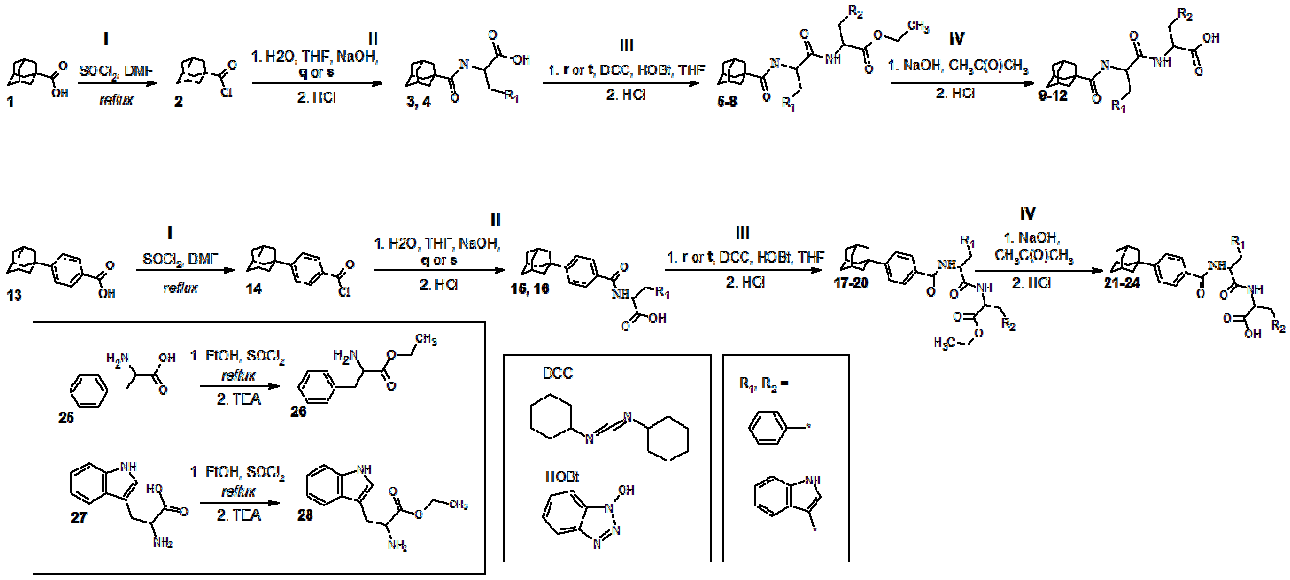


Рис. 1. Общая схема синтеза N-ацилдипептидов с фрагментами 1-адамантанкарбоновой и 4-(1-адамантил)бензойной кислот

На первой стадии (рис. 1, **I**) был получен хлорангидрид 1-адамантанкарбоновой кислоты (**2**) в присутствии 10 кратного мольного избытка хлористого тионила и каталитическими количествами ДМФА. Далее проводили ацилирование по Шоттену-Бауману (рис.1, **II**) таких аминокислот как L-фенилаланин (**25**) и L-триптофан (**27**) в щелочной среде (pH 10-11). Для этого к щелочному раствору аминокислоты небольшими порциями прикапывали раствор хлорангидрида (**2**) в абсолютированном ТГФ, реакцию вели при постоянном перемешивании в течение 6 часов при постоянном контроле pH. Реакции с участием 4-(1-адамантил)бензойной кислоты (**13**) проводили в аналогичных условиях. Выходы N-ациламинокислотных производных (**3, 4, 15, 16**) составили 78-84%. Чистота и строение были подтверждены методами 1H- и 13C- ЯМР-спектроскопией.

На следующей стадии (рис. 1, **III**) в структуры N-ациламинокислотных производных был введен второй аминокислотный остаток. Для этого к реакционной смеси после 2х часов перемешивания N-ациламинокислот с 5% мольным избытком ДЦК и HOBt был добавлен этиловый эфир соответствующей аминокислоты (**26/28**). После добавления реакционную смесь перемешивали при комнатной температуре в течение 48 часов. Соответствующие условия были выбраны с целью получения оптически чистых N-ацилзамещенных дипептидов. Для снятия сложноэфирной группы (рис. 1, **IV**) эфиры N-ацилдипептидов (**5-8, 17-20**) растворяли в ацетоне и 10% мольном избытке 5%-го раствора натриевой щелочи с последующим подкислением. Выходы N-ацилдипептидов (**9-12, 21-24**) составили 68-75%.

Заключительным этапом являлось введение катионного фрагмента (3-диэтиламино)пропиламина, реакцию вели по аналогичной методике, использовавшейся на стадии получения N-ацилдипептидов (рис. 1, **III**).

Выходы (3-диэтиламино)пропиламидовN-ацилдипептидов составили 62-68%. В настоящий момент ведется анализ чистоты и строения целевых пептидомиметиков и N-ацилдипептидов. Все полученные промежуточные и целевые соединения были очищены с помощью колоночной хроматографии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1) Titz A.; Short peptides and their mimetics as potent antibacterial agents and antibiotic adjuvants / A. Panjla, G. Kaul, S. Chopra **S**.Verma // ACS Chem. Biol.– 2021. – Vol. 16. – P. 2731-2745.

2) Small Antimicrobial Agents Based on Acylated Reduced Amide Scaffold / P. Teng, D. Huo, A. Nimmagadda, J. Wu [et al.] // J. Med. Chem. – 2016. – Vol. 59. – P. 7877-7887.

УДК 547.818.1

СИНТЕЗ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АФФИННОСТИ ХИНОНСОДЕРЖАЩИХ ТИОПИРАНОВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ К РЕЦЕПТОРУ $GABA_{B(1)}$

Д.М. Немиров, К.Л. Овчинников

Научный руководитель - **К.Л. Овчинников**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Проведен молекулярный докинг 241 соединения, содержащих хиноновый фрагмент, в результате которого было выделено 5 лигандов, демонстрирующих наивысшую аффинность. Лиганд с наибольшей связывающей способностью был проанализирован на токсичность и синтезирован.

Ключевые слова: *молекулярный докинг, хиноновые соединения, рецептор $GABA_{B(1)}$, аффинность, токсичность, 2,4,7,9-тетрафенил-4,4a,9,9a-тетрагидротиопирано[2,3-g]тиохромен-5,10(5aH,10aH)-диона*

SYNTHESIS AND COMPARATIVE ANALYSIS OF THE AFFINITY OF QUINONE-CONTAINING THIOPYRANE DERIVATIVES TO THE $GABA_{B(1)}$ RECEPTOR

D.M. Nemirov, K.L. Ovchinnikov

Scientific Supervisor – **K.L. Ovchinniko**v, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

Molecular docking of 241 compounds containing a quinone fragment was performed, as a result of which 5 ligands demonstrating the highest affinity were isolated. The ligand with the highest binding capacity was analyzed for toxicity and synthesized.

Keywords: *molecular docking, quinone compounds, $GABA_{B(1)}$ receptor, affinity, toxicity, 2,4,7,9-tetraphenyl-4,4a,9,9a-tetrahydrothiopyrano[2,3-g]thiochromene-5,10(5Ah,10Ah)-dione*

Молекулярный докинг применяется для раннего поиска лекарственных кандидатов. Он позволяет быстро оценивать пространственную комплементарность и энергию связывания малых молекул с биологическими мишенями [1].

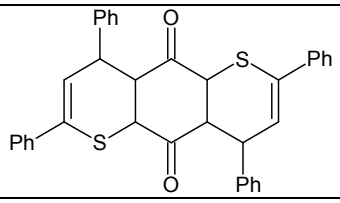
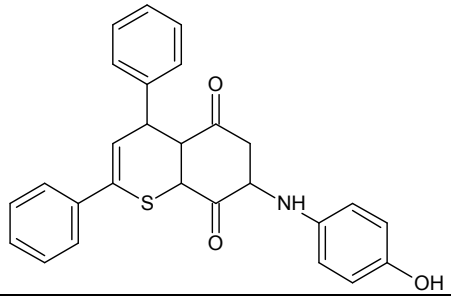
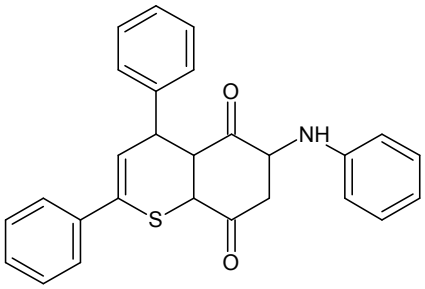
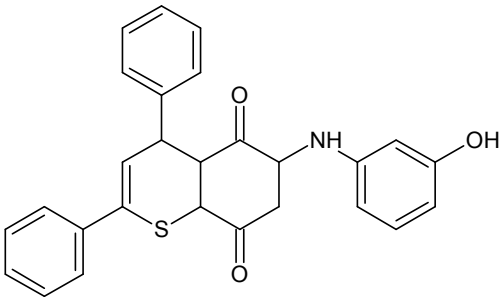
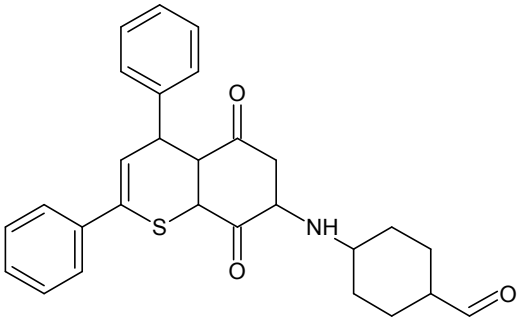
Хиноновые соединения представляют научный интерес благодаря своей биологической активности. Производные 2*H*-тиопирана представляют собой серосодержащие каркасные системы, пригодные для направленной структурной модификации. Сочетание хинонового и тиопиранового фрагментов в одной молекуле делает такие соединения перспективными объектами для синтеза с последующим анализом их биологической активности [2-3].

Выбор рецептора $GABA_{B(1)}$ в качестве молекулярной мишени обусловлен его ключевой ролью в регуляции нейротрансмиссии. Модуляция $GABA_B$-зависимых сигнальных путей рассматривается как перспективное направление для коррекции эпилепсии, тревожных расстройств и иных патологий центральной нервной системы. Результаты структурных исследований полноразмерного $GABA_B$-рецептора, полученные методом криоэлектронной микроскопии, существенно расширили возможности рационального компьютерного поиска лигандов для данной мишени [4].

Поэтому актуальной задачей является разработка новых агентов на основе тиопирановых соединений с применением технологий для анализа их биологической активности. Реализация данного направления способна послужить основой для создания инновационных противоопухолевых препаратов, способствующих развитию онкологической фармакологии и улучшению конкурентоспособности отечественных производителей на международной арене.

Для определения наиболее перспективных соединений с целью последующего синтеза был проведён молекулярный докинг набора из 241 соединения, содержащих хиноновый фрагмент [5]. Расчёты выполнялись с использованием программного обеспечения Auto DockVina при значении параметра exhaustiveness, равном 500 [6-7]. В результате анализа было выделено 5 лигандов, демонстрирующих наивысшую аффинность. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты молекулярного докинга лигандов, демонстрирующих наивысшую аффинность

№ п/п	Лиганд	Аффинность,ккал/моль
1		-8,7
2		-8,457
3		-8,395
4		-8,205
5		-8.06

Все пять тиопирановых соединений, содержащих хиноновый фрагмент, продемонстрировали высокую аффинность к рецептору $GABA_{B(1)}$. Наибольшую связывающую способность проявил лиганд под номером 1. Его энергия связывания составил −8,7 ккал/моль.

Была проведена оценка на токсичность данного соединения с помощью программы ProTox-3.0 [8]. В результате данного анализа было выявлено, что вещество относится к 4 классу токсичности, что говорит о его относительной безопасности.

Сопоставление высокой аффинности и низкого токсического потенциала послужило основанием для выбора лиганда под номером 1 в качестве приоритетного кандидата для химического синтеза.

Синтез соединения проводили двухстадийно при кипячении в бензоле. На первой стадии смесь халкона и реактива Лавессона кипятили в течение 1-1.5 часов до образования темно-синего раствора димера тиохалкона. На второй стадии к раствору димера тиохалкона прибавляли 1,4-бензохинон и кипятили еще около часа (контроль реакции по ТСХ). Реакцию проводили при мольных соотношениях: халкон: реактив Лавессона: 1,4-бензохинон = 1:0.5:0.5 [9] (рис. 1).

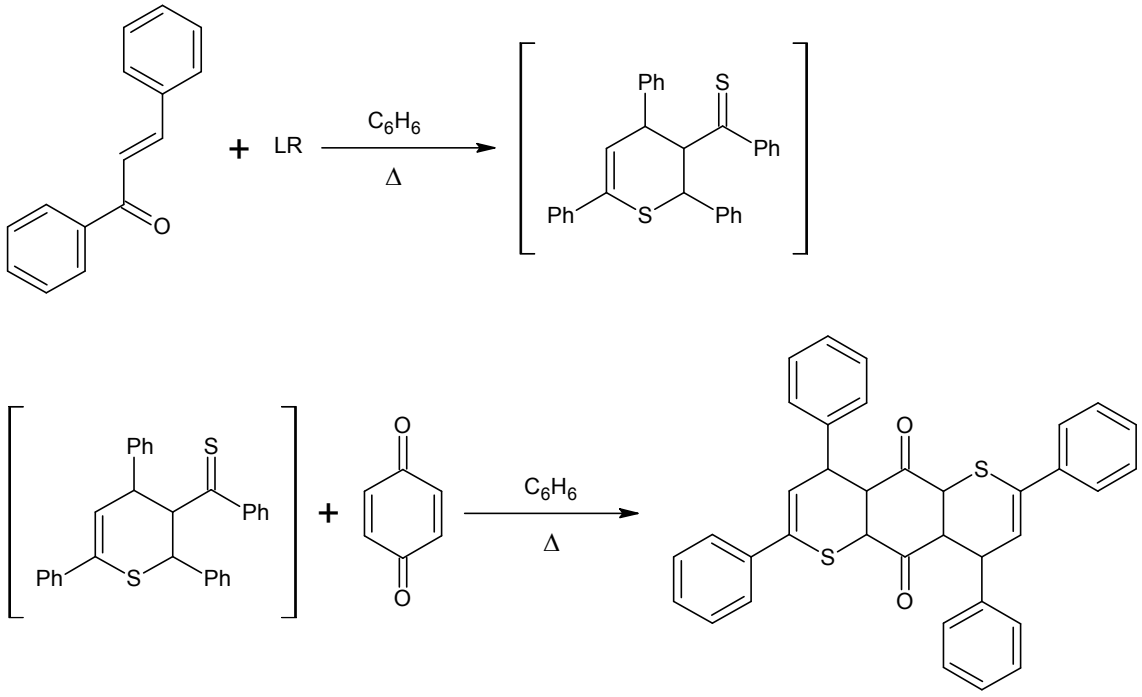


Рис. 1. Схема двухстадийного синтеза 2,4,7,9-тетрафенил-4,4a,9,9a-тетрагидротиопирано[2,3-g]тиохромен-5,10(5aH,10aH)-диона

Продукт – светло-розовый порошок. Чистота целевого продукта была подтверждена тонкослойной хроматографией, R_f = 0,62. Выход 22,8 мг (7%). $T_{пл}$ = 193-195 °C.

Таким образом, 2,4,7,9-тетрафенил-4,4a,9,9a-тетрагидротиопирано[2,3-g]тиохромен-5,10(5a*H*,10a*H*)-дион может рассматриваться как перспективный объект для дальнейших биологических испытаний invitro.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Голдаева, К.В. Молекулярный докинг в медицине. Обзор литературы / К.В. Голдаева // Journal of Bioinformatics and Genomics. – 2024. – № 4 (26) – С. 1-14. – DOI: 10.60797/jbg.2024.26.6.

2) Антиоксидантная активность природных и синтетических хинонов / Н.М. Сторожок, А.Я. Друлле, И.Я. Логин, И.Я. Дрегерис, Н.Г. Храпова, Е.Б. Бурлакова // Вопросы биомедицинской химии. – 1995. – Т. 41, №1. – С. 16–21.

3) Рашкевич, О.С. Противовоспалительные и антигипоксические свойства производных хинона / О.С. Рашкевич, А.В. Волчек // Актуальные вопросы фармакологии и фармакотерапии: сборник материалов научно-практической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения профессора Михаила Васильевича Кораблёва. – Гродно: Гродненский государственный медицинский университет, 2023. – С. 133–136.

4) Ong, J. Clinical Potential of GABAB Receptor Modulators / J. Ong, David I. B. Kerr // CNS Drug Reviews. – 2005. – Vol. 11, № 3. – P. 317–334. – DOI: 10.1111/j.1527-3458.2005.tb00049.x.

5) Немиров, Д.М. Молекулярный докинг при исследовании взаимодействия лигандов, содержащих хиноновый фрагмент, с молекулой белка $GABA_{B(1)}$ / Д.М. Немиров, К.Л. Овчинников // Актуальные направления исследований в области химии и биофармацевтических технологий: сборник научных статей II межрегионального форума «Дороговские чтения».– Ярославль: ЯГПУ им. К.Д. Ушинского, 2025. – С. 68-75.

6) Tessaro F. How ‘Protein-Docking’ Translates into the New Emerging Field of Docking Small Molecules to Nucleic Acids? / F. Tessaro, L. Scapozza // Molecules. – 2020. – Vol. 25(12). – P. 2749. – DOI: 10.3390/molecules25122749.

7) Bender, B.J. A practical guide to large-scale docking / B.J. Bender, S. Gahbauer, A. Luttens // Nature protocols. – 2021. – Vol. 16(10). P. 4799–4832. – DOI: 10.1038/s41596-021-00597-z.

8) ProTox 3.0: a webserver for the prediction of toxicity of chemicals / P. Banerjee, E. Kemmler, M. Dunkel, R.Preissner // Nucleic Acids Research. – 2024. – Vol. 52, iss. 1. – P. 513–520. – DOI: 10.1093/nar/gkae303.

9) Немиров, Д.М. Синтез 2,4,7,9-тетрафенил-4,4a,9,9a-тетрагидротиопирано[2,3-g]тиохромен-5,10(5aH,10aH)-диона и анализ его биологической активности / Д.М. Немиров, К.Л. Овчинников // От химии к технологии шаг за шагом. – 2026. – Т. 7, вып. 1.– С. 43-53. – DOI: 10.52957/2782-1900-2026-7-1-43-53. – URL: https://ystu.editorum.ru/ru/nauka/journal/236/view

УДК 667.61

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Романова, А.Е. Терешко

Научный руководитель – **А.Е. Терешко**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Исследованы свойства поверхности частиц наполнителей: тальк, микроталь, барит, микробарит. Изучена адсорбция водорастворимых полимеров на их поверхности. С помощью оценки пептизации наполнителей была исследована диспергируемость наполнителей в среде водорастворимых полимеров.

Ключевые слова: *наполнители, водорастворимые полимеры, микротальк, микробарит, тальк, микрокальцит*

THE STUDY OF SURFACE PROPERTIES OF FILLER PARTICLES FOR WATER-DISPERSION COATING MATERIALS

A.A. Romanova, A.E. Tereshko

Scientific Supervisor – **A.E. Tereshko**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The surface properties of filler particles, such as talc, microtalc, barite, and microbarite, have been studied. The adsorption of water-soluble polymers on their surfaces has been investigated. The dispersibility of fillers in water-soluble polymer media has been assessed using the peptization of fillers.

Keywords: *fillers, water-dispersion coating materials, microtalc, microbarite, talc, microcalcite*

Для стабилизации водных пигментных паст применяются водорастворимые полимеры, такие как поливиниловый спирт, карбоксимитилцеллюлоза и полиэтиленгликоль. Они эффективно регулируют реологические свойства водных пигментных паст. Для успешной стабилизации частиц наполнителя при диспергировании, составлении лакокрасочного материала и последующем хранении, макромолекулы ПВС, КМЦ и ПЭГ должны адсорбироваться на твердой поверхности частиц наполнителя и создавать адсорбционно-сольватные слои на них. Были проведены исследования адсорбции водорастворимых полимеров на поверхности частиц наполнителя. Расчет адсорбции производили по разнице уменьшения массы при прокалке обработанного полимером и исходного наполнителя (табл. 1).

Таблица 1. Адсорбция водорастворимых полимеров на поверхности частиц наполнителя

Наполнитель	Водный раствор					
	КМЦ		ПЭГ		ПВС	
	0,5%	2,0%	0,5%	2,0%	0,5%,	2,0%
	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г	мг/г
Микротальк	13,7	139,4	9,6	18,3	11,8	105,4
Тальк	7,1	62,5	-	-	6,5	77,7
Микробарит	-	84,5	5,5	3,1	7,5	40,1
Микрокальцит	3,5	54,7	-	-	6,4	27,3

Как мы можем наблюдать, КМЦ адсорбируется на поверхности частиц наполнителей наилучшим образом среди всех трех водорастворимых полимеров. Это может быть обусловлено наличием множества гидроксильных групп, благодаря которым он образует многочисленные водородные связи с поверхностью наполнителей. Стоит отметить, что водный раствор ПВС также отличается высокими значениями адсорбции, особенно для 2,0%-ного раствора. Кроме того, отмечается, что увеличение концентрации растворов ПВС, КМЦ и ПЭГ (с 0,5 до 2%) практически во всех случаях повышает значение адсорбции, особенно для микроталька и талька (значение адсорбции увеличивается почти в 10 раз) в растворах КМЦ и ПВС. Исключением является адсорбция ПЭГ на поверхности частиц

талька и микрокальцита. Здесь величина адсорбции не зависит от концентрации раствора ПЭГ, что свидетельствует о достижении адсорбционной насыщенности уже при концентрации раствора ПЭГ 0,5%.

Несмотря на то, что ПВС, КМЦ и ПЭГ являются неионогенными ПАВ и не применяются в качестве диспергаторов при получении водных пигментных паст, они могут стабилизировать пигментные суспензии за счет регулирования реологических свойств. Было изучено влияние ПВС, КМЦ и ПЭГ на дезагрегацию частиц наполнителей при механическом воздействии на них в водных растворах. Перемешивание наполнителей в водных растворах полимеров осуществляли в течение трех часов и оценивали дисперсность образцов до и после механического воздействия с помощью КФК-2МП. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2. Средний размер частиц наполнителей после перемешивания в растворах полимеров

Наполнитель	Исходный размер частиц, мкм	Водный раствор				
		КМЦ	ПЭГ		ПВС	
		0,5%	0,5%	2,0%	0,5%	2,0%
		мкм	мкм	мкм	мкм	мкм
Микротальк	4,6	0,5	2,8	1,3	2,5	3,5
Тальк	10,0	4,2	7,8	7,6	5,6	4,6
Микробарит	4,9	1,9	3,2	3,7	1,2	1,5
Микрокальцит	22,2	9,3	15,4	19,7	4,9	4,4

По данным таблицы можно сделать вывод, что в большинстве случаев средний размер частиц уменьшился, то есть наполнители в ходе перемешивания дезагрегировались. Наилучший эффект получен при применении КМЦ и ПВС, тогда как ПЭГ в меньшей степени способствует дезагрегации частиц наполнителей. Это объясняется тем, что КМЦ является гидрофильным полимером, который образует очень вязкие растворы. Это приводит к улучшению смачивания и снижению трения между частицами, что облегчает их диспергирование.

Для подтверждения полученных результатов проводился повторный гравиметрический анализ наполнителей с адсорбированным 2%-ным раствором ПВС в термогравиметрическом анализаторе NETZSCHSTA 449F3. При нагревании образцов мы наблюдали колоссальное выделение тепла (синяя кривая) на 19-25 минуте эксперимента в интервале температур от 220-227 °С в зависимости от вида наполнителя. С помощью метода дифференциальной сканирующей микроскопии был определен тепловой поток реакции (рис. 1).

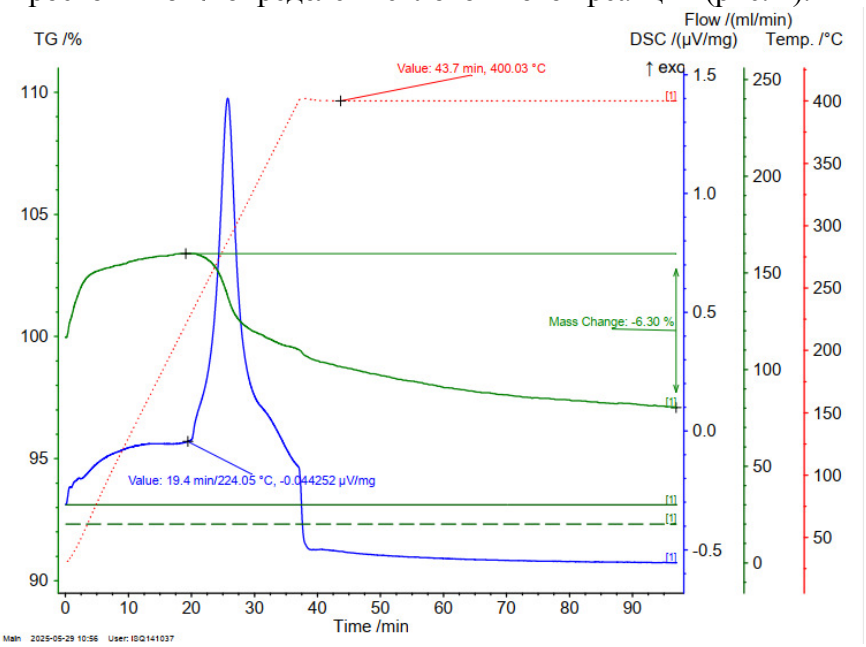


Рис. 1. График прокаливания литопона, обработанного 2%-ным раствором ПВС, в среде кислорода в термогравиметрическом анализаторе NETZSCHSTA 449F3
(Зеленая кривая – кривая изменения массы образца; синяя кривая - кривая изменение внутренней энергии; красная кривая – кривая изменение температуры)

Резкий скачок термодинамической кривой говорит о том, что в результате изменения температур полимер начинает разлагаться на воду и углекислый газ, то есть при данной температуре полимер деградирует. Протекает экзотермическая реакция с положительным пиком. Примерно на сорок четвертой минуте, достигнув температуры 400 °С, полимер полностью разложился и все кривые выходят на плато.

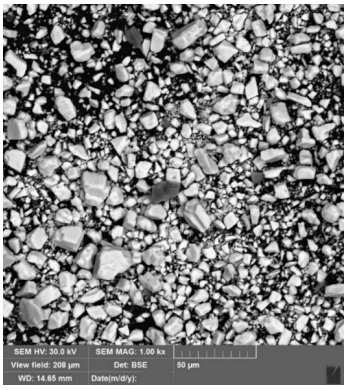
Таблица 3. Расчет адсорбции водорастворимых полимеров на поверхности частиц наполнителя

Наполнитель	Адсорбция ПВС, мг/г	
	в термогравиметрическом анализаторе	в муфельной печи
Микротальк	104,7	105,4
Тальк	66,9	77,7
Микробарит	38,2	40,1

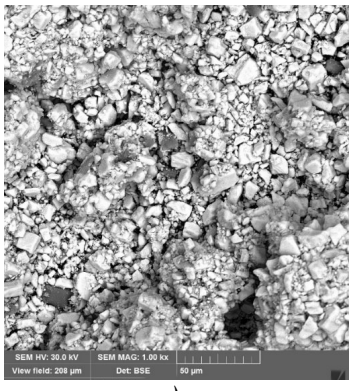
Значения уменьшения массы наполнителей при различных видах прокаливания колеруется друг с другом. Из данных табл. 3 следует высокая степень корреляции результатов, полученных с применением термогравиметрического анализатора NETZSCHSTA 449F3 и методом определения адсорбции полимеров на поверхности частиц наполнителя гравиметрическим методом.

Для исследования обработанной поверхности частиц наполнителей были сделаны снимки поверхности частиц микробарита чистого и обработанного двумя различными полимерами с одинаковой концентрацией – ПВС 2% и ПЭГ 2%. с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 2). Мы можем наблюдать частицы микробарита, которые имеют преимущественно пластинчатую форму и сильно отличаются по размеру. Принимаем в качестве допущения, что все частицы сферической формы, можем провести расчет распределения частиц по размерам. В случае микробарита массовая доля частиц с диаметром менее 20 мкм составляет примерно 95%, менее 10 мкм 70%, менее 5 мкм 31% и менее 1 мкм 2%.

а)



б)



в)

Рис. 2. Снимок поверхности частиц:
а – микробарита; *б* – микробарита, обработанного 2%-ным раствором ПЭГ;
в – микробарита, обработанного 2 %-ным раствором ПВС

На снимках видно, что раствор ПЭГ не адсорбировался на поверхности микробарита, однако размеры частиц уменьшились. Это подтверждает гравиметрический анализ адсорбции полимера на поверхности частиц. Массовая доля частиц с диаметром менее 20 мкм составляет примерно 98%, менее 10 мкм 83%, менее 5 мкм 46% и менее 1 мкм 3%. Обратная ситуация наблюдается на снимке поверхности частиц микробарита, на котором адсорбирован 2% раствор ПВС. Можно наблюдать, что частицы скоагулированы, стали видны агрегаты и сам полимер. Однако, не смотря на слипание частиц друг с другом, в ходе диспергирования их размеры уменьшились. Массовая доля частиц с диаметром менее 20 мкм составляет примерно 100%, менее 10 мкм 99%, менее 5 мкм 90% и менее 1 мкм 15%.

Для оценки эффективности диспергирования и получения стабильных дисперсных систем производилась оценка пептизации исследуемых наполнителей в водных растворах полимеров КМЦ, ПВС и ПЭГ. Исследование проводилось с помощью гомогенизатора HG-, расчет производился по отношению разницы начального и конечного значений оптической плотности ко времени, затраченного на измерение.

Таблица 4. Пептизация наполнителей в водных растворах полимерах

Наполнитель	Водный раствор					
	Время пептизации, $мин^{-1}$					
	КМЦ		ПЭГ		ПВС	
	0,5%	2,0%	0,5%	2,0%	0,5%	2,0%
Микробарит	$16{,}86 \cdot 10^{-3}$	$2{,}87 \cdot 10^{-3}$	$57{,}88 \cdot 10^{-3}$	$54{,}11 \cdot 10^{-3}$	$70{,}26 \cdot 10^{-3}$	$14{,}36 \cdot 10^{-3}$
Тальк	$20{,}2 \cdot 10^{-3}$	$2{,}86 \cdot 10^{-3}$	$38{,}22 \cdot 10^{-3}$	$83{,}28 \cdot 10^{-3}$	$49{,}92 \cdot 10^{-3}$	$30{,}37 \cdot 10^{-3}$
Микротальк	$4{,}51 \cdot 10^{-3}$	$2{,}44 \cdot 10^{-3}$	$11{,}26 \cdot 10^{-3}$	$37{,}03 \cdot 10^{-3}$	$19{,}76 \cdot 10^{-3}$	$8{,}86 \cdot 10^{-3}$
Микрокальцит	$17{,}84 \cdot 10^{-3}$	$2{,}12 \cdot 10^{-3}$	$26{,}26 \cdot 10^{-3}$	$41{,}98 \cdot 10^{-3}$	$23{,}26 \cdot 10^{-3}$	$10{,}24 \cdot 10^{-3}$

По данным таблицы 4 можно сделать вывод, что наилучшая пептизация наблюдается в растворах КМЦ. Микрокальцит обладает хорошей пептизацией в растворах КМЦ и ПВС, в свою очередь как степень пептизации КМЦ и ПВС на поверхности микроталька и талька значительно ниже, так как они обладают более гидрофобной поверхностью из-за наличия магниево-силикатных слоев и для более эффективной пептизации могут потребоваться полимеры с большим сродством к поверхности или введение дополнительных ПАВ. Для микробарита лучшая степень пептизации наблюдается в растворе ПВС.

С увеличением концентрации растворов время пептизации снижается, так как молекулы полимер, адсорбированные на поверхности частиц, создают дополнительный адсорбционный слой, препятствующий их обратной агрегации. Исключением является раствор ПЭГ для всех наполнителей. Это объясняется тем, что его эффективность зависит от его молекулярной массы и наличия подходящих функциональных групп на поверхности наполнителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Верхоланцев, В.В. Водные краски на основе синтетических полимеров / В.В. Верхоланцев. – М.: Химия, 1968. – 200 с.

2) Егорова, Е.В. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебное пособие / Е.В. Егорова, Ю.В. Поленов. – Иваново: ИГХТУ, 2008. – 83 с.

3) Основы коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / П.В. Кривошапкин, Е.Ф. Кривошапкина, Е.А. Назарова, В.В. Сталюгин. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 138 с.

УДК 544.4:502.1

СИНТЕЗ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ЗАКИСИ АЗОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Ю.Н. Сахарова, А.В. Кунин

Научный руководитель – **А.В. Кунин,** канд. техн. наук, доцент

Ивановский государственный химико-технологический университет

Были исследованы физико-химические свойства гидроксидов и оксидов кобальта с учётом влияния температуры прокаливания и выбора исходного сырья. Параллельно проведена оценка каталитических свойств композита Co_3O_4–$CoFe_2O_4$ в процессе разложения закиси азота. Эксперименты охватывали широкий диапазон соотношений компонентов – от стехиометрических до составов с избытком одного из оксидов. Анализ полученных данных подтвердил, что ключевыми факторами, определяющими степень разложения N_2O, являются температура синтеза катализатора, соотношение компонентов, а также природа исходного сырья.

Ключевые слова: *феррит кобальта; оксид азота (I); каталитическая активность; нитрат кобальта; сульфат кобальта; хлорид кобальта; механохимическая активация*

SYNTHESIS OF A CATALYTIC SYSTEM FOR THE DECOMPOSITION OF NITROGEN OXIDE USING MECHANOCHEMICAL METHODS

Yu.N. Sakharova, A.V. Kunin

Scientific Supervisor – **A.V. Kunin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Ivanovo State University of Chemistry and Technology

The physical and chemical properties of cobalt hydroxides and oxides were studied, taking into account the effect of calcination temperature and the choice of raw materials. In parallel, the catalytic properties of the Co_3O_4–$CoFe_2O_4$ composite were evaluated in the process of nitrous oxide decomposition. The experiments covered a wide range of component ratios, from stoichiometric to compositions with an excess of one of the oxides. The analysis of the obtained data confirmed that the key factors determining the degree of N_2O decomposition are the synthesis temperature of the catalyst, the ratio of the components, and the nature of the raw material.

Keywords*: cobalt ferrite; nitric oxide (I); catalytic activity; cobalt nitrate; cobalt sulfate; cobalt chloride; mechanochemical activation.*

Закись азота N_2O вносит значительный вклад в глобальное потепление и разрушение озонового слоя. Её потенциал глобального потепления (ПГП) в 310 раз превосходит показатель CO_2 [1], а длительное пребывание в атмосфере (свыше ста лет) усугубляет экологическую угрозу. В связи с этим разработка методов снижения выбросов N_2O приобретает особую актуальность. Одним из наиболее доступных и изученных подходов является каталитическое разложение газа до безвредных компонентов – азота и кислорода, – которое привлекает внимание научного сообщества уже несколько десятилетий [2, 3].

Закись азота в концентрированном виде открывает новые возможности для поддержания искусственной атмосферы в изолированных пространствах — например, в герметичных помещениях или рабочих зонах. Ключевое преимущество метода заключается в высоком выходе кислорода при разложении: соотношение O_2/N_2 достигает 0,50, тогда как в обычном воздухе оно составляет лишь 0,27. Это позволяет рассматривать способ как эффективную альтернативу системам регенерации воздуха [4]. Дополнительно технология может быть внедрена в сфере аналитических измерений – в частности, при получении особо чистых газов. Такие газы критически важны для методов точного и высокоразрешающего количественного анализа, где требуется максимальная чистота реакционной среды.

В последние годы отмечается повышенный интерес к механохимическому синтезу в области технологии катализаторов. Катализаторы, полученные с использованием

механохимической активации, имеют ряд преимуществ: экологичность, повышенная каталитическая активность, сокращение числа технологических стадий производства [5].

Феррит кобальта $CoFe_2O_4$ представляет собой сложный оксид кобальта и железа. Поэтому на первом этапе необходимо получить оксид кобальта Co_3O_4. Для получения Co_3O_4 готовили 25%-ные растворы $CoSO_4 \cdot 7H_2O$, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ к которым добавляли 0,1М раствор NaOH до pH=8. Затем осадок фильтровали и промывали горячей водой методом декантации до остаточного содержания анионов и катионов в промывных водах 500 мг/л.

А для получения феррита кобальта использовали оксалат кобальта $CoC_2O_4 \cdot 2H_2O$ и оксалат железа $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O$, а процесс синтеза осуществляли согласно методике, изложенной в работе [6]. Процесс синтеза осуществляли путем совместной механической активации исходных компонентов в лабораторной ролико-кольцевой вибрационной мельнице VM-4 (Чехия) с частотой колебаний 930 мин$^{-1}$. Время механохимической активации составляло 30 минут.

Рентгенофазовый анализ осадков, полученных методом осаждения из водных растворов $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $CoSO_4 \cdot 7H_2O$, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, подтвердил, что все образцы являются однофазными и соответствуют гидроксиду кобальта (II) – $Co(OH)_2$. Анализ рентгенограмм показал, что полученные образцы характеризуются близкими значениями параметров кристаллической решётки и идентичным размером кристаллитов.

Прокаливание образцов $Co(OH)_2$ при температуре 200 °С (рис. 1) приводит к формированию фазы Co_3O_4 по реакции:

$$3Co(OH)_2 + 1/2O_2 \rightarrow Co_3O_4 + 3H_2O$$

Все образцы идентифицируются как однофазный Co_3O_4. Однако величина и ширина характеристических рефлексов сильно отличаются друг от друга и позволяют выявить наиболее дефектный и реакционно-способный Co_3O_4.

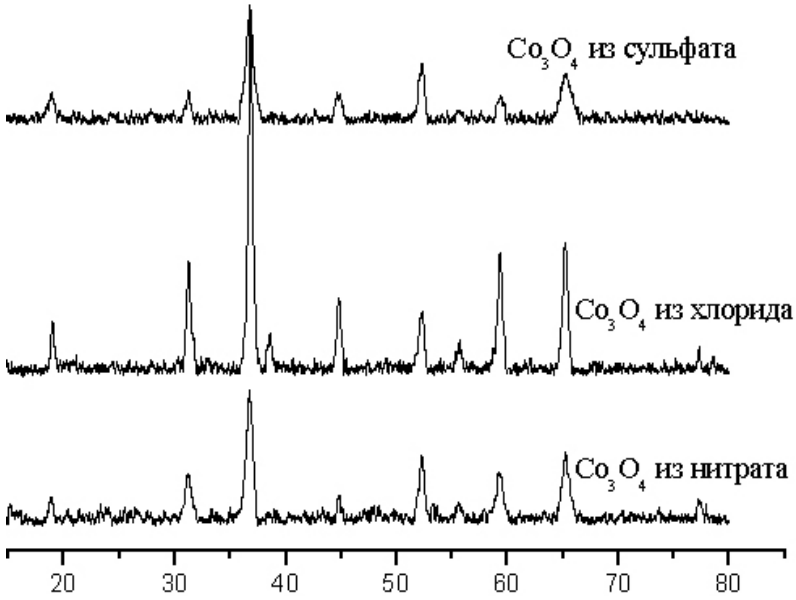


Рис. 1. Рентгенограммы продуктов $Co(OH)_2$, полученных из нитрата, хлорида и сульфата кобальта, подвергнутых термической обработке (200 °С)

Как видно из анализа рентгенограмм, наиболее дефектный, имеющий наименьший размер первичных частиц, является образец Co_3O_4, полученный по сульфатной и близкий к нему нитратной технологии. Эксплуатация катализатора предполагается при температурах 300–400 °С, по этой причине нами были проведены дополнительные исследования методом рентгеноструктурного анализа для выявления характера деформационного процесса в оксидах.

Увеличение термообработки до 400 °С (рис. 2) приводит к увеличению интенсивности рентгеновских пиков Co_3O_4 и уменьшению их полуширины, что свидетельствует о протекании процессов агломерации, приводящих к увеличению среднего размера кристаллитов.

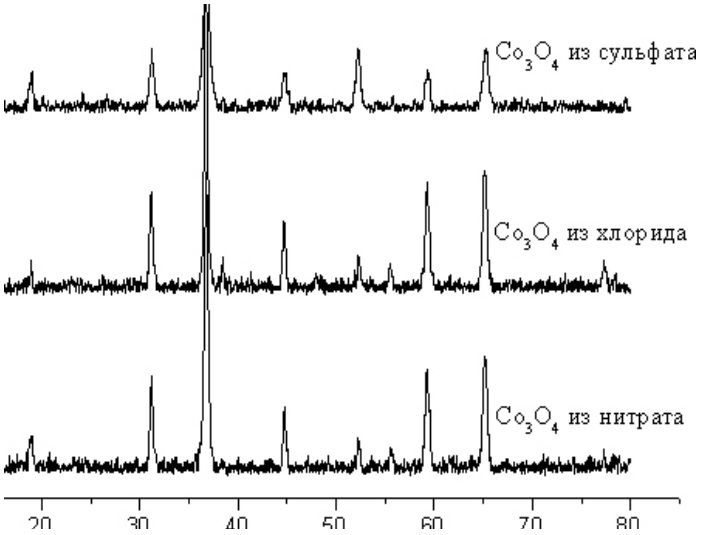


Рис. 2. Рентгенограммы продуктов Co_3O_4, полученных из нитрата, хлорида и сульфата кобальта, подвергнутых термической обработке (400 °С)

Таблица 1. Физико-химические свойства Co_3O_4, полученного из гидроксида кобальта

Температура прокаливания, °С	300	400	450
Качественный состав	Co_3O_4		
Размер элементарной ячейки *a*, Å	8,288	8,378	8,377
$S_{уд}$, $м^2/г$	77	72	67
$D_{окр}$, нм	17	26	30
Величина микродеформаций ε, %	-	0,30	0,21
Суммарный объем пор, $см^3/г$	0.150	0.064	0.025

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2024-481

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Шеболтасов, А.Г. Очистка отходящих газов производства неконцентрированной азотной кислоты от оксидов азота путем селективного восстановления аммиаком / А.Г. Шеболтасов, Н.В. Верниковская, В.А. Чумаченко // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 2–6 дек. 2019 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 9. – С. 405–408.

2) Технологии комплексной низкотемпературной каталитической очистки промышленных газовых выбросов от NOx и N_2O в производстве азотной кислоты / В.А. Чумаченко, Л.А. Исупова, Ю.А. Иванова [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2019. – № 4. – С. 2–7.

3) Бруштейн, Е.А. Изменение концентрации N_2O по газовому тракту агрегата УКЛ-7 в производстве неконцентрированной азотной кислоты / Е.А. Бруштейн, В.И. Ванчурин, А.В. Ященко // Катализ в промышленности. – 2012. – № 4. – С. 7–12.

4) Boll, W. Prolonged campaign length of high pressure nitric acid plant by optimization of secondary catalyst design for N_2O abatement / W. Boll // Nitrogen+Syngas 2017 Int. Conf. & Exhib. – London, 2017.

5) Formation and control of N_2O in nitric acid production. Where do we stand today? / J. Pérez-Ramirez, F. Kapteijn, K. Schöffel, J. A. Moulijn // Applied Catalysis. – 2003. – Vol. 44. – P. 117–151.

6) Механохимический и керамический синтез феррита кобальта / К.О. Птицына, А.А. Ильин, Р.Н. Румянцев, Ю.Н. Сахарова // Стекло и керамика. – 2022. – Т. 95, № 1. – С. 21–30.

УДК 547.593.21:661.727.81

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЦИКЛОГЕКСАНОНА И ЦИКЛОГЕКСАНОЛА

А.А. Смурова, А.В. Косицына, А.С. Фролов, Е.А. Курганова

Научный руководитель – **А.С. Фролов**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В данной работе представлены экспериментально подтвержденные способы модернизации технологии получения циклогексанола и циклогексанона, изучены процессы окисления циклогексана, окисления циклогексанола и эпоксидирования циклогексена гидропероксидом циклогексана.

Ключевые слова: *жидкофазное окисление, циклогексан, циклогексанон, циклогексанол, эпоксид циклогексана*

MODERNIZATION OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING CYCLOHEXANONE AND CYCLOHEXANOL

A.A. Smurova, A.V. Kositsyna, A.S. Frolov, E.A. Kurganova

Scientific Supervisor – **A.S. Frolov**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This paper presents experimentally confirmed methods for modernizing the technology for producing cyclohexanol and cyclohexanone, and studies the processes of cyclohexane oxidation, cyclohexanol oxidation, and cyclohexene epoxidation with cyclohexane hydroperoxide..

Keywords*: liquid-phase oxidation, cyclohexane, cyclohexanone, cyclohexanol, cyclohexane epoxide.*

Циклогексанол и циклогексанон – базовые продукты нефтехимии. Циклогексанон является важнейшим полупродуктом для синтеза найлона-6 и найлона-6,6 из капролактама и адипиновой кислоты. Получаемый на основе циклогексанона поликапролактон применяется в медицине [1-3]. Кроме того, циклогексанон используется в качестве компонента пестицидов, фармацевтических субстанций [4] и сырья для синтеза оксима и специальных смол [5].

В промышленности преобладают две технологии: прямое аэробное окисление циклогексана (ЦГ) нафтенатом кобальта или двухстадийный синтез через гидропероксид. Оба метода малоэффективны: конверсия ЦГ не превышает 4-5%, а селективность ограничена 60-70%. Процесс сопровождается образованием большого количества побочных продуктов, а последующее дегидрирование спирта до кетона на медно-цинковых катализаторах [6] требует значительных энергозатрат. Несмотря на многолетнюю историю, технология практически не менялась, а попытки ее усовершенствовать часто упирались в дороговизну или опасность реагентов. Поэтому разработка новых методов интенсификации окисления циклогексана остается приоритетной задачей.

В данной работе предложены способы модернизации обеих промышленных технологий (рис. 1).

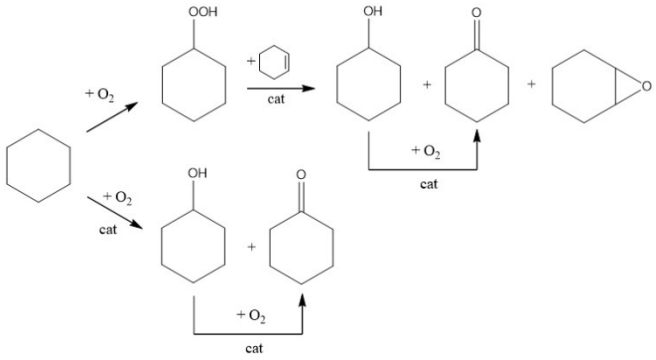


Рис. 1

В качестве первого пути повышения эффективности рассматривается каталитическое одностадийное окисление в присутствии катализаторов на основе *N*-гидроксифталимида (*N*-ГФИ) и солей металлов переменной валентности (Co, Mn, Cu, Cr, Ni). Наиболее эффективной оказалась каталитическая система *N*-ГФИ/ацетат кобальта (II): конверсия циклогексана составляет 10.9% при селективности образования циклогексанола и циклогексанона 95%.

Другое направление модернизации технологии предполагает использование гидропероксида циклогексана не в разложении до спирта и кетона, а для эпоксидирования циклогексена. В результате процесса эпоксидирования циклогексена гидроперкосидом циклогексана образуются не только циклогексанол и циклогексанон, но и эпоксид циклогексана. Благодаря высокому напряжению оксиранового кольца эпоксид легко вступает в реакцию с нуклеофилами, открывая возможности для синтеза разнообразных соединений, обладающих биологической активностью [7].

Исследован процесс эпоксидирования циклогексена гидропероксидом циклогексана в присутствии ацетилацетоната молибденила в качестве катализатора. Исследовано влияние основных технологических параметров на содержание целевых продуктов (мольное соотношение реагентов, содержание катализатора, температура, длительность процесса). Оптимальные условия: 80°C, 60 мин реакции, соотношение реагентов 1 : 3. Таким образом были получены эпоксид циклогексана с содержанием 6.4 мас. %, циклогексанон – 1.4 мас. %, циклогексанол – 10.2 мас. %. Гидропероксид циклогексана, был получен некаталитическим окислением циклогексана, сконцентрирован до 7.7 мас. % методом вакуумной ректификации.

Как в предложенных, так и в существующих промышленных методах полученный циклогексанол может быть далее преобразован в циклогексанон путем жидкофазного окисления.

Установлено, что инициирование окисления циклогексанола гидропероксидом изопропилбензола или 2,2’-азобисизобутиронитрилом (при 100 °C, 1 час, 6.7 мол. % инициатора) позволяет увеличить содержание циклогексанона до 6.8 и 16.8 мас. % соответственно, но при этом снижается селективность. Использование *N*-гидроксифталимида (*N*-ГФИ) в качестве катализатора повысило содержание кетона до 35 мас. %.

Совместное использование *N*-ГФИ и солей переходных металлов (Co, Ni, Cr, Mn, Cu) в молярном соотношении 10 : 1 значительно интенсифицировало процесс. Добавление ацетата или стеарата кобальта (II) к *N*-ГФИ позволило достичь содержания циклогексанона 53 мас. % при селективности 97%.

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод, что предложенные способы получения эпоксида циклогексана, циклогексанола и циклогексанона могут быть интересны с точки зрения их практической реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1) Sun Polycaprolactone nanofiber scaffold enhances the osteogenic differentiation potency of various human tissue-derived mesenchymal stem cells / R. Xue, Y. Qian, L. Li, G. Yao, L. Yang // Stem Cell Research & Therapy. – 2017. – Vol. 8(1). – P. 148.

2) Захарова, И.С. Разработка тканеинженерных конструкций на основе смеси хитозана и поликапролактона для сосудистой хирургии / И.С. Захарова, А.М. Смирнова, М.К. Живень // Гены и клетки. – 2016. – Т. 11(4). – С. 50-56.

3) A randomized, patient/evaluator-blinded, split-face study to compare the efficacy and safety of polycaprolactone and polynucleotide fillers in the correction of crow’s feet: The latest biostimulatory dermal filler for crow’s feet / G.J. Jeong, G.R. Ahn, S.J. Park, J.Y. Hong, B.J. Kim // J Cosmet Dermatol. – 2020. – Vol. 19(7). – P. 1593-1599.

4) Simon, E.J. Romero Coke formation in copper catalyst during cyclohexanol dehydrogenation: Kinetic deactivation model and catalyst characterization / E.J. Simon, A. Rosas, A. Santos // Chemical engineering journal. – 2013. – Vol. 214. – P. 119-128.

5) Dehydrogenation of cyclohexanol over Cu/Al_2O_3 catalysts prepared with different precipitating agents / N.P. Tangale, P.S. Niphadkar, S.S. Deshpande, P.N. Joshi // Applied Catalysis A: General. – 2013. – Vol. 467. – P. 421-429.

6) Лысикова, Е.А. Импортозамещающий катализатор для дегидрирования циклогексанола в циклогексанон / Е.А. Лысикова, В.И. Ванчурин, О.И. Караченко // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 5(186). – С. 79-81.

7) Синтез, свойства и биологическое действие (±)-транс- 2-диалкиламиноциклогексанолов и их сложных эфиров / В.Х. Шон, Д.М. Зверев, Н.Ю. Борисова, Е.Ю. Афанасьева, Т.П. Колобова, Борисова Е.Я. // Тонкие химические технологии. – 2007. – Vol. 2(6). – P. 85-89.

УДК 547.818.1

ОБЗОР СПОСОБОВ СИНТЕЗА АМИДОВ 2*H*-ТИОПИРАНКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ

М.В. Старостин

Научный руководитель – **А.В. Колобов**, д-р хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Представлены известные способы синтеза амидов 2H-тиопиранкарбоновых кислот, которые связанны с реакциями ацилирования и гетеро-Дильса-Альдера. Рассмотрены особенности протекания реакции ацилирования аминов ангидридами 2H-тиопиран-2,3-дикарбоновых кислот.

Ключевые слова: *2H-тиопираны, амиды карбоновых кислот, ацилирование, гетерореакция Дильса-Альдера.*

REVIEW OF SYNTHESIS METHODS OF AMIDES 2*H*-THIOPYRAN CARBOXYLIC ACIDS

M.V. Starostin

Scientific Supervisor **- A.V. Kolobov**, Doctor of Chemical Sciences, Professor

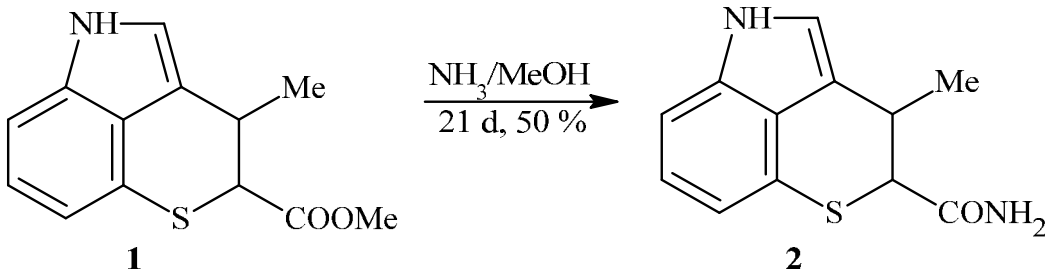
Yaroslavl State Technical University

We describe known methods for synthesizing amides 2H-thiopyran carboxylic acid involving acylation and hetero-Diels-Alder reactions. We discuss the specific features of amine acylation reaction with 2H-thiopyran-2,3-dicarboxylic acid anhydrides.

Keywords: *2H-thiopyrans, carboxylic acid amides, acylation, hetero-Diels-Alder reaction.*

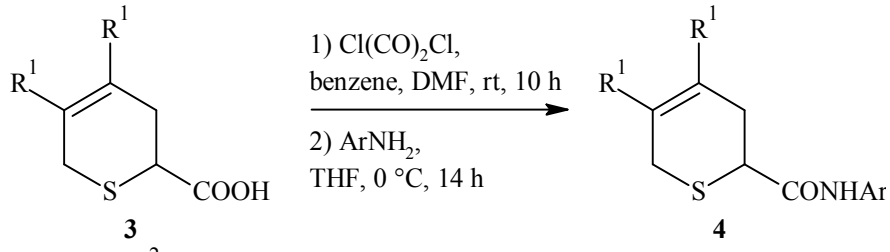
Тиопираны и их производные проявляют биологическую активность [3]. Исследования по функционализации этих соединений являются актуальной научной задачей. Настоящая работа посвящена обзору известных способов синтеза амидов 2*H*-тиопиранкарбоновых кислот.

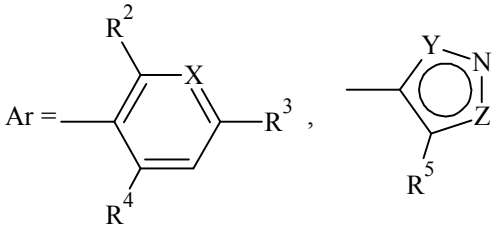
В статье [2] авторами описан способ получения амида чуангксинмицина **2** ацилированием аммиака соответствующим метиловым эфиром **1**. Чуангксинмицин является природным антибиотиком.



1 **2**

Амиды тиопирана **4** могут быть синтезированы из соответствующих карбоновых кислот **3**, которые переводят в хлорангидриды посредством взаимодействия с оксалилхлоридом [6]. Хлорангидриды в свою очередь вступают в реакцию ацилирования с ароматическими аминами.

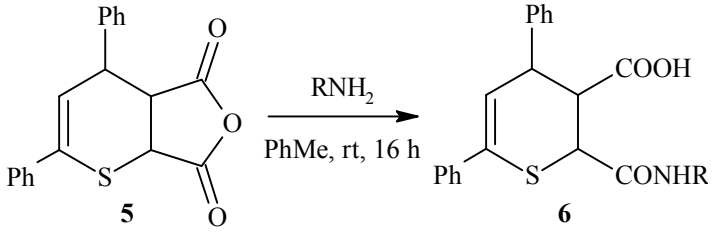




R^1 = Me, Bu, Am, hexyl, octyl
R^2 = H, Me, *i*-Pr, F, Cl, SMe
R^3 = H, Me, SMe
R^4 = H, Me, *i*-Pr, Cl, SMe
R^5 = H, Me, Br, COOEt, SMe
X = CH, N
Y = CMe, COH, NPh, NMe
Z = CH, CMe, NMe

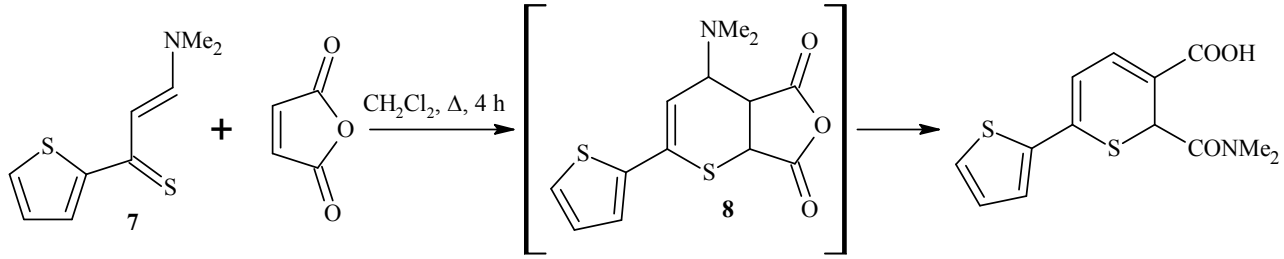
Интересной особенностью использования ангидридов 2*H*-тиопиран-2,3-дикарбоновых кислот для ацилирования аминов является региоселективность протекания реакции.

Так реакция ацилирования аминов с использованием ангидрида 2,4-дифенил-3,4-дигидро-*2H*-тиопиран-2,3-дикарбоновой кислоты **5** приводит к образованию соответствующих амидов **6** исключительно в положении С-2 [5].

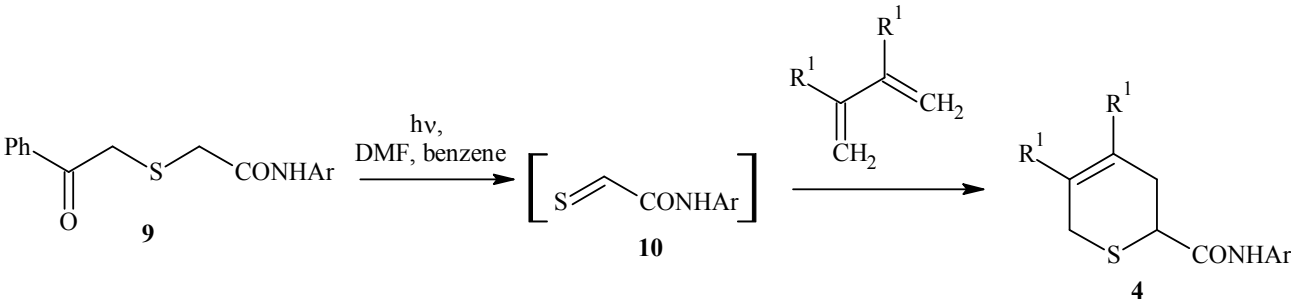


R = Ph, *p*-Tol, C_6H_4-4-OPh, morpholine

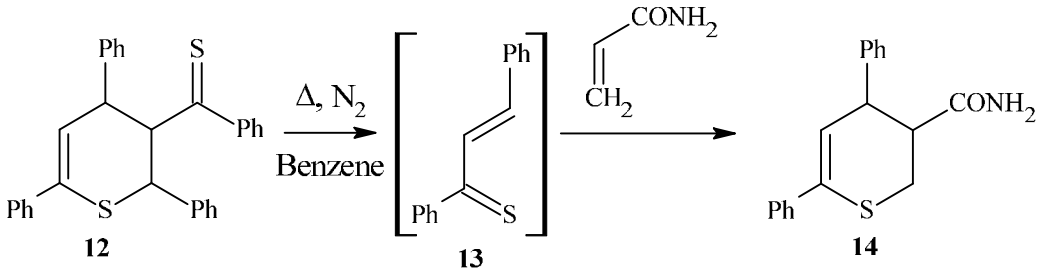
Та же закономерность была показана авторами статьи [1]. Гетерореакция Дильса-Альдера 3-(диметиламино)-1-(тиофен-2-ил)проп-2-ен-1-тиона **7** и малеинового ангидрида приводит к ангидриду 4-(диметиламно)-6-(тиофен-2-ил)-2*H*-тиопиран-2,3-дикарбоновой кислоты **8**, который неустойчив и отщепляет молекулу диэтиламина. После этого **8** сразу вступает в реакцию ацилирования диэтиламина с образованием амидной группы в положении С-2, как в предыдущем случае.



В качестве альтернативного метода синтеза амидов **4** теми же авторами предлагается использовать гетерореакцию Дильса-Альдератиоальдегидов**10** с диенами **11**[6]. **10** были получены из сульфидов **9** при облучении.



Еще одним примером использования гетерореакции Дильса-Альдера служит синтез 4,6-дифенил-3,4-дигидро-*2H*-тиопиран-3-карбоксамида **14** циклизацией тиохалкона **13** и акриламида [4]. **13** образуется в процессе термолиза соответствующего димера **12**. В этом случае серосодержащим компонентом гетерореакции Дильса-Альдера выступает диен, а в предыдущем – диенофил.



Таким образом, в литературе описано получение амидов 2*H*-тиопиранкарбоновых кислот из соответствующих кислот и их производных или по гетеро-реакции Дильса-Альдера из реагентов, содержащих амидную группу и/или атом серы. При ацилировании аминов ангидридами 2*H*-тиопиран-2,3-дикарбоновых кислот образуются продукты с амидной группой в положении С-2 тиопиранового цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Bogdanowicz-Szwed, K. Efficient Synthesis of Functionalized 2*H*-Thiopyrans via Hetero-Diels-Alder Reactions of an Enaminothione with Electrophilic Olefins / K. Bogdanowicz-Szwed, A. Budzowski // Monatshefte für Chemie/Chemical Monthly. – 2001. – Т. 132, № 8. – С. 947–957.

2) The antimicrobial natural product chuangxinmycin and Some synthetic analogues are potent and selective inhibitors of bacterial tryptophanyl tRNA synthetase / M. J. Brown, P. S. Carter, A. S. Fenwick [et al.] // Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters. - 2002. – Т. 12, № 21. – С. 3171–3174.

3) Hegab, M.I. A review on chemical and biological studies of thiopyran derivatives / M.I. Hegab // Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements. – 2025. - Т. 200, № 1. - С. 1–11.

4) Karakasa, T. Chemistry of *α,β*-Unsaturated Thione Dimers. 1. Preparation of *α,β*-Unsaturated Thione Dimers and Thermolysis of These Dimers in the Presence of Acrylonitrile or Acrylamide / T. Karakasa, S. Motoki // J. Org. Chem. – 1978. – Т. 43, № 21. – С. 4147–4150.

5) Unsaturated carboxylic acids in the one-pot synthesis of novel derivatives of 3,4-dihydro-2*H*-thiopyran / E.A. Merkulova, A.V. Kolobov, K.L. Ovchinnikov [et al.] // Chem. Heterocycl. Comp. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 245–252.

6) ACAT inhibitors derived from hetero-Diels-Alder cycloadducts of thioaldehydes / R.G. Wilde, J.T. Billheimer, S.J. Germain [et al.] // Bioorganic & Medicinal Chemistry. – 1996. – Т. 4, № 9. – С. 1493–1513.

УДК 676.244

СВОЙСТВА МЕШОЧНОЙ БУМАГИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА И РАСХОДА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

В.Н. Сундукова

Научные руководители **– С.А. Гордейко**, канд. техн. наук, доцент,
Е.П. Шишаков, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник

Белорусский государственный технологический университет

Рассматривается влияние композиционного состава на свойства мешочной бумаги с применением нового катионного модифицированного крахмала и клея на основе алкилкетен димера.

Ключевые слова:*композиционный состав, свойства, модифицированный катионный крахмал, мешочная бумага.*

PROPERTIES OF SACK PAPER DEPENDING ON THE COMPOSITION AND DOSAGE OF FUNCTIONAL CHEMICAL ADDITIVES

V.N. Sundukova

Scientific Supervisors **– S.A. Gordeyko,** Candidate of Technical, Associate Professor,
E.P. Shishakov, Candidate of Technical, Senior Research Associate

Belarusian State Technological University

The influence of the compositional formulation on the properties of sack paper using a new cationic modified starch and an alkylketenedimer based sizing agent is examined.

Keywords: *compositional formulation, properties, cationic modified starch, sack paper.*

Бумага мешочная, предназначенная для изготовления многослойных мешков, является на сегодняшний день одним из наиболее массовых и прочных видов бумаги. При этом в современных условиях повышения экологичности производства и удешевления способов утилизации отработанной упаковки производство ее все возрастает. При этом стоимость производства бумажных мешков выше, чем стоимость полиэтиленовых пакетов [1]. Следовательно, необходим поиск новых технологических решений для удешевления производства мешочной бумаги с сохранением или улучшением первоначальных свойств. Предлагается рассмотреть влияние нового катионного модифицированного крахмала, отличающегося от его аналогов более высокой степенью замещения (СЗ), на бумагообразующие свойства мешочной бумаги.

Степень замещения – это количественный показатель, отражающий среднее количество гидроксильных групп в молекуле глюкозы, которые были химически модифицированы (замещены) функциональными группами [2–3].

Цель исследования – изучение влияния композиционного состава на свойства мешочной бумаги.

Объекты исследования – образцы бумаги, отличающиеся расходом функциональных веществ (катионного модифицированного крахмала (КМК) со степенью замещения 0,25 и алкилкетен димера (АКД)). В качестве волокнистого полуфабриката использовали целлюлозу сульфатную беленую из хвойных пород древесины (Ц).

Процесс проведения эксперимента включал в себя несколько последовательных стадий подготовки и испытаний. Роспуск и размол волокнистого полуфабриката (целлюлозы

сульфатной из хвойных пород древесины (ГОСТ 9571-89)) производили на дезинтеграторе марки БМ-3 и лабораторном ролле.

Бумагообразующие свойства 1%-ной волокнистой суспензии характеризовали степенью помола (СП = 35 °ШР), которую измеряли на аппарате СР-2. Подготовленная суспензия служила основой для введения функциональных добавок. Измерение показателей качества готовых образцов бумаги проводили на разрывной машине (Testometric) и приборе Кобба.

Бумажная композиция, которая состояла из 100%-ной целлюлозы, являлась образцом сравнения. В исследуемых композициях помимо волокнистого сырья (100%-ной целлюлозы) вводились функциональные вещества АКД и КМК с расходами 2, 4 и 6 кг на тонну абсолютно сухого волокна (а. с. в.) Изготовление бумажных листов массой 80 г/м^2 производилось на листоотливном аппарате «Rapid-Ketten». Измерение показателей качества готовых образцов бумаги проводили на разрывной машине «Testometric» и приборе Кобба.

Свойства исследуемых образцов бумаги характеризовали такими показателями качества, как впитываемость при одностороннем смачивании (ВПИТ), разрушающее усилие в сухом ($Р_{сух}$), разрушающее усилие во влажном состоянии ($Р_{вл}$), разрывная длина (РД) и влагопрочность (В).

В первой серии эксперимента изучалось индивидуальное влияние функциональных веществ на свойства бумаги. В табл. 1 представлены полученные в ходе эксперимента данные.

Таблица 1. Индивидуальное влияние функциональных веществ на свойства мешочной бумаги

Вид функциональных веществ	Качество образцов бумаги														
	ВПИТ, г/м^2			$Р_{сух}$, Н			$Р_{вл}$, Н			РД			В, %		
	Расход химических веществ, кг/т														
	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
–	95,3			79,0			2,1			5115			2,7		
АКД	86,7	25,2	17,5	91,0	86,0	76,2	3,4	4,9	12,0	5875	6120	5570	4,3	5,7	13,2
КМК	94,4	93,3	98,3	90,0	89,0	77,5	1,0	1,1	1,0	6680	6180	5360	1,1	1,2	1,2

Анализ данных табл. 1 показал, что введение в бумажную композицию АКД значительно снижает впитываемость при одностороннем смачивании от 95,3 до 17,5 г/м^2 при расходе 6 кг/т, однако при этом наблюдается снижение разрушающего усилия в сухом состоянии от 79,0 до 76,2 Н. КМК при малых расходах (2 кг/т) повышает разрывную длину от 5115 до 6680 м, при более высоких расходах (6 кг/т) повышает показатель впитываемости при одностороннем смачивании от 95,3 до 98,3 г/м^2.

Во второй серии эксперимента изучалось совместное влияние КМК и АКД при различных расходах на свойства мешочной бумаги. В таблице 2 представлены полученные в ходе эксперимента данные.

Таблица 2. Влияние содержания применяемых функциональных веществ на свойства мешочной бумаги

Вид сырья		Качество образцов бумаги											
		ВПИТ, г/м^2			$Р_{сух}$, Н			РД, м			В, %		
	Расход КМК, кг/т	Расход АКД, кг/т											
		2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
Ц	2	36,2	15,9	33,4	80,0	82,0	91,0	6675	6260	5655	2,6	11,4	27,7
	4	42,9	34,2	14,9	78,0	57,0	58,0	6780	4040	4275	6,1	12,5	26,9
	6	52,7	19,9	18,7	89,0	95,0	82,0	6740	6460	6610	5,2	8,8	13,3
	–	95,3			79,0			5115			2,7		

Таким образом, сопоставительный анализ табл. 2, свидетельствует о том, что наиболее оптимальными расходами функциональных веществ для получения наилучших

показателей качества образцов бумаги, являются расход КМК 2 кг/т и АКД соответственно 4 кг/т. При сравнении с контрольным образцом (без функциональных веществ) образцы с функциональными веществами обладали следующими показателями: впитываемость при одностороннем смачивании уменьшилась от 95,3 до 15,9 г/м^2, разрушающее усилие в сухом состоянии увеличилось от 79,0 до 82,0 Н, разрывная длина увеличилась от 5115 до 6260 м, влагопрочность увеличилась от 2,7 до 11,4%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) WWW.MEGARESEARCH.RU: маркетинговое агентство: [сайт]. – Москва, 2007. – URL: https://www.megaresearch.ru/news_in/analiz-rynka-meshochnoy-kraft-bumagi-v-respublike-belarus-rost-prodolzhitsya-v-osnovnom-za-schet-podderzhki-gosudarstva (дата обращения: 05.04.2026).

2) Пинчукова, К.В. Перспективы использования модифицированного крахмала для улучшения эксплуатационных свойств бумаги и картона / К.В. Пинчукова, Я.В. Глазкова, Зухра Кужугалдинова // Молодой ученый. – 2016. – № 28 (132). – С. 163–166. – URL: https://moluch.ru/archive/132/36990

3) Шишаков, Е.П. Получение и применение катионированных полимеров в технологии бумаги: [презентация: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со Дня рождения проф. В. М. Резникова «Химия и химическая технология переработки растительного сырья», Минск, 10–12 октября 2018 г.] / Е.П. Шишаков. // Библиотека БГТУ: официальный сайт. – 2018. – URL: https://elib.belstu.by/handle/123456789/26378 (дата обращения: 08.04.2026).

УДК 547.853.3

МОДИФИКАЦИЯ 6-СТИРИЛЗАМЕЩЕННЫХ АДДУКТОВ БИДЖИНЕЛЛИ: СИНТЕЗ И ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ

А.М. Урядова

Научный руководитель – **С.И. Филимонов**, д-р хим. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В работе представлены методы функционализации 4-арил-6-стирилдигидропиримидин-2-онов, синтезированных на основе классических аддуктов многокомпонентной реакции Биджинелли. В условиях реакции Вильсмейера-Хаака селективно получены соответствующие 1,5-дикарбальдегиды. Осуществлено их последующее N-деформилирование под действием аммиака до монокарбальдегидов, а также восстановление боргидридом натрия в среде ацетонитрила. Строение целевых соединений однозначно подтверждено методами ЯМР-спектроскопии, масс-спектрометрии и рентгеноструктурного анализа.

Ключевые слова: *4-арил-6-стирилдигидропиримидиноны, стирильный фрагмент, реакция Вильсмейера–Хаака, стирилдигидропиримидин-1,5-дикарбальдегиды, стирилтетрагидропиримидин-5-карбальдегиды, боргидрид натрия, 5-гидроксиметил-6-стирилдигидропиримидиноны.*

MODIFICATION OF 6-STYRYL-SUBSTITUTED BIGINELLI ADDUCTS: SYNTHESIS AND STRUCTURAL FEATURES

A.M. Uryadova

Scientific Supervisor – **S.I. Filimonov**, Doctor of Chemical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

This work presents methods for the functionalization of 4-aryl-6-styryldihydropyrimidin-2-ones synthesized from classical adducts of the Biginelli multicomponent reaction. Under Vilsmeier-Haack reaction conditions, the corresponding 1,5-dicarbaldehydes were selectively obtained. Their subsequent N-deformylation with ammonia to monocarbaldehydes, as well as reduction with sodium borohydride in acetonitrile, was carried out. The structures of the target compounds were unambiguously confirmed by NMR spectroscopy, mass spectrometry, and X-ray diffraction analysis.

Keywords: *4–aryl-6-styryldihydropyrimidines, styryl fragment, Vilsmeier-Haack reaction, styryldihydropyrimidine-1,5-dicarbaldehydes, styryltetrahydropyrimidine-5-carbaldehydes, sodium borohydride, 5-hydroxymethyl-6-styryldihydropyrimidines*

Производные 3,4-дигидропиримидин-2-онов (ДГПМ), синтезируемые с помощью классической многокомпонентной реакции Биджинелли, являются одним из наиболее значимых классов азотсодержащих гетероциклов в медицинской химии. Их востребованность обусловлена структурным сходством с природными нуклеотидами и широким спектром биологической активности [1-3]. Особый интерес представляют 6-стирилзамещенные ДГПМ, в которых стирильный фрагмент обеспечивает расширение системы π-π сопряжения между пиримидиновым циклом и ароматическим заместителем. Такая модификация не только изменяет физико-химические свойства молекул, но и способствует значительному увеличению их липофильности, что важно для повышения биодоступности и способности соединений преодолевать клеточные мембраны.

Актуальность использования стирильной группы (Ph-CH=CH-R) подтверждается ее распространенностью в составе фармацевтических препаратов, агрохимикатов и природных соединений [4]. В частности, стирильный фрагмент является структурным элементом двух важных классов природных соединений – стильбенов [5] и халконов [6]. К наиболее изученным представителям относятся ресвератрол, обладающий выраженной фармакологической активностью и способный эффективно подавлять белковый комплекс

NF-kB при лечении герпесвирусных инфекций [7], а также семейство комбретастатинов [8] и куркумин [9], обладающие значительным противоопухолевым потенциалом. Благодаря своей универсальности, стирильные производные также применяются в качестве флуоресцентных меток для визуализации живых клеток [10] и платформы для адресной доставки лекарств (рис. 1) [11].

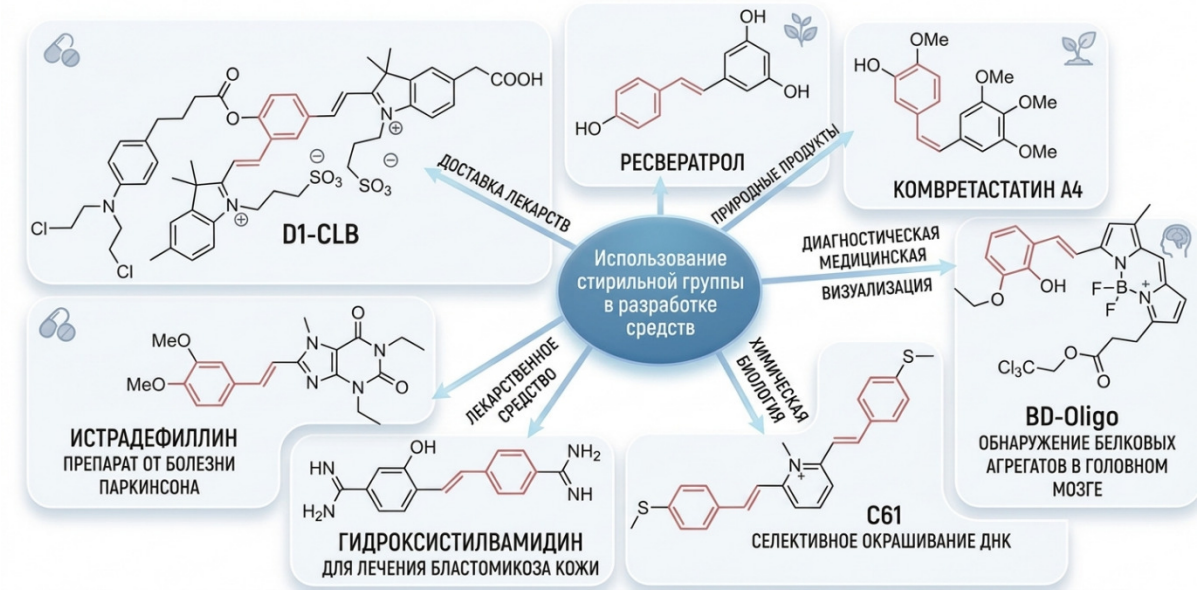


Рис. 1. Применение соединений, содержащих стирильный фрагмент

Одним из подходов к получению 4-арил-6-стирилпиримидиновых систем является модификация аддуктов реакции Биджинелли. Данная стратегия основана на реакционной способности метильной группы в положении C6, обладающей слабо выраженными свойствами CH-кислоты. Согласно литературным данным, методы синтеза стирильных производных зачастую требуют жестких условий (водные растворы NaOH или KOH [12]), что приводит к одновременному гидролизу сложноэфирного фрагмента и его последующему декарбоксилированию. Для сохранения функциональных групп в структуре пиримидинового кольца разработаны альтернативные методики с применением кислот Льюиса в качестве катализаторов [13]. Кроме того, функционализация C6-метильного заместителя возможна через стадию галогенирования с последующим введением ароматического альдегида в реакции Хорнера-Уодсворта-Эммонса [14].

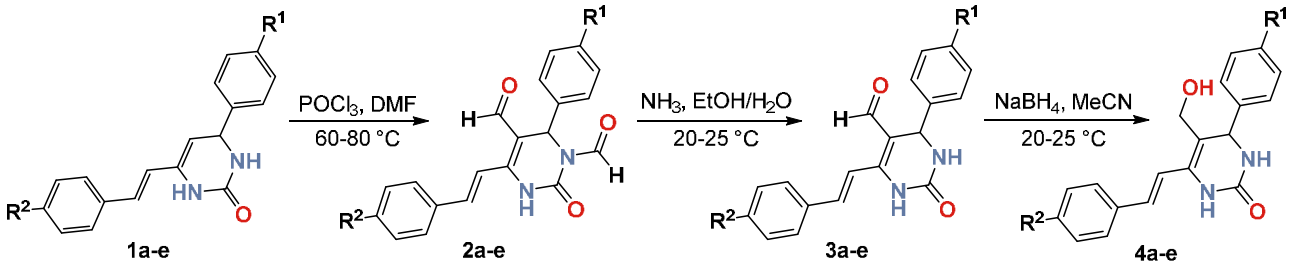
Несмотря на потенциал, 6-стирилдигидропиримидиноны редко используются как субстраты для дальнейших превращений. Модификация известных 4-арил-6-стирилдигидропиримидин-2-онов[12] может не только усилить их биологическое действие, но и открыть путь к синтезу новых конденсированных гетероциклических систем.

Целью данной работы является разработка методов введения функциональных групп в положение C5 6-стирилдигидропиримидинонов.

Формилирование стирилпиримидинонов проводили в условиях реакции Вильсмейера-Хаака. При обработке соединений **1a-e** трехкратным мольным избытком хлорокиси фосфора в ДМФА (60-80 °C, 40 мин) наблюдалось селективное образование дикарбальдегидов **2a-e** с выходом до 76%.

Последующее N-деформилирование соединений **2** при воздействии 16-кратного избытка аммиака (20-25 °C) привело к получению монокарбальдегидов **3a-e** с выходом до 82%.

Для получения 4-арил-5-гидроксиметил-6-стирилдигидропиримидинонов **4** осуществлено восстановление 5-формилпроизводных **3** боргидридом натрия в среде ацетонитрила (20-25 °C, 4-5 ч) (схема 1).



a R^1 = H, R^2 = H; **b** R^1 = H, R^2 = Cl; **c** R^1 = H, R^2 = Me; **d** R^1 = H, R^2 = MeO; **e** R^1 = Cl, R^2 = Me

Схема 1

Строение полученных соединений **2-4** подтверждено методами ЯМР-спектроскопии и масс-спектрометрии (рис. 2, 3). В спектрах ^{1}H ЯМР соединений **2a-e** присутствуют сигналы протонов формамидной (9.22-9.24 м.д.) и формильной (10.14-10.17 м.д.) групп. В спектрах ^{13}C ЯМР зафиксированы соответствующие сигналы карбонильных углеродов в областях 161.4-162.1 м.д. и 186.5-187.3 м.д. Для монокарбальдегидов **3a-e** наблюдалось исчезновение синглета формамидной группы и смещение сигнала NH-протона с 10.59-10.66 м.д. на 9.52-9.59 м.д. Наличие двух дублетов с малой константой спин-спинового взаимодействия (около 2 Гц) протонов 3-NH и 4-H подтверждает в соединениях **2** селективное формилирование атома азота, соседствующего с арильной группой. Физико-химические свойства полученных структур описаны в работе [15].

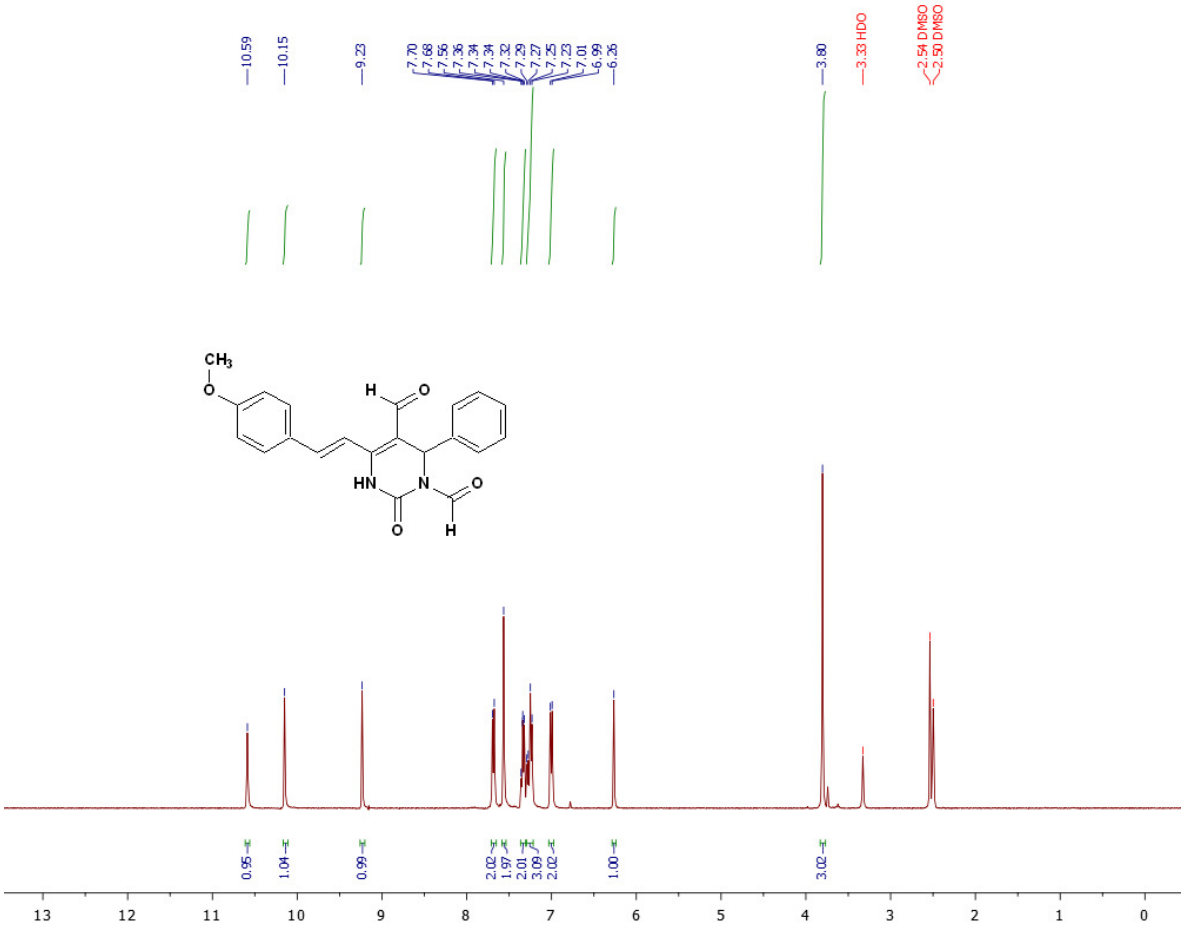


Рис. 2. ^{1}H ЯМР-спектр соединения 2d

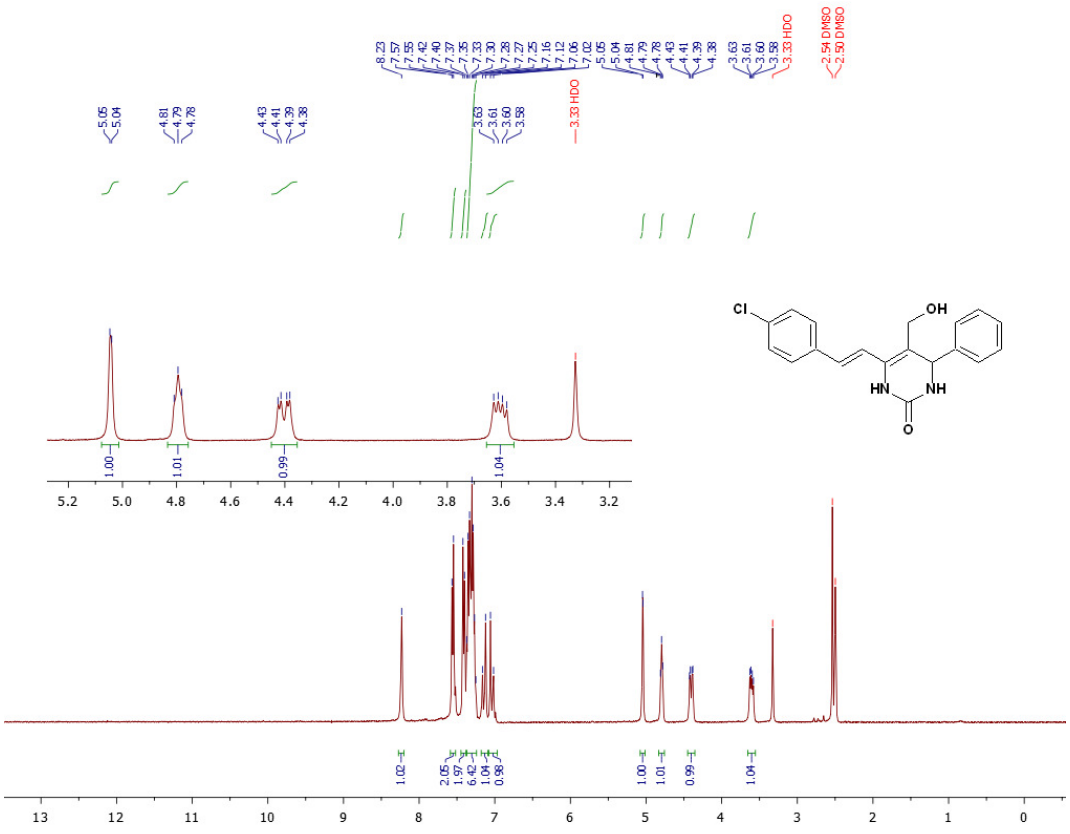


Рис. 3. ^{1}H ЯМР-спектр соединения 4b

Структура монокарбальдегидов была однозначно доказана методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на примере соединения **3c** (рис. 4).

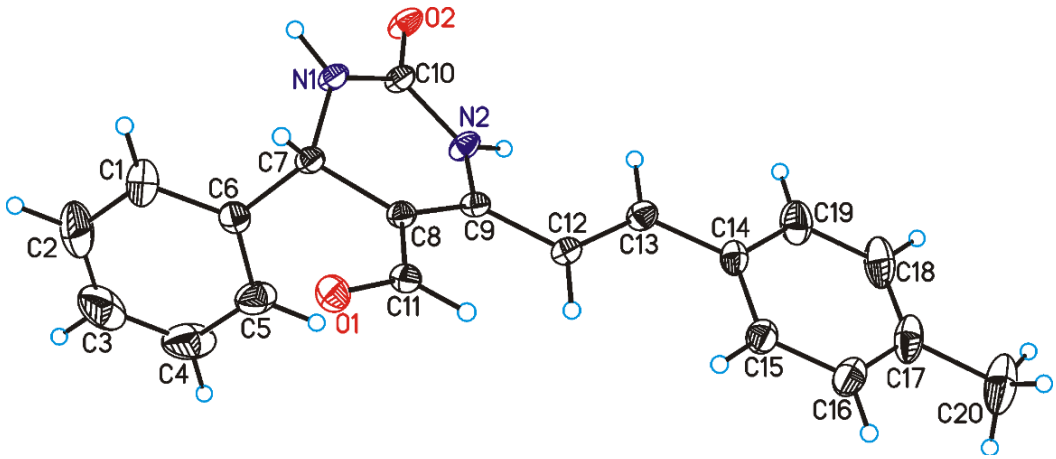


Рис. 4. РСА соединения 3c

В ходе проведенного исследования было установлено, что взаимодействие 6-стирилдигидропиримидинонов с реагентом Вильсмейера-Хаака приводит к образованию соответствующих дикарбальдегидов. Последующая селективная модификация полученных соединений раствором аммиака позволяет синтезировать 4-арил-6-стирилтетрагидропиримидин-5-карбальдегиды. На заключительном этапе восстановление альдегидной группы под действием боргидрида натрия обеспечивает получение 5-гидроксиметильных производных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Synthesis and Antioxidant Activity of Novel Biginelli Adducts with Phenolic Fragments / O.V. Snastina, E.R. Sabitov, V.A. Kuricheva, V.N. Koshelev // Appl. Sci. – 2025. – Vol. 15, № 16. – P. 9152.

2) Biological activity of dihydropyrimidinone (DHPM) derivatives: A systematic review / L.H.S. Matos, F.T. Masson, L.A. Simeoni, M. Homem-de-Mello // Eur. J. Med. Chem. – 2018. – Vol. 143. – P. 1779-1789.

3) Discovery of 3,4-dihydropyrimidin-2(1*H*)-ones as a novel class of potent and selective A2B adenosine receptor antagonists / A. Crespo, A. El Maatougu, P. Biagini, J. Azuaje, A. Coelho, J. Brea, E. Sotelo // ACS Med. Chem. Lett. – 2013. – Vol. 4, № 11. – P. 1031-1036.

4) 2-Styryl-4-aminoquinazoline derivatives as potent DNA-cleavage, p53-activation and in vivo effective anticancer agents / X.W. Wei, J.M. Yuan, W.Y. Huang, N.Y. Chen, X.J. Li, C.X. Pan, G.F. Su // Eur. J. Med. Chem. – 2020. – Vol. 186. – P. 111851.

5) Shen, T. Natural stilbenes: an overview / T. Shen, X.N. Wang, H.X. Lou // Nat. Prod. Rep. – 2009. – Vol. 26, № 7. – P. 916-935.

6) Chalcone: a privileged structure in medicinal chemistry / C. Zhuang, W. Zhang, C. Sheng, W. Zhang, C. Xing, Z. Miao // Chem. Rev. – 2017. – Vol. 117, № 12. – P. 7762-7810.

7) Resveratrol inhibition of herpes simplex virus replication / J.J. Docherty, M.M.H. Fu, B.S. Stiffler, R.J. Limperos, C.M. Pokabla, A.L. DeLucia // Antiviral Res. – 1999. – Vol. 43, № 3. – P. 145-155.

8) Medicinal chemistry of combretastatin A4: present and future directions / G.C. Tron, T. Pirali, G. Sorba, F. Pagliai, S. Busacca, A.A. Genazzani // J. Med. Chem. – 2006. – Vol. 49, № 11. – P. 3033-3044.

9) Gupta, S.C. Therapeutic roles of curcumin: lessons learned from clinical trials / S.C. Gupta, S. Patchva, B.B. Aggarwal // AAPS J. – 2013. – Vol. 15, № 1. – P. 195-218.

10) Turn on» orange fluorescent probe based on styryl-BODIPY for detection of hypochlorite and its application in live cell imaging / S. Jantra, P. Butta, P. Jithavech, P. Rojsitthisak, T. Palaga, P. Rashatasakhon, S. Wacharasindhu // Dyes Pigm. – 2019. – Vol. 162. – P. 189-195.

11) Bokan, M. Drug delivery platform comprising long-wavelength fluorogenic phenolo-cyanine dye for real-time monitoring of drug release / M. Bokan, G. Gellerman, L.D. Patsenker // Dyes Pigm. – 2019. – Vol. 171. – P. 107703.

12) Shutalev, A.D. Simple synthesis of 4-aryl-6-styryl-1,2,3,4-tetrahydropyrimidin-2-ones by the alkaline hydrolysis of Biginelli compounds / A.D. Shutalev, A.N. Aksenov // Mendeleev Commun. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 73-75.

13) Mondal, M.A. Iron (III)-catalyzed selective direct olefination of dihydropyrimidinone with aromatic aldehyde / M.A. Mondal, A.A. Khan, K. Mitra // J. Chem. Sci. – 2018. – Vol. 130, № 11. – P. 151.

14) Synthesis of 6-styryldihydropyrimidinones and 6-styryldihydropyridinones via the respective 6-alkylphosphonates / R. Smits, S. Belyakov, M. Petrova, V. Kozhich, R. Muhamadejev // Chem. Heterocycl. Compd. – 2022. – Vol. 58, № 12. – P. 687-694.

15) Введение функциональных групп в положение 5 6-стирилдигидропиримидинонов / А.М. Урядова, Е.С. Макарова, С.И. Филимонов, Ж.В. Чиркова, К.Ю. Супоницкий // Изв. АН. Сер. хим. – 2025. – Т. 74, № 5. – С. 1421.

УДК 547.781:547.892

СИНТЕЗ *ОРТО*-ДИЦИАНОЗАМЕЩЁННЫХ ДИБЕНЗО[*b,f*]ИМИДАЗО[1,2-*d*][1,4]ОКСАЗЕПИНОВ

А.М. Хабаров, В.В. Бухалин, В.Л. Баклагин

Научный руководитель – **В.Л. Баклагин**, канд. хим. наук, ассистент

Ярославский государственный технический университет

В данной статье предлагается метод синтеза не описанных ранее в литературе дибензо[b,f]имидазо[1,2-d][1,4]оксазепин-6,7-дикарбонитрилов, основанный на реакции нуклеофильного ароматического замещения между 4,5-диарил-2-(2-гидроксифенил)-1Н-имидазолами и 4,5-дихлорфталонитрилом и обеспечивающий выход целевых продуктов до 90%.

Ключевые слова: *имидазо[1,2-d][1,4]оксазепин, нуклеофильное ароматическое замещение, 2,4,5-триарил-1Н-имидазол, 4,5-дихлорфталонитрил*

SYNTHESIS OF *ORTHO*-DICYANOSUBSTITUTED DIBENZO[*b,f*]IMIDAZO[1,2-*d*][1,4]OXAZEPINES

A.M. Khabarov, V.V. Bukhalin, V.L. Baklagin

Scientific Supervisor – **V.L. Baklagin**, Candidate of Chemical Sciences, Assistant

Yaroslavl State Technical University

This paper proposes a method for the synthesis of novel dibenzo[b,f]imidazo[1,2-d][1,4]oxazepine-6,7-dicarbonitriles, based on the nucleophilic aromatic substitution reaction between 4,5-diaryl-2-(2-hydroxyphenyl)-1H-imidazoles and 4,5-dichlorophthalonitrile, that provides the yield of target products up to 90%.

Keywords: *imidazo[1,2-d][1,4]oxazepine, nucleophilic aromatic substitution, 2,4,5-triaryl-1H-imidazole, 4,5-dichlorophthalonitrile*

Одним из актуальных направлений развития медицинской химии является синтез бифармакофорных соединений, содержащих два биологически активных фрагмента [1]. В частности, интерес представляют имидазооксазепины, поскольку известно об обширном спектре биологической активности как имидазолов [2], так и оксазепинов [3]. К настоящему времени известно, что 6,7-дигидробензо[*f*]бензо[4,5]имидазо[1,2-*d*][1,4]оксазепины эффективно ингибируют фермент PI3Kα, участвующий во многих онкологических процессах [4].

В свою очередь, на основе соединений с *орто*-дикарбонитрильным фрагментом получают фталоцианины, которые широко применяются в электронике, а также могут быть использованы в фотодинамической терапии рака [5].

Таким образом, *орто*-дицианозамещённые имидазо[1,2-*d*][1,4]оксазепины являются весьма перспективными соединениями, однако получение подобных структур в литературе не описано. Целью данной работы стала разработка способа их синтеза.

Предлагаемый нами метод основан на реакции нуклеофильного ароматического замещения, по которой ранее был получен ряд 4,5-дигидроимидазо[1,2-*d*][1,4]оксазепинов (рис. 1) [6, 7].

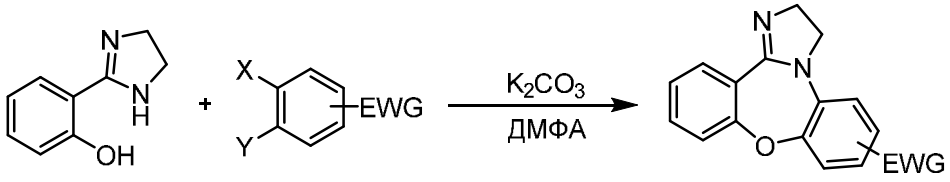


Рис. 1. Схема получения 4,5-дигидроимидазо[1,2-*d*][1,4]оксазепинов:
X, Y = Cl, F, NO_2; EWG = NO_2, CN, CF_3, COOMe, Ac

Развивая данный подход, мы использовали в качестве бинуклеофильных реагентов легкодоступные по реакции Радзишевского 4,5-диарил-2-(2-гидроксифенил)-1*H*-имидазолы **1a-h**, а в качестве электронодефицитного субстрата и источника цианогрупп – 4.5-дихлорфталонитрил, в результате чего получены дибензо[*b,f*]имидазо[1,2-*d*][1,4]оксазепин-6,7-дикарбонитрилы **2a-g** (рис. 2).

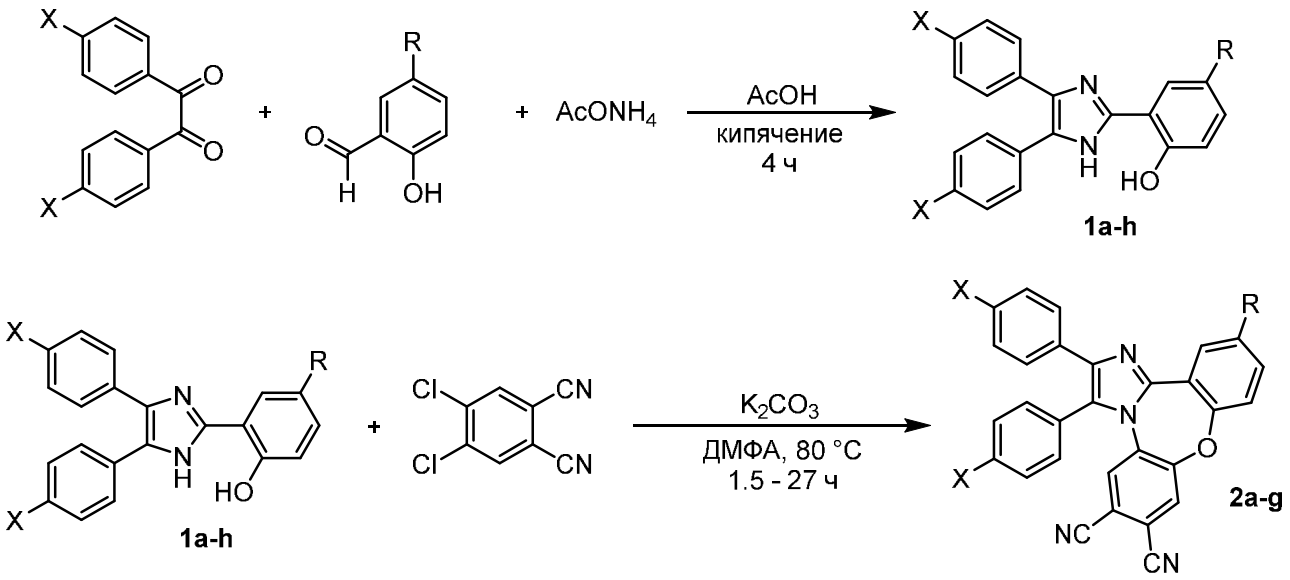


Рис. 2. Схема получения дибензо[*b,f*]имидазо[1,2-*d*][1,4]оксазепин-6,7-дикарбонитрилов:
X = H; R = H (**a**), Me (**b**), Cl (**c**), NO_2 (**d**)
X = Br; R = H (**e**), Me (**f**), Cl (**g**), NO_2 (**h**)

Установлено, что наибольшее влияние на протекание реакции оказывает сильный электроноакцепторный заместитель (NO_2) в *napa*-положении к ОН-группе бинуклеофильного реагента **1d,h**. Так, нитросодержащее соединение **2d** было выделено с низким выходом 25%, а образование продукта **2h** не было зафиксировано. В свою очередь, наличие атомов брома в имидазолах **1e-g** приводило к умеренному снижению выхода целевых дибензо[*b,f*]имидазо[1,2-*d*][1,4]оксазепин-6,7-дикарбонитрилов **2e-g** по сравнению с их небромированными аналогами **2a-c** (табл. 1).

Таблица 1. Выход промежуточных и конечных продуктов

	X	R	Выход **1**, %	Выход **2**, %
a	H	H	78	74
b	H	Me	81	90
c	H	Cl	73	89
d	H	NO_2	66	25
e	Br	H	90	72
f	Br	Me	80	59
g	Br	Cl	76	56
h	Br	NO_2	89	0*

*отсутствует конверсия исходного соединения **1h**

Полученная закономерность согласуется с описанной в литературе схемой реакции нуклеофильного ароматического замещения с участием *O,N*-бинуклеофилов [7]. Так, бинуклеофильный реагент **1a-g** вступает в реакцию более активным *O*-нуклеофильным центром. Далее в ходе внутримолекулярной перегруппировки Смайлса происходит образование спиро-σ-комплекса и его распад с образованием *N*-замещённого фталонитрила,

содержащего новый *O*-нуклеофильный центр, который и осуществляет формирование оксазепинового цикла (рис. 3).

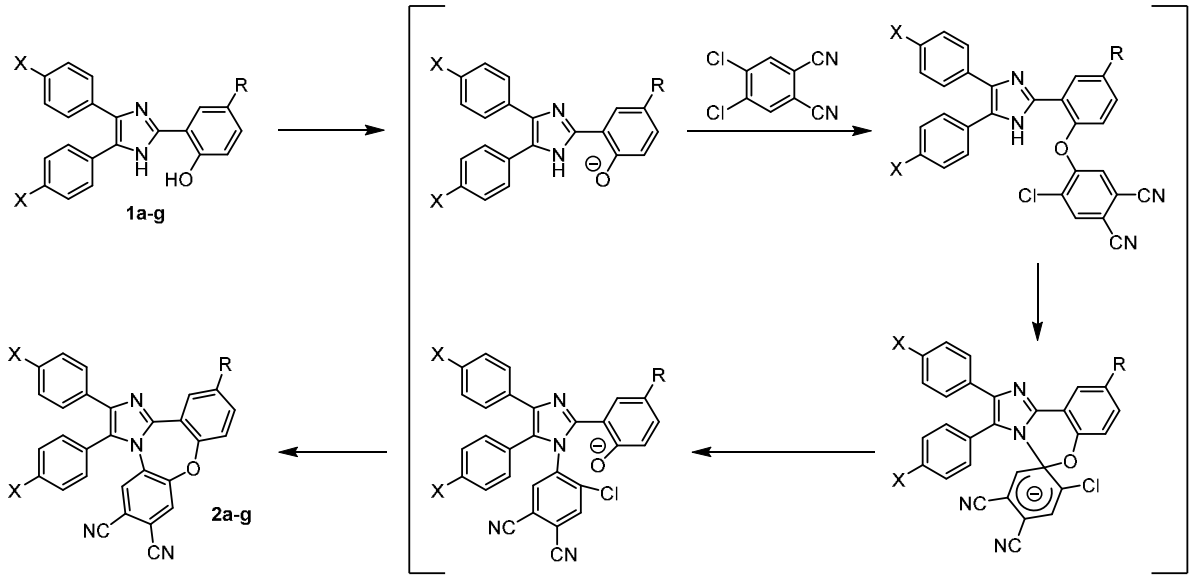


Рис. 3. Схема взаимодействия соединений 1a-g с 4,5-дихлорфталонитрилом

В соответствии с данной схемой наибольшее влияние на ход реакции должна оказывать нуклеофильность промежуточных феноксид-анионов, которая существенно снижается при введении сильной электроноакцепторной группы в *napa*-положение, что и было продемонстрировано в данной работе. В свою очередь, удалённое расположение атомов брома в имидазолах **1e-g** снижает их дезактивирующее влияние на феноксид-анионы.

Таким образом, в данной работе предложен эффективный метод синтеза дибензо[*b,f*]имидазо[1,2-*d*][1,4]оксазепин-6,7-дикарбонитрилов, а также установлена закономерность влияния заместителей на выход целевых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Addanki, A. Molecular docking studies of oxazepine derivatives against cyclooxygenase-2 enzyme as potential anti-inflammatory agents / A. Addanki, R.R. Nadendla // Rasayan Journal of Chemistry. – 2025. – № 1 (18). – P. 508–516.

2) Zheng, X. Synthesis of Imidazole-Based Medicinal Molecules Utilizing the van Leusen Imidazole Synthesis / X. Zheng, Z. Ma, D. Zhang // Pharmaceuticals. – 2020. – № 3 (13). – P. 37–55.

3) Synthesis, Spectroscopic, X-ray Diffraction and DFT Studies of Novel Benzimidazole Fused-1,4-Oxazepines / A.I. Almansour, N. Arumugam, R. Suresh Kumar, S.M. Soliman, M. Altaf, H.A. Ghabbour // Molecules. – 2016. – № 6 (21). – P. 724–738.

4) 6,7-Dihydrobenzo[*f*]benzo[4,5]imidazo[1,2-*d*][1,4]oxazepine derivatives as selective inhibitors of PI3Kα / Y. Yin, Y.Q. Zhang, B. Jin, S. Sha, X. Wu, C.B. Sangani, S.F. Wang, F. Qiao, A.M. Lu, P.C. Lv , H.L. Zhu // Bioorganic & Medicinal Chemistry. – 2015. – № 6 (23). – P. 1231–1240.

5) Синтез и свойства функционально замещенных фталоцианинов: от фотокатализа до фотодинамической терапии / Е.А. Горбунова, Н.Е. Кононенко, Я.Н. Коровкина, Т.В. Дубинина, Е.Р. Милаева // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2024. – № 6 (65). – С. 477–513.

6) Novel monoamine oxidase inhibitors based on the privileged 2-imidazoline molecular framework / A. Shetnev, A. Osipyan, S. Baykov, A. Sapegin, Z. Chirkova, M. Korsakov, A. Petzer, I. Engelbrecht, J.P. Petzer // Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters. – 2019. – № 1 (29). – P. 40–46.

7) Atom-economical construction of tetracyclic [1,4]oxazepines involving intramolecular arylation of a 2-imidazoline moiety / K. Karamysheva, E. Reutskaya, A. Sapegin, M. Dorogov, M. Krasavin // Tetrahedron Letters. – 2015. – № 41 (56). – P. 5632–5636.

Направление 3. НОВЫЕ ПОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 629.3.027.5

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ МОДИФИКАЦИИ РЕЦЕПТУР РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПОТЕРЬ

Ю.А. Бобышкин, В.В. Власов

Научный руководитель – **В.В. Власов**, канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

Проведен комплексный анализ механизма возникновения гистерезисных потерь в боковинах цельнометаллокордных шин, основанный на физическом и химическом свойствах резин. Установлено, что внутренняя диссипация энергии связана с вязкоупругими процессами и особенностями взаимодействия полимерной матрицы с наполнителями, что обусловливает характер тепловыделения при циклических деформациях в зоне боковин.

***Ключевые слова**: автомобильная шина, цельнометаллокордная (ЦМК) шина, гистерезисные потери, термодеструкция*

ANALYSIS OF OPTIONS FOR REDUCING HYSTERESIS LOSSES THAT OCCUR WHEN CAR TIRES ARE MOVING

Yu.A. Bobyshkin, V.V. Vlasov

Scientific Supervisor – **V.V. Vlasov**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

A comprehensive analysis of the mechanism of hysteresis losses in the sidewalls of all-metal cord tires based on the physical and chemical properties of rubber was conducted. It has been established that internal energy dissipation is associated with viscoelastic processes and peculiarities of interaction of the polymer matrix with fillers, which determines the nature of heat release during cyclic deformations in the sidewall zone.

***Keywords:** automobile tire, all-metal cord tire, hysteresis losses, thermodestruction*

Гистерезисные потери в боковинах цельнометаллокордных шин обусловлены внутренним трением и релаксационными процессами в упругом материале при циклических деформациях. Эти потери накапливаются в виде тепла, ухудшая тепловой режим и приводя к ускоренному износу резиновой смеси. Проблема снижения гистерезисных потерь актуальна для повышения экономичности и долговечности шин, особенно учитывая современный рост требований к энергетической эффективности транспортных средств.

В основе возникновения гистерезиса лежат физико-химические механизмы взаимодействия полимерных цепей с наполнителями и химическими модификаторами. Микроструктурные характеристики резины, такие как качество смешения, взаимодействие наполнителей с каучуками и распределение вулканизационных сшивок, определяют величину энергетических потерь при многократных деформациях.

Химическая структура резиновых смесей оказывает фундаментальное влияние на их поведение при механических нагрузках, определяя уровень гистерезисных потерь в боковинах шин. Основные компоненты резиновых смесей, такие как полимерная матрица, наполнители и разнообразные модификаторы, формируют в совокупности упруго-вязкие свойства материала. При этом целенаправленное введение функциональных добавок позволяет улучшить упругость, прочность и термостойкость резины, что непосредственно способствует снижению внутреннего трения и уменьшению гистерезисных потерь во время эксплуатации [1-4].

Полимерная основа шинных резин чаще всего представлена синтетическими каучуками, такими как бутадиен-стирольный и полибутадиеновый. Их взаимодействие с наполнителями задаёт микроструктуру смеси. Кремнекислотные наполнители с большой удельной поверхностью увеличивают вязкость смеси, способствуя более равномерному распределению и укреплению сетки поперечных сшивок. Такая структура повышает модуль упругости и снижает релаксационные потери при циклических деформациях, что минимизирует гистерезисные потери [5, 6]. Использование высокоактивных наполнителей формирует плотную и однородную микроструктуру, которая противостоит концентрациям напряжений, снижая локальное внутреннее трение.

Особое внимание уделяется введению технологических добавок, которые улучшают термостойкость резиновых вулканизатов. Эти добавки стабилизируют свойства при высокотемпературном воздействии и повышенных механических нагрузках за счет образования дополнительных координационных связей, стабилизирующих структуру при высоких температурах, снижая деградацию материала в процессе эксплуатации. Улучшенная термостойкость материалов боковин снижает риск теплового старения.

Нефтеполимерные смолы являются эффективными модификаторами, способствующими увеличению стойкости резины к тепловому старению без ухудшения пласто-эластических и прочностных характеристик. Их интеграция в состав смеси изменяет характер поперечных сшивок, повышая плотность сетки и улучшая распределение наполнителя, что в итоге улучшает упругие свойства и снижает диссипацию энергии. Эти модификаторы особенно важны для улучшения долговечности боковин цельнометаллокордных шин при длительной эксплуатации в изменяющихся климатических и нагрузочных условиях.

Кроме того, модификаторы способствуют повышению адгезии между резиновой смесью и металлокордом, что снижает вероятность возникновения дефектов и расслоений, приводящих к увеличению локальным повреждениям конструкции шины. Улучшение адгезионного взаимодействия способствует равномерному распределению нагрузок, уменьшая неоднородности деформаций в боковине.

Модификаторы влияют на физико-химические механизмы сшивки, условия вулканизации и реологические свойства смесей. Контроль концентрации и соотношения таких добавок позволяет оптимизировать упругое поведение материала, минимизируя внутреннее трение и снижая тепловыделение при циклических деформациях. В результате реализуется комплексный эффект уменьшения гистерезисных потерь, что повышает эффективность и долговечность шинных изделий.

Химические добавки в составе резиновых смесей боковин шин выполняют несколько ключевых функций: повышение термостойкости, улучшение антифрикционных свойств, снижение деградации под воздействием высоких температур, а также повышение упруго-прочностных характеристик и устойчивости к механическим повреждениям. Их правильный подбор и сочетание позволяют не только снизить тепловыделение за счет уменьшения трения внутренней структуры, но и увеличить ресурс материала во время эксплуатации при интенсивных циклических нагрузках [7].

Таким образом, для снижения гистерезисных потерь в боковинах цельнометаллокордных шин требуется комплексный подход, сочетающий фундаментальные исследования физико-химических процессов с прикладными методиками экспериментального контроля и технологической оптимизации материалов. Это позволит сформировать научно обоснованные рекомендации для повышения эффективности работы ЦМК шин в современных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Влияние структуры бутадиен-стирольных каучуков на упруго-гистерезисные свойства протекторных резин / Н.А. Охотина, С.И. Вольфсон, О.А. Кузнецова, Р.В. Карпунин, Е.В. Новикова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №19. – С. 183-185.

2) Соловьев, М.Е. Моделирование серной вулканизации резиновых изделий на основе ненасыщенных каучуков / М.Е. Соловьев, В.В. Власов, А.Б. Раухваргер // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2017. – Т. 3. – С. 81-85.

3) Влияние технологических добавок на технические и адгезионные свойства системы «Шинная резина - полиэфирный корд» / Ж.С. Шашок, А.В. Касперович, Н.Р. Прокопчук, К.В. Вишневский, Н.П. Побединская // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2009. – №4. – С. 137-139.

4) Исследование звукопоглощения шинных резин / А.О.аранец, В.В. Власов, Н.А. Лежнина, М.Е. Соловьев // Каучук и резина. – 2015. – № 1. – С. 30-33.

5) Игуменова, Т.И. Исследование теплообразования при динамическом нагружении резин / Т.И. Игуменова, А.М. Шульга // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – №1 (67). – С. 140-142.

6) Исследование упруго-гистерезисных свойств протекторных шинных резин с кремнекислотными наполнителями / О.А. Кротова, Ж.С. Шашок, Е.П. Усс, А.Ю. Люштык, О.В. Карманова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – № 1 (87). – С. 330-335.

7) Земский, Д.Н. Новые ингредиенты резиновых смесей / Д.Н. Земский, Ю.Н. Чиркова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 12. – С. 143-145.

УДК 667.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ДИСПЕРСИЙ

С.С. Васильева, А.Е. Терешко

Научный руководитель – **А.Е. Терешко**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Стабилизаторы являются неотъемлемой частью рецептуры водо-дисперсионных лакокрасочных материалов. Они не только повышают агрегативную устойчивость материала, но и влияют на свойства из сформированных пленок. В статье рассматривается влияние добавок на физические и физико-механические свойства материалов.

Ключевые слова: *водно-дисперсионные лакокрасочные материалы, водорастворимые полимеры, полимерные дисперсии, агрегативная устойчивость*

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WATER-SOLUBLE POLYMERS ON THE PHYSICAL AND PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF COATINGS BASED ON POLYMER DISPERSIONS

S.S. Vasileva, A.E. Tereshko

Scientific Supervisor – **A.E. Tereshko,** Candidate of Sciences in Chemistry, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

Stabilizers are an integral part of the formulation of water-dispersed paint materials. They not only increase the aggregate stability of the material, but also affect the properties of the formed films. This article examines the impact of additives on the physical and physical-mechanical properties of materials.

Keywords: *water-dispersion paint and varnish materials, water-soluble polymers, polymer dispersions, aggregative stability, physical and physico-mechanical propertie*

Одним из перспективных направлений зелёной химии является получение лакокрасочных материалов на основе водных суспензий. Такие материалы называются водо-дисперсионными (далее ВДЛКМ). Они нетоксичны, не имеют неприятного запаха, легко наносятся на поверхность изделия. Но существенным недостатком является их высокая агрегативная неустойчивость. Для решения данной проблемы вводятся добавки, стабилизаторы, в качестве которых могут быть использованы водорастворимые полимеры. Эти добавки влияют не только на стабильность системы, но и на свойства покрытий исследуемого лакокрасочного материала. В связи с этим целью работы является изучение влияния водорастворимых полимеров на физические и физико-механические свойства покрытий, полученных на основе полимерных дисперсий различной химической природы.

Объектом исследования являются дисперсии полимеров различной химической природы: поливинилацетатная (ПВА ДФ 51/10С), бутадиен-стирольная (DL-950), полиуретановая (U-615) и акриловые (MaincoteHG-86ER, PrimalHG - 98), а также водорастворимые полимеры: полиэтиленгликоль ПЭГ-4000, поливиниловый спирт (ПВС), карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ).

Нами были изучены гидрофильно-гидрофобные свойства материалов, путём измерения краевого угла смачивания полярными (водой) и неполярными (глицерином) жидкостями покрытий из ВДЛКМ. В результате были посчитаны дисперсионная и полярная

составляющие поверхностной энергии и также суммарная поверхностная энергия покрытия. Результаты расчётов представлены на рис. 1-5.

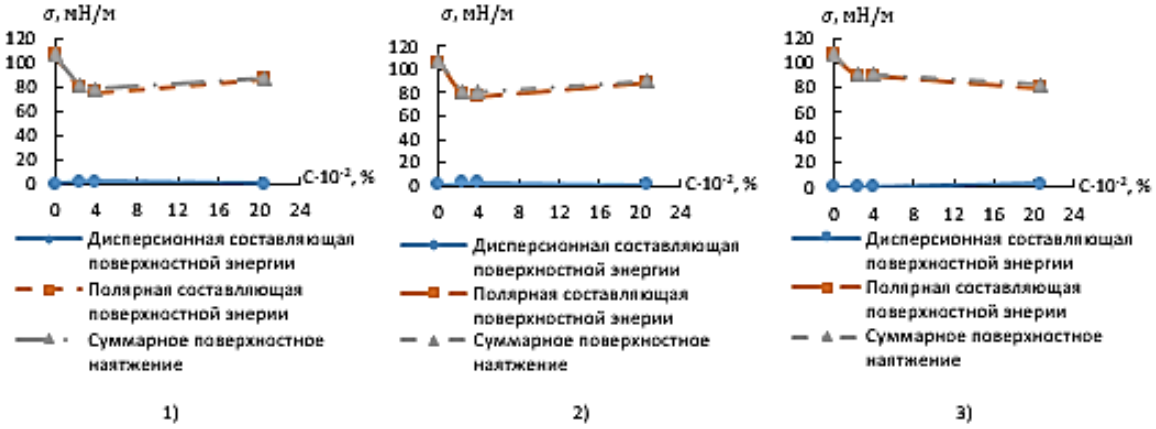


Рис. 1. Зависимость поверхностной энергии пленки дисперсии ПВА ДФ 51/10С от содержания загустителя: 1 – ПЭГ; 2 – ПВС; 3 – КМЦ

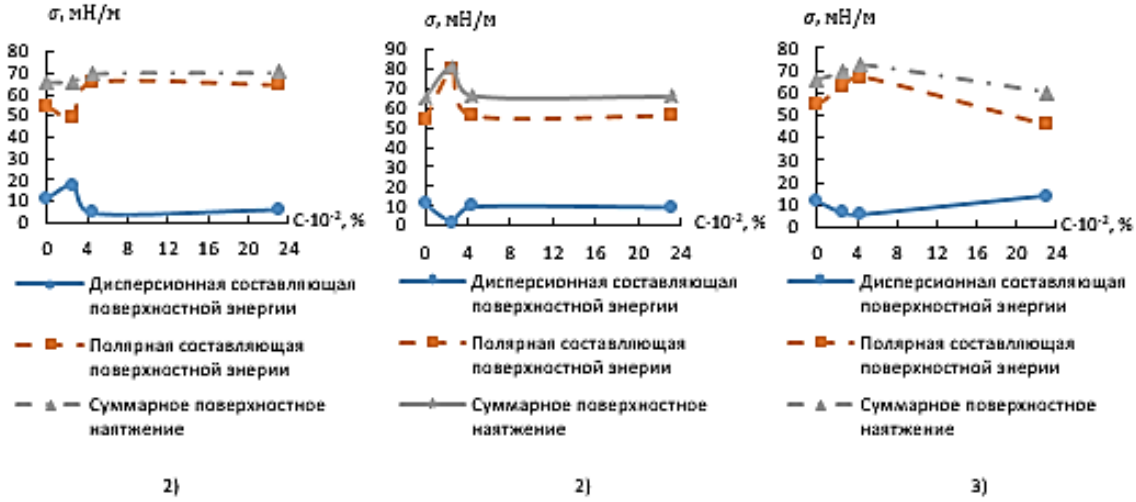


Рис. 2. Зависимость поверхностной энергии пленки дисперсии Primal HG-98 от содержания загустителя: 1 – ПЭГ; 2 – ПВС; 3 – КМЦ

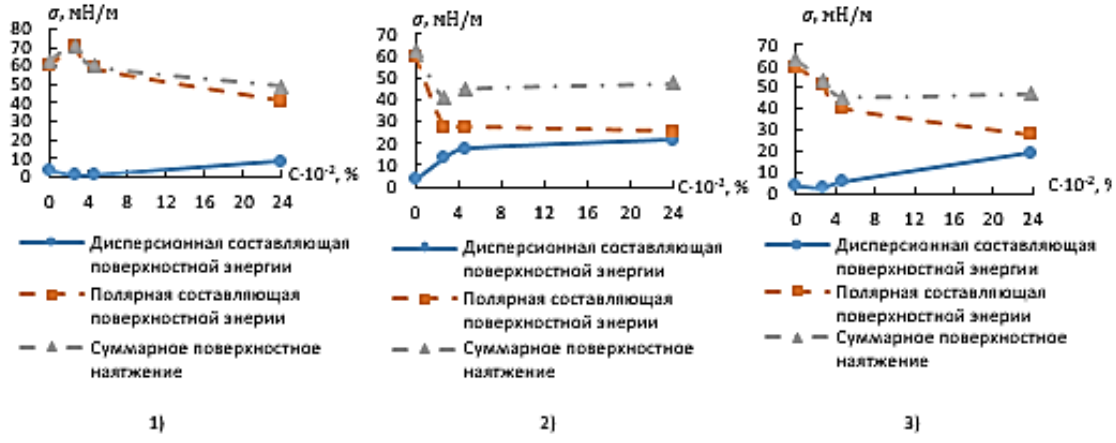


Рис. 3. Зависимость поверхностной энергии пленки дисперсии Maincote HG-86ER от содержания загустителя: 1 – ПЭГ; 2 – ПВС; 3 – КМЦ

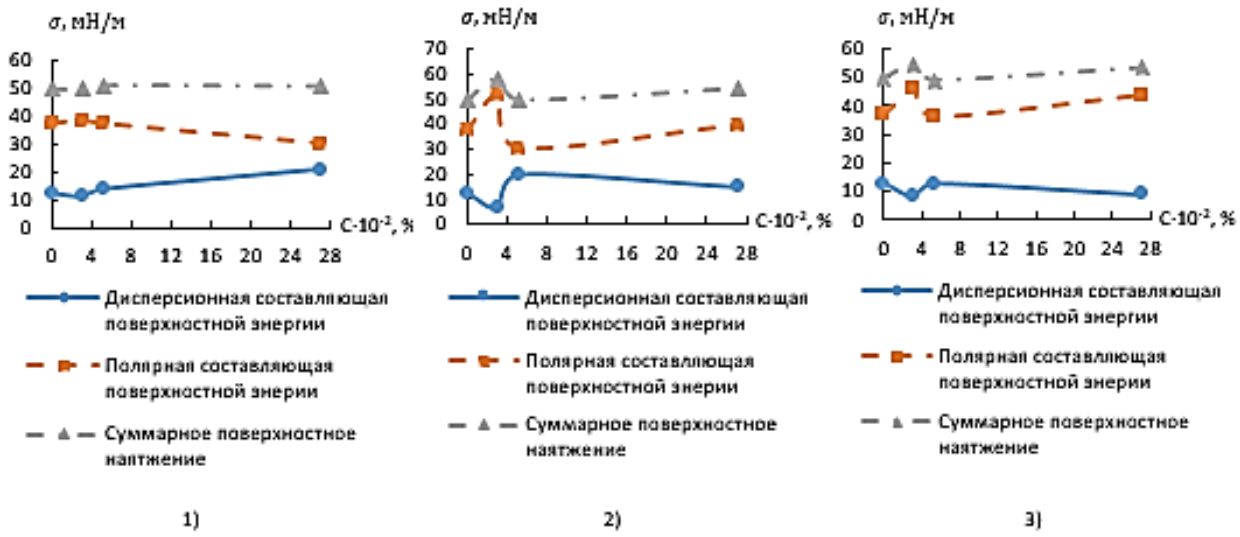


Рис. 4. Зависимость поверхностной энергии пленки дисперсии U-615 от содержания загустителя: 1 – ПЭГ; 2 – ПВС; 3 – КМЦ

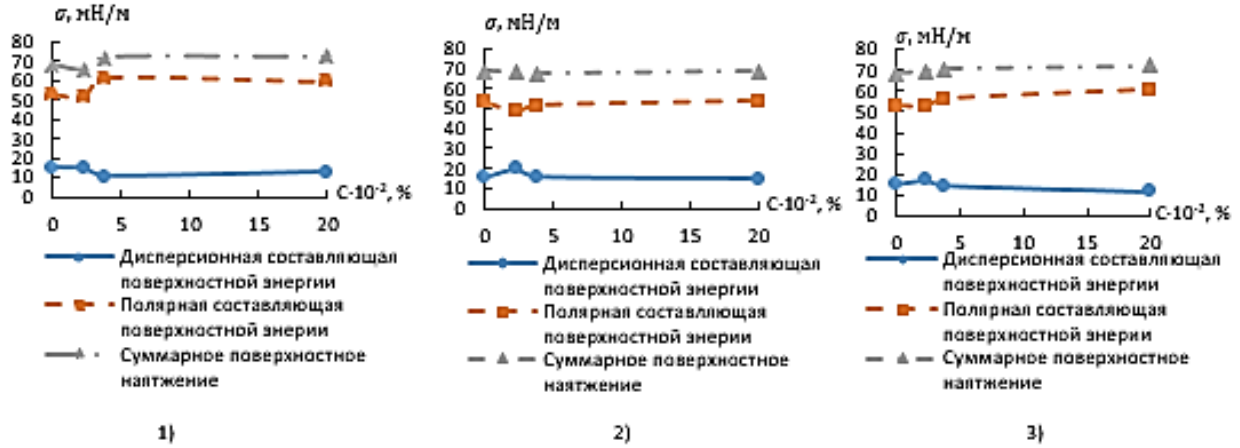


Рис. 5. Зависимость поверхностной энергии пленки дисперсии DL-950 от содержания загустителя: 1 – ПЭГ; 2 – ПВС; 3 – КМЦ

Из графиков видно при введении добавок происходит снижение поверхностной энергии системы за счёт уменьшения значения полярной составляющей. Дисперсионная составляющая поверхностной энергии при этом несколько повышается. Таким образом, установлено, что загустители понижают полярность покрытий, сформированных из полимерных дисперсий, и, следовательно, повышают их гидрофобность из-за меньшей полярности водорастворимых полимеров по сравнению с водой.

Также добавки влияют и на физико-механические свойства покрытий. Несовместимость компонентов дисперсий и стабилизаторов ведёт к образованию крупных агрегатов, снижающих твердость и повышающих хрупкость пленок. Вследствие этого нами было изучено влияние добавок на твёрдость и эластичность покрытий полимерных дисперсий. В процессе исследований было выявлено, что загустители не оказывают влияния на эластичность покрытий.

Влияние загустителей на твердость покрытий представлена на рис. 6-10.

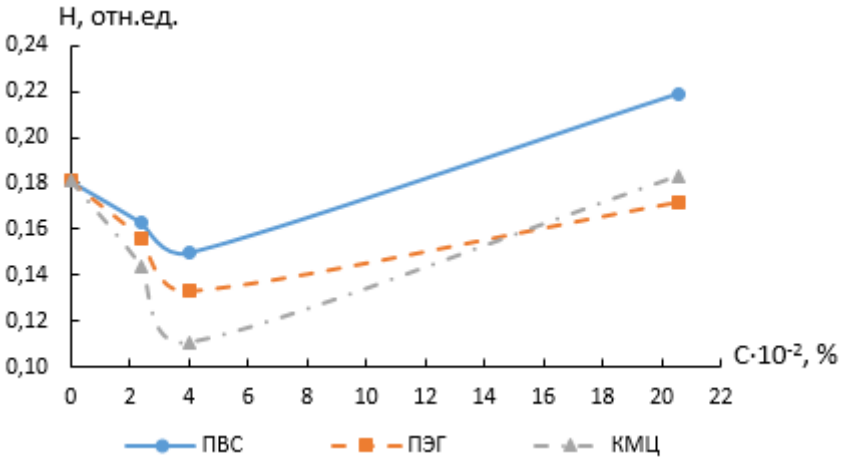


Рис. 6. Зависимость твердости покрытий из ПВА ДФ 51/10С от концентрации загустителей

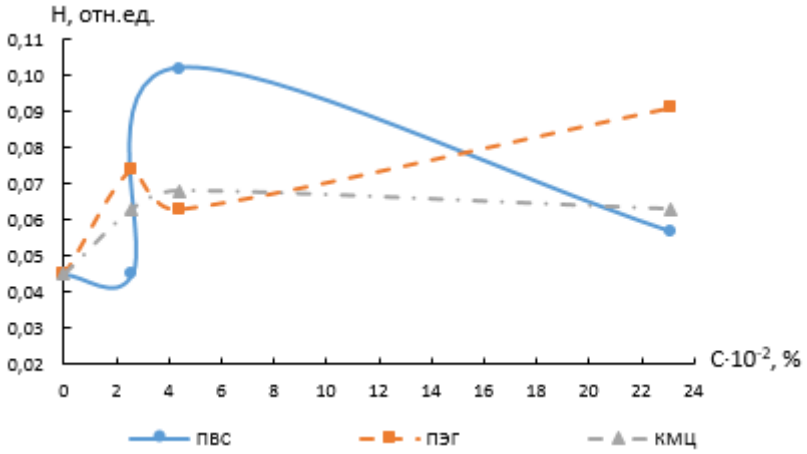


Рис. 7. Зависимость твердости покрытий из Primal HG-98 от концентрации загустителей

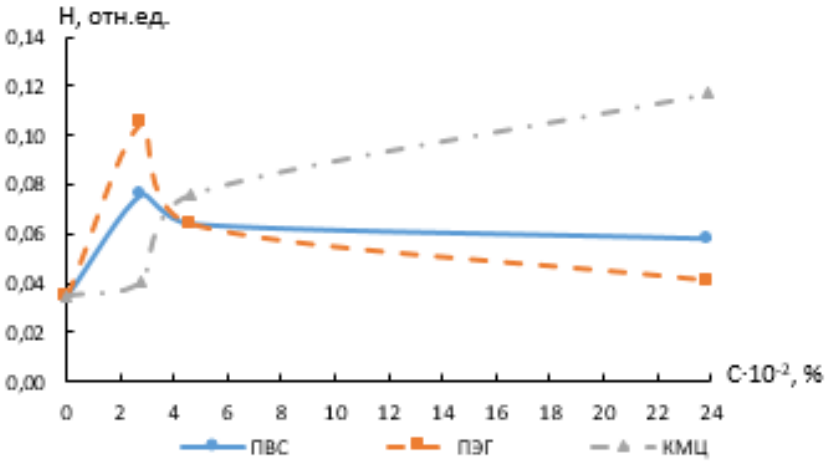


Рис. 8. Зависимость твердости покрытий из Maincote HG-86ER от концентрации загустителей

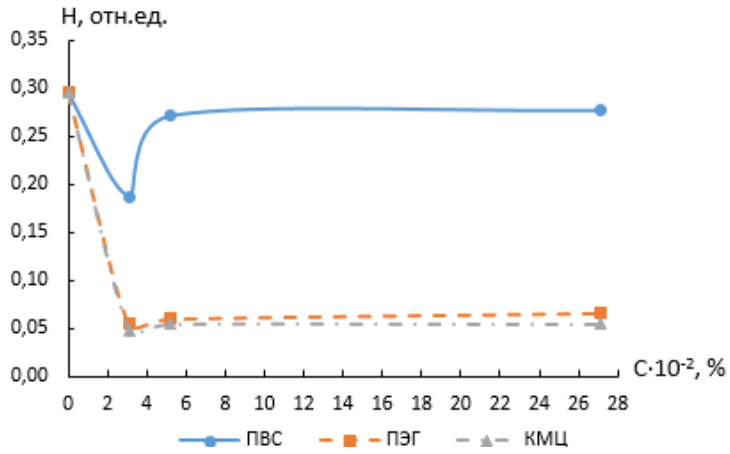


Рис. 9. Зависимость твердости покрытий из U-615 от концентрации загустителей

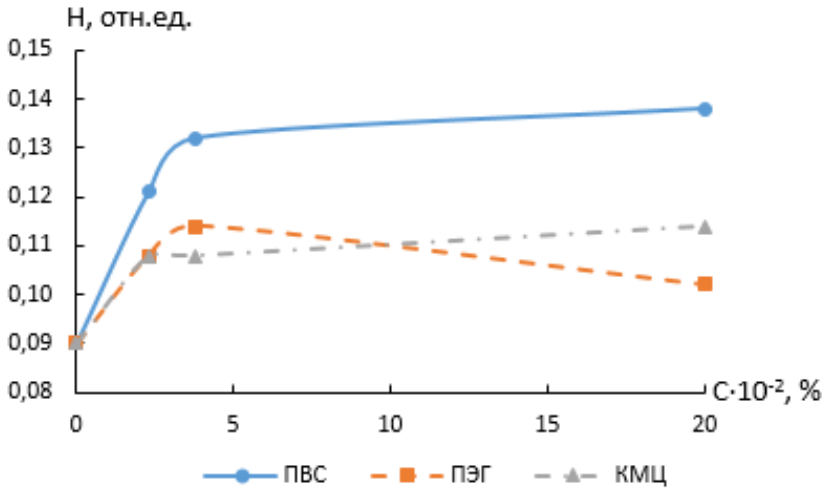


Рис. 10. Зависимость твердости покрытий из DL-950 от концентрации загустителей

При введении малых концентраций загустителей в дисперсию ПВА ДФ 51/10С наблюдается резкое уменьшение твердости, при дальнейшем их добавлении твердость возрастает.

В случае дисперсий Maincote HG-86ER, Primal HG-98 и DL-950, наоборот: при низких концентрациях загустителей наблюдается резкое возрастание твердости, а при дальнейшем добавлении загустителей твердость резко убывает. Однако при введении КМЦ в дисперсии DL-950 и Maincote HG-86ER, ПВС в DL-950 и ПЭГ в Primal HG-98 наблюдается повышение твердости с ростом концентрации загустителей.

На твердость покрытий, сформированных из уретановой дисперсии U-615, загустители оказывают отрицательное влияние, причем особенно сильно твердость понижается при добавлении ПЭГ и КМЦ, что связано с изначально высоким значением твердости полиуретановых покрытий по сравнению с остальными дисперсиями.

Таким образом, можно сделать вывод, что водорастворимые полимеры, используемые в качестве добавок для стабилизации полимерных дисперсий, оказывают существенное влияние на физические и физико-механические свойства покрытий. В зависимости от природы стабилизатора и природы компонентов ВДЛКМ, мы наблюдаем, либо улучшение, либо ухудшение твердости покрытия. Причём важно отметить, эластичность системы не меняется и остаётся на высоком уровне. Гидрофильность систем снижается, а,

следовательно, повышается гидрофобность, что является следствием более низкой полярности водорастворимых полимеров по сравнению с водой. По данным результатам можно дать рекомендации по составлению ВДЛКМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Верхоланцев, В.В. Водные краски на основе синтетических полимеров / В.В. Верхоланцев. – М.: Химия, 1968. – 200 с.

2) Егорова, Е.В. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебное пособие / Е.В. Егорова, Ю.В. Поленов – Иваново: ИГХТУ, 2008. – 83 с.

3) Мюллер, Б. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур / Б. Мюллер, У. Пот. – М.: Пэйнт-Медиа, 2007. – 240 с.

4) Ланге, К.Р. Поверхностно-активные вещества / К.Р. Ланге. – СПб.: Профессия, 2007. – 240 с.

УДК 544.777:615.453.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАТЕКСОВ КАРБОКСИЛСОДЕРЖАЩИХ ПРИВИТЫХ СОПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КИШЕЧНОРАСТВОРИМЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ОБОЛОЧЕК ТАБЛЕТОК

К.В. Величко, Н.О. Куликова, Ю.Н. Локтева

Научный руководитель – **И.С. Коротнева**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассмотрены свойства кишечнорастворимых плёночных оболочек таблеток, сформированных путём нанесения синтезированных латексов привитых карбоксилсодержащих сополимеров. Оценена способность латексов формировать покрытие на таблетках, содержащих метамизол натрия в качестве активной субстанции, способность покрытия предотвращать выделение субстанции в среде, имитирующей желудочный сок, установлено влияние толщины плёночной оболочки на характер высвобождения активной субстанции.

Ключевые слова: *латексы, привитые сополимеры, акриловые сополимеры, пленкообразователь, пленочные оболочки, таблетки, гастрорезистентные покрытия*

APPLICATION OF LATEX CARBOXYL-CONTAINING GRAFT COPOLYMERS FOR THE FORMATION OF ENTERIC FILM COATINGS OF TABLETS

K.V. Velichko, N.O. Kulikova, Yu.N. Lokteva

Scientific Supervisor – **I.S. Korotneva**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This article examines the properties of enteric-coated tablet film coatings obtained by coating latexes of grafted carboxyl-containing copolymers, produced using a proprietary method. The authors assessed the latexes' ability to form a coating on tablets containing metamizole sodium as the active ingredient, the coating's ability to prevent release of the substance in a medium simulating gastric juice, and the effect of film coating thickness on the release pattern of the active ingredient.

Keywords: *emulsion polymerization, graft copolymers, acrylic copolymers, film-forming agent, film coatings, tablets, gastro-resistant coatings*

Пленочные оболочки, наносимые на таблетки, играют важную роль в эффективности препарата. Они улучшают проглатывание таблеток, органолептические свойства, защищают слизистые от разрушающего действия лекарственного вещества и активную фармацевтическую субстанцию от воздействия света, влаги и воздуха, могут обеспечить высвобождение субстанции в определенном отделе желудочно-кишечного тракта. Пленкообразователи на основе акриловых сополимеров для применения в качестве кишечнорастворимых покрытий для российской фармацевтической отрасли являются практически исключительно импортными товарами. Сейчас перед отечественной фармацевтической промышленностью стоит проблема разработки новых составов пленочных покрытий для твердых лекарственных форм. Применяемые в настоящее время пленкообразователи требуют дополнительного введения пластификаторов для улучшения плёнкообразующей способности, эта проблема решается в данной работе путем использования латексов привитых сополимеров, что обеспечивает внутреннюю пластификацию полимерного материала. Целями данной работы является апробация латексов привитых сополимеров в качестве кишечнорастворимых плёночных оболочек таблеток и оценка свойств плёнок в зависимости от состава сополимера и толщины покрытия.

Полимерные дисперсии, известные как латексы, широко используются в различных отраслях промышленности. В качестве полимерной фазы в латексах могут использоваться привитые сополимеры, представляющие собой высокомолекулярные соединения, в которых к основной цепи присоединены боковые цепи или сегменты другого полимера, что позволяет значительно улучшить их механические, термические и химические свойства [2-4].

Объектами исследования являлись латексы с морфологией частиц «ядро-оболочка», синтезированные методом затравочной эмульсионной полимеризации. Латексы получали путём прививки метакриловой кислоты и акрилового сомономера на частицы затравочного латекса диен-акрилового сополимера. Исследованы свойства латексов привитых сополимеров, полученных на основе затравочных латексов с различным составом сополимера (соотношение диен: акрилат 80:20, 85:15, 90:10 мас.ч. соответственно).

Синтезированные латексы апробировались в качестве пленочных покрытий для таблеток. Для этого была получена модельная смесь для таблетирования, в качестве АФС в которой был использован метамизол натрия. Полученные двояковыпуклые круглые таблетки покрывали пленочной оболочкой в коатере. Для покрытия использовали плёнкообразователи с концентрацией латекса акрилового сополимера 10%. В состав покрытия включали краситель тропеолин 00 для лучшего визуального контроля нанесения пленочной оболочки.

При апробации латекса сополимера, полученного на основе затравочного латекса с соотношением диен:акрилат 85:15 мас.ч. получены более качественные покрытия на таблетках. Пленки, сформированные на основе латексов указанных составов, имели гладкую поверхность, однородный цвет, на покрытии отсутствовали сколы и липкость, средняя толщина плёночного покрытия составила 300 мкм.

Двояковыпуклые круглые таблетки-ядра, покрытые пленочной оболочкой на основе синтезированных латексов, тестировали на способность к растворению в соответствии с Государственной Фармакопеей РФ [5]. Целью проведения теста являлось подтверждение гастрорезистентных свойств нанесённой оболочки.

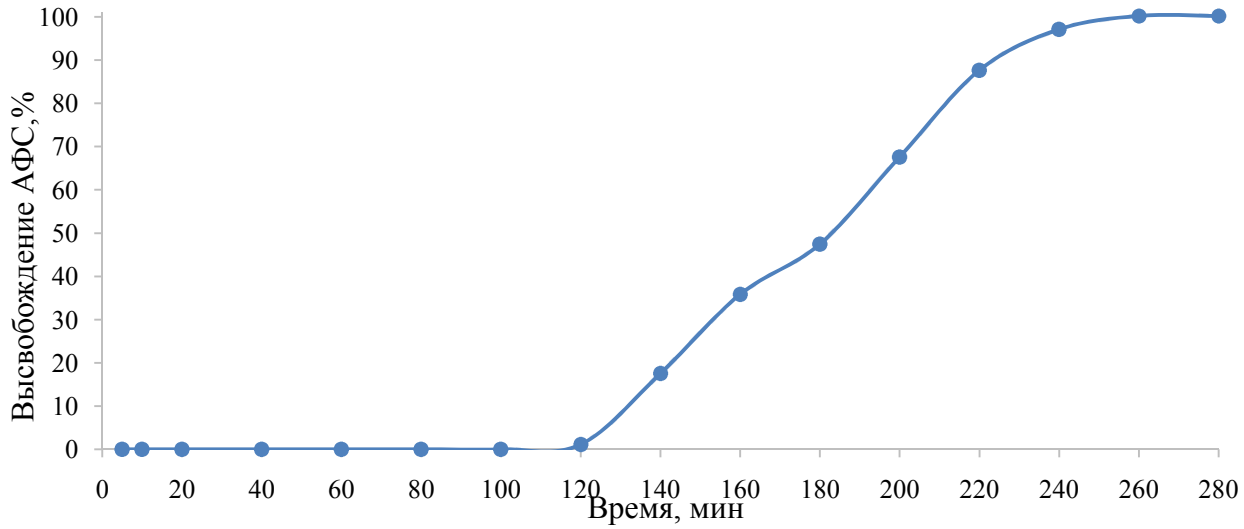


Рис. 1. Профиль высвобождения метамизола натрия из таблеток с плёночной оболочкой толщиной 300 мкм на основе синтезированных латексов

В работе доказана гастрорезистентность пленочных покрытий, полученных на основе синтезированных латексов. Максимальное высвобождение метамизола натрия из таблетки в тесте на растворение в 0,1Н растворе соляной кислоты не превышало 9% в ходе проведения испытания, что соответствует требованиям Фармакопеи.

При растворении в среде, имитирующей желудочный сок, покрытие, полученное на основе латекса карбоксилсодержащего сополимера, синтезированного при соотношении диен:акрилат 90:10 мас.ч. в затравочном латексе, высвобождение АФС составило 1% за 2

часа проведения испытания (рис. 1). Таким образом установлено, что покрытие, полученное на основе этого латекса карбоксилсодержащего сополимера, более эффективно в качестве гастрорезистентной оболочки ТДЛФ.

Установлено, что толщина плёночного покрытия влияет на характер высвобождения активной субстанции из таблеток. При растворении таблеток со средней толщиной покрытия 500 мкм происходило замедление высвобождения активной субстанции в 1,8 раза (рис. 2) по сравнению с таблетками с толщиной покрытия 300 мкм (см. рис.1) в среде, имитирующей кишечник. Замедленный характер высвобождения может быть эффективен при разработке некоторых лекарственных препаратов, требующих поддержания определённой концентрации активной субстанции в крови на протяжении продолжительного времени [1].

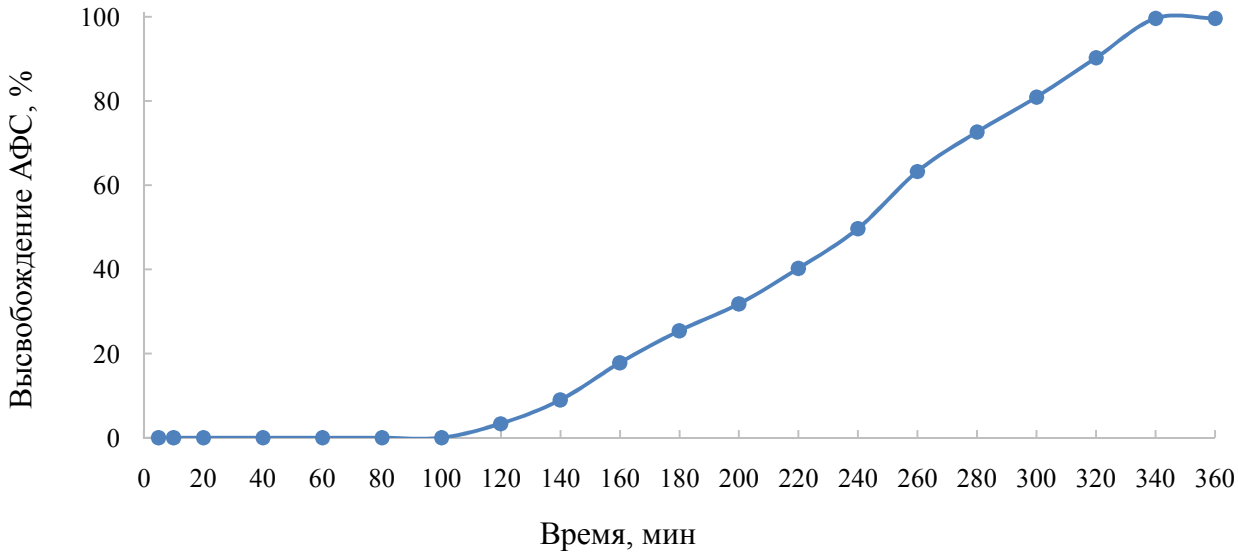


Рис. 2. Профиль высвобождения метамизола натрия из таблеток с толщиной плёночной оболочки 500 мкм

Установлено эффективное высвобождение метамизола натрия из таблеток, покрытых пленочной оболочкой, в растворах, имитирующих среду кишечника. Показана возможность обеспечения пролонгированного эффекта лекарственной формы за счет изменения природы и толщины пленочного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Akhgari, A. Prediction of Optimum Combination of Eudragit RS/Eudragit RL/Ethyl Cellulose Polymeric Free Films Based on Experimental Design for Using as a Coating System for Sustained Release Theophylline Pellets / A. Akhgari, A. Tavakol // Advanced Pharmaceutical Bulletin.– 2016.– Vol. 6, № 2.– P. 219-225.

2) Chumsamrong, P. Preparation, adhesive performance and stability of natural rubber latex grafted with n-butyl acrylate (ba) and methyl methacrylate (mma) / P. Chumsamrong, O. Monprasit // J. Sci. Technol. – 2007. – Вып. 14(3). – URL: www.scientific.net/AMR.47-50.1149.

3) Moolsin, S. Natural rubber modification by vinyl monomers grafting: a review / S. Moolsin, N.K. Robishaw // RJAS.– 2015.– Vol. 5, №1. – P. 99-116.

4) Suppaibulsuk, B. Prasassarakich P. Synthesis of styrene-g-polyisoprene nanoparticles by emulsion polymerization and its effect on properties of polyisoprene composites / B. Suppaibulsuk, G.L. Rampel // Polym. Adv. Technol. – 2011. – Iss. 23(11). – DOI: 10.1002/pat.2069.

5) ОФС 1.4.2.0014.15. Растворение для твердых дозированных лекарственных форм: Министерство здравоохранения Российской Федерации. – М., 2018. – 19 с.

УДК 667.662

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИТРАТА НАТРИЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

А.В. Корсакова, Г.Б. Ануфриева

Научный руководитель – **Г.Б. Ануфриева**, ассистент

Ярославский государственный технический университет

В данной работе магнитные частицы были синтезированы тремя методами совместного осаждения солей железа с и без использования цитрата натрия в качестве поверхностно-активного вещества. Функционализация поверхности магнитных частиц цитратом натрия была изучена с помощью микроскопии. Покрытие магнитных частиц цитратом натрия в одну стадию незначительно снижает их магнитные свойства.

***Ключевые слова**: магнетит, маггемит, цитрат натрия, синтез пигмента*

LOW-TEMPERATURE SYNTHESIS OF MAGNETIC PARTICLES USING SODIUM CITRATE IN THE AIR

A.V. Korsakova, G.B. Anufrieva

Scientific Supervisor – **G.B. Anufrieva**, Assistant

Yaroslavl State Technical University

In this work, magnetic particles were synthesized by three methods of co-precipitation of iron salts with and without the use of sodium citrate as a surfactant. The functionalization of the surface of magnetic particles with sodium citrate was studied using microscopy. One-stage coating the magnetic particles with sodium citrate slightly reduces their magnetic properties.

***Keywords:** magnetite, maghemite, sodium citrate, synthesis of pigment*

Наночастицы магнетита Fe_3O_4 обладают уникальными свойствами, такими как сильный магнетизм, высокая химическая стабильность, низкое воздействие на окружающую среду и высокое отношение поверхности к объёму [1, 4]. Благодаря этим характеристикам они находят широкое применение в промышленности, в частности в производстве лакокрасочных материалов и пигментов. Такие частицы могут использоваться в качестве функциональных наполнителей для создания магнитных лакокрасочных покрытий, а также для разработки специальных пигментов с регулируемыми оптическими и магнитными свойствами [1, 5]. Кроме того, они применимы в составе композитных материалов, где требуется сочетание декоративных и функциональных характеристик, при производстве защитных маркировок и элементов антифальсификационной защиты, например в полиграфии, а также для создания покрытий с особыми эксплуатационными свойствами, такими как электромагнитное экранирование или терморегуляция.

Среди различных методов синтеза магнитных частиц соосаждение является удобным и простым способом получения частиц из водных растворов солей железа [1]. Его ключевые преимущества заключаются в том, что не требуется использование сложных прекурсоров, проводится при сравнительно низких температурах (до 100 °C), исключает применение токсичных органических растворителей, легко масштабируется для промышленного производства и позволяет контролировать размер и свойства частиц за счёт варьирования условий синтеза.

Немодифицированные магнитные частицы склонны объединяться в кластеры и агломерировать, что существенно ограничивает их практическое применение в лакокрасочной промышленности [2]. Агломераты ухудшают дисперсность пигментов,

снижают равномерность покрытия и могут приводить к дефектам поверхности. Модификация поверхности магнитных частиц позволяет увеличить их стабильность в различных средах, включая водные и органические дисперсии, предотвратить агрегацию между частицами, повысить совместимость с компонентами лакокрасочных материалов и обеспечить равномерное распределение частиц в объёме покрытия [3].

Целью данной работы является синтез магнитных частиц с использованием цитрата натрия в качестве стабилизирующего агента для предотвращения их агломерации, а также исследование влияния цитрата натрия на магнитные и оптические свойства полученных частиц. Особое внимание уделяется оценке пригодности синтезированных материалов для применения в составе функциональных лакокрасочных покрытий и специальных пигментов.

Реагенты: гидроксид натрия (NaOH, 5N), гексагидрат хлорида железа(III) ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$), гептагидрат сульфата железа(II) ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), цитрат натрия ($Na_3C_6H_5O_7$, 1 %-ный раствор), деионизированная вода (H_2O).

В работе исследованы три способа получения магнитных частиц с различной стратегией стабилизации цитратом натрия. Важной особенностью данной работы является проведение синтеза в воздушной среде, что отличает ее от традиционных методик, требующих использования инертной атмосферы (аргон, азот) для предотвращения окисления ионов Fe^{2+} [1].

Для методики 1 (базовый синтез без стабилизатора) растворы солей железа помещали в трёхгорлую колбу, установленную на верхнеприводной мешалке. Содержимое колбы нагревали до температуры (60±5) °C при перемешивании со скоростью 300 об/мин. При достижении заданной температуры скорость перемешивания увеличивали до 550 об/мин и тонкой струйкой вводили раствор NaOH (5 N) до достижения уровня pH > 11. При этом наблюдалось почернение раствора, что свидетельствовало об образовании магнетита. Нагрев продолжали в течение 2-х часов при постоянном перемешивании. Процесс синтеза можно описать следующим уравнением реакции:

$$2FeCl_3 + FeSO_4 + 8NaOH \rightarrow Fe_3O_4(тв.) + 6NaCl + Na_2SO_4 + 4H_2O$$

По завершении синтеза раствор декантировали и промывали порошки деионизованной водой. Процедуру промывки повторяли до достижения нейтрального pH. Порошки осаждали с помощью внешнего магнитного поля и сушили в вакуумном шкафу при температуре 60 °C в течение 6 часов.

Методика 2 (одностадийный синтез с предварительным введением цитрата натрия) отличалась тем, что в трёхгорлую колбу с растворами солей железа, установленную на верхнеприводной мешалке, предварительно вводили раствор цитрата натрия. Далее смесь нагревали до (60±1) °C при перемешивании со скоростью 300 об/мин. При достижении заданной температуры скорость перемешивания увеличивали до 550 об/мин, после чего тонкой струйкой добавляли раствор NaOH (5 N) до уровня pH > 11, наблюдая почернение раствора (образование магнетита). Нагрев продолжали в течение 2-х часов при постоянном перемешивании. По завершении синтеза проводили декантацию и промывку порошков деионизованной водой до нейтрального pH. Осаждение порошков осуществляли с помощью внешнего магнитного поля, а сушку — в вакуумном шкафу при 60 °C в течение 6 часов.

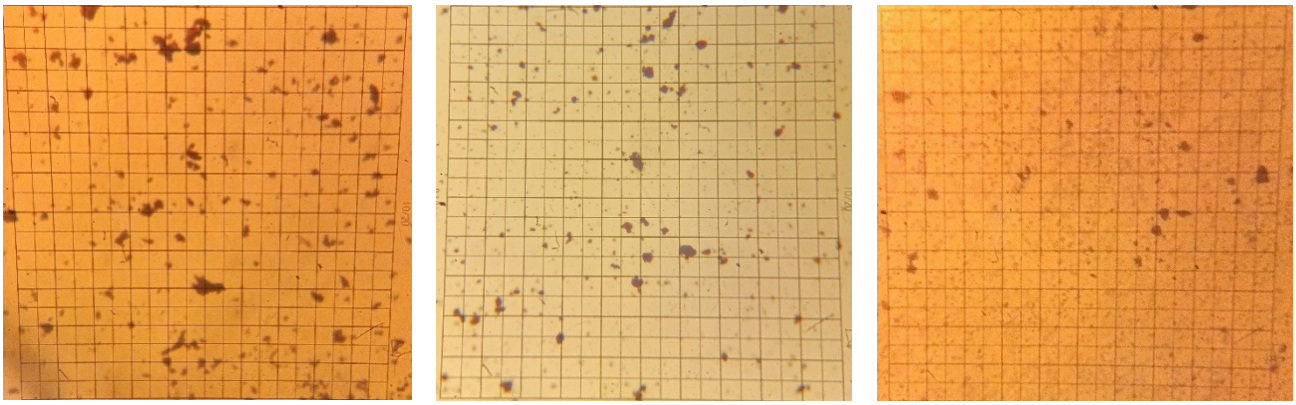
Методика 3 (двухстадийный синтез с постстабилизацией цитратом натрия) выполнялась аналогично методике 1 до этапа промывки. После декантации и промывки до pH = 8 к раствору магнитных частиц добавляли 1 %-ный раствор цитрата натрия. Смесь перемешивали со скоростью 500 об/мин в течение 1 часа при температуре (50±5) °C для обеспечения адсорбции цитрата на поверхности частиц. Затем раствор декантировали и отмывали остатки солей до достижения pH = 7. Завершающим этапом являлась сушка порошков в вакуумном шкафу при температуре 60 °C в течение 6 часов.

Во всех методиках контроль pH осуществляли с использованием pH-метра, температуру поддерживали с помощью термостатируемой бани, а скорость перемешивания регулировали на верхнеприводной мешалке. Для осаждения частиц применяли постоянный магнит с напряжённостью поля не менее 0,5 Тл.

Таблица 1. Результаты исследования образцов магнитных частиц

Свойства \ Образцы	МЧ без стабилизатора	МЧ с $Na_3C_6H_5O_7$ одностадийный	МЧ с $Na_3C_6H_5O_7$ двухстадийный
Намагниченность	0,1722	0,1598	0,1728
pH	6,3	7,1	6,5
Чернота	59,38	58,04	51,33

Анализ намагниченности показал, что функционализация поверхности цитратом натрия приводит к незначительному снижению максимум на 7,2% для одностадийного метода. При этом образец с двухстадийной стабилизацией даже немного превзошел по намагниченности базовый образец. Значения pH образцов варьировались от 6,3 до 7,1, причем наибольшее повышение отмечено для образца с одностадийным введением цитрата, что может быть связано с диссоциацией цитратных групп. По параметру «чернота» наибольшее снижение зафиксировано для двухстадийного метода синтеза. Это, вероятно, обусловлено формированием более плотной цитратной оболочки, влияющей на оптическое поглощение [3].



1 2 3

Рис. 1. Микроскопия образцов магнитных частиц, размер ячейки 30х30:
1 – МЧ без стабилизатора в проходящем свете;
2 – МЧ с $Na_3C_6H_5O_7$ одностадийный в проходящем свете;
3 – МЧ с $Na_3C_6H_5O_7$ двухстадийный в проходящем свете

Микрофотографии подтвердили влияние цитрата на дисперсность частиц. В образце без стабилизатора наблюдалась выраженная агломерация, тогда как образцы с цитратом демонстрировали более равномерное распределение частиц. При этом двухстадийная стабилизация обеспечила лучшую дисперсность: цитрат адсорбировался уже после формирования ядра магнетита, эффективно препятствуя слипанию частиц [4, 5].

В работе были синтезированы магнитные частицы с использованием цитрата натрия в качестве поверхностно-активного вещества методом соосаждения. Цитрат натрия доказал свою эффективность в предотвращении агломерации магнитных частиц. Двухстадийный метод синтеза позволил достичь оптимального сочетания дисперсности и магнитных свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Formation pathways of magnetite nanoparticles by coprecipitation method / T. Ahn, J.H. Kim, H.M. Yang, J.W. Lee, J.D. Kim // The journal of physical chemistry C. –2012. – Vol. 116, № 10. – P. 6069-6076.

2) Superparamagnetic nanoclusters coated with oleic acid bilayers for stabilization of emulsions of water and oil at low concentration / D.R. Ingram, C. Kotsmar, K.Y. Yoon, S. Shao, C. Hu, S.L. Bryant, K.P. Johnston //Journal of colloid and interface science. – 2010. – Vol. 351, № 1. – P. 225-232.

3) Rapid adsorption of heavy metals by Fe3O4/talc nanocomposite and optimization study using response surface methodology / K. Kalantari, M.B. Ahmad, H.R.F. Masoumi, K. Shameli, M. Basri, R. Khandanlou //International journal of molecular sciences. – 2014. – Vol. 15, № 7. – P. 12913-12927.

4) Petcharoen, K. Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical coprecipitation method / K. Petcharoen, A. Sirivat // Materials Science and Engineering: B. – 2012. – Vol. 177, № 5. – P. 421-427.

5) Innovative synthesis of citrate coated superparamagnetic Fe3O4 nanoparticles and its preliminary applications / S. Srivastava, R. Awasthi, N.S. Gajbhiye, V. Agarwal, A. Singh, A. Yadav, R.K. Gupta // Journal of colloid and interface science. – 2011. – Vol. 359, № 1. – P. 104-111.

6) Teja, A.S. Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles / A.S. Teja, P.Y. Koh // Progress in crystal growth and characterization of materials. – 2009. – Vol. 55, № 1-2. – P. 22-45.

УДК 668.6

ВЛИЯНИЕ ПИГМЕНТА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ОТХОДА, НА СТЕПЕНЬ СШИВКИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Я.В. Кудрявцев, А.Е. Терешко

Научный руководитель – **А.Е. Терешко**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Проанализировано влияние различных пигментов на степень сшивки органических пленкообразователей различной химической природы путем определения выхода трехмера с помощью прибора Сокслет

Ключевые слова: *железооксидные пигменты, степень сшивки, прибор Сокслет, выход трехмера, пленкообразователи*

INFLUENCE OF PIGMENT OBTAINED FROM WASTE ON THE DEGREE OF CROSSLINKING OF POLYMER COATINGS

Y.V. Kudryavtsev, A.E. Tereshko

Scientific Supervisor – **A.E. Tereshko**, Candidate of Chemical, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The influence of various pigments on the degree of crosslinking of organic film-formers of different chemical nature was analyzed by determining the three-dimensional network yield using a Soxhlet apparatus.

Keywords: *iron oxide pigments, degree of crosslinking, Soxhlet apparatus, three-dimensional network yield, film-formers*

Пигменты в полимерных покрытиях не только определяют цвет и укрывистость, но и активно влияют на процесс отверждения: их поверхность может адсорбировать отвердители или катализировать побочные реакции. Это изменяет степень сшивки полимерной матрицы, а следовательно — химическую стойкость, твёрдость и барьерные свойства покрытия. Без количественной оценки сшивки трудно отличить влияние пигмента от других факторов.

Одним из методов такой оценки является определение выхода гель-фракции (трехмера) с помощью аппарата Сокслет [1]. Экстракция горячим растворителем удаляет несшитые цепи, а остаток соответствует химически связанной сетке. Это позволяет выявить ингибирующее или деструктивное действие пигмента, оценить долю полимера, связанного с частицами пигмента, и установить связь между степенью сшивки и эксплуатационными характеристиками.

Цель работы – исследовать влияние природы и степени наполнения пигмента на выход гель-фракции покрытий (метод Сокслета).

Для эксперимента были подготовлены образцы лакокрасочных покрытий на основе двух типов связующих: алкидного лака ПФ-060 (ТУ 2311-041-56041689-2006) и эпоксидной смолы ЭД-20 (ТУ 2225-154-05011907-97). Для пигментирования полимерной матрицы использовались красные железооксидные пигменты (КЖОП) различных производителей: КЖОП Казахстанского производства (Пигмент 1), КЖОП Ярославского производства и КЖОП (Пигмент 2), полученный в лабораторных условиях кафедры ХТВМ ЯГТУ из гранулированного оксида железа (Пигмент 3) [2].

По результатам эксперимента была проведена оценка выхода трехмера, выраженного в процентах в перечете на сухое вещество. Данные представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Выход трехмера в покрытиях на основе связующего ПФ-060

Пигмент	Пигмент 1				Пигмент 2				Пигмент 3			
Степень наполнения, %	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50
Выход трехмера, %	73,07	75,47	79,57	80,93	94,52	93,22	95,62	92,89	97,77	98,83	97,39	93,40

Таблица 2. Выход трехмера в покрытиях на основе связующего ЭД-20

Пигмент	Пигмент 1				Пигмент 2				Пигмент 3			
Степень наполнения, %	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50
Выход трехмера, %	94,03	94,46	97,40	-	96,13	96,28	99,27	99,25	88,01	86,53	89,36	86,05

Выход трехмера для ненаполненных покрытий составил 71,39% для лака ПФ-060 и 92,79% для смолы ЭД-20

В алкидном связующем (ПФ-060) все три пигмента повышают выход трехмера по сравнению с ненаполненным покрытием. Это указывает на то, что поверхность железооксидных пигментов катализирует окислительную полимеризацию алкидной смолы, увеличивая степень сшивки.

В эпоксидном связующем (ЭД-20) пигменты 1 и 2 также повышают сшивку, но пигмент 3, напротив, снижает выход трёхмера. Это может свидетельствовать о его ингибирующем действии на процесс отверждения эпоксидной смолы. Однако несколько заниженный показатель выход трехмера для пигмента 3 может рассматриваться как преимущество в тех случаях, когда требуется предсказуемое и равномерное структурирование покрытия без сильного увеличения сшивки, что позволяет избежать излишней хрупкости или внутренних напряжений в толстом слое.

С увеличением степени наполнения в большинстве случаев наблюдается рост выхода трехмера. При этом динамика проходит через максимум при степени наполнения 30-40%, что связано, вероятно, с некоторым превышением уровня критической объемной концентрации пигмента в покрытии.

В результате проведенных исследований можно заключить, что пигмент, полученный из отхода металлургического производства, оказывает положительное влияние на выход трехмера в среде алкидного связующего (ПФ-060). При этом максимальное значение параметра достигается при минимальной степени наполнения, снижаясь с ее ростом. Для прочих пигментов наблюдается обратная динамика – с ростом степени наполнения выход трехмера увеличивается.

Применение пигмента 3 в составе эпоксидных материалов имеет некоторые ограничения, связанные с относительно низкой степенью сшивки, в сравнении с синтетическими аналогами. При этом степень сшивки ненаполненного материала несколько выше, чем у наполненного пигментом, полученного из отхода, что может позволить получить эпоксидные покрытия с повышенной эластичностью.

Таким образом, пигмент, полученный из железосодержащего отхода, демонстрирует гибкое поведение в составе пленкообразователей различной химической природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ Р 56782-2015. Композиты полимерные. Препреги. Определение содержания компонентов препрега экстракцией по Сокслету.

2) Кудрявцев, Я.В. Лакокрасочные материалы на основе железооксидных пигментов, полученных из отходов металлургического производства / Я.В. Кудрявцев, А.Е. Терешко // Олигомеры-2024: сборник трудов XX Международной конференции по химии и физикохимии олигомеров: Тезисы докладов. Т. 2. – Черноголовка: ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 2024. – С. 96.

УДК 616.31:004.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Д. Д. Орандаренко, Е.А. Касьянова

Научный руководитель – **Д.А. Русанова**, канд. мед. наук, ассистент

Ярославский государственный медицинский университет

Был проведён аналитический обзор и структурный анализ данных зарубежных и отечественных электронных ресурсов, обозревающих внедрения систем искусственного интеллекта в практику врача-стоматолога, их точность, скорость и обучение. Несмотря на впечатляющие результаты в контролируемых исследованиях, реальная производительность ИИ в клинической практике изучена недостаточно. Значительная гетерогенность между исследованиями (I^2 до 98% для чувствительности и 87% для специфичности) указывает на необходимость стандартизации протоколов валидации.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, диагностические изображения, предикторы*

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR ANALYSIS OF DENTAL DATA AND DIAGNOSTIC IMAGES

D.D. Orandarenko, E.A. Kasyanova

Scientific Supervisor – **D.A. Rusanova**, Candidate of Medical Sciences, Assistant

Yaroslavl State Medical University

An analytical review and structural analysis of data from foreign and domestic electronic resources examining the implementation of artificial intelligence systems in dental practice, their accuracy, speed, and training was conducted. Despite impressive results in controlled studies, the real-world performance of AI in clinical practice has not been sufficiently studied. Significant heterogeneity between studies (I^2 up to 98% for sensitivity and 87% for specificity) indicates the need for standardization of validation protocols.

Keywords: *artificial intelligence, diagnostic images, predictors*

Введение: Распространенность стоматологической патологии среди пациентов молодого возраста достигает 97-99%, а среди детского населения 33-67%.

Компьютерный скрининг стоматологической патологии позволяет:

- выявить скрытые очаги деминерализации, трещины корня зуба и др. на ранних стадиях развития;
- повысить точность диагностики и исключить «человеческий фактор»;
- спланировать ортодонтическое лечение, дентальную имплантацию и последующее протезирование;
- наблюдать за динамикой стоматологических заболеваний (например, восстановление очагов резорбции костной ткани после эндодонтического или пародонтологического лечения) [7].

Цель исследования: Рассмотреть основные направления искусственный интеллект в стоматологии и на основе статистических данных и результатов клинических исследований (отчеты КЛКТ) проанализировать эффективность искусственный интеллект систем.

Материалы и методы: проведён аналитический обзор и структурный анализ данных зарубежных и отечественных электронных ресурсов, обозревающих внедрения систем искусственного интеллекта в практику врача-стоматолога, их точность, скорость и обучение.

Результаты и обсуждение: Лучевая диагностика остаётся наиболее зрелой областью применения ИИ. Российская коммерческая система Diagnocat, прошедшая клиническую валидацию в 2025 году, продемонстрировала впечатляющие результаты при анализе КЛКТ-

снимков. В исследовании с участием 147 сканов (4704 позиций зубов) точность выявления отдельных стоматологических признаков на уровне зуба превысила 99%. Чувствительность составила 99,3% для отсутствующих зубов и 99,0% для эндодонтически леченых зубов. Однако исследователи подчёркивают важный нюанс: при анализе полного отчёта по всем зубам (full-mouth report) идеальное совпадение с эталоном достигалось только в 82,3% случаев. [8] Ошибки возникали преимущественно в зубах с множественными артефактами, что указывает на необходимость использования ИИ как ассистивного, а не полностью автономного инструмента [2].

Перспективным направлением является использование ИИ для анализа фотографий полости рта, полученных пациентом самостоятельно. Исследование, в котором CNN обучалась на датасете из 5000 изображений, показало, что ИИ правильно идентифицирует патологии в 81,11% случаев, что практически идентично результатам 51 практикующего стоматолога (82,09%). Статистический анализ не выявил значимых различий между группами ($p = 0,63$), подтверждая гипотезу о сопоставимости диагностической точности ИИ и человека. При этом модель продемонстрировала способность выявлять как минимум одну патологию в 94,99% случаев, что открывает возможности для скрининговых телемедицинских приложений [3].

Возможность предсказывать развитие заболеваний до появления клинических симптомов – одно из ключевых преимуществ ИИ. Японское исследование с участием 284 пациентов оценило способность модели машинного обучения прогнозировать увеличение индекса КПУ (кариес-пломба-удалённый зуб) через 5 лет. Корреляция между прогнозируемым и фактическим приростом составила 0,802, чувствительность модели достигла 1,00 , специфичность — 0,77. Это означает, что модель успешно идентифицирует всех пациентов, у которых действительно разовьётся кариес, хотя и даёт некоторое количество ложноположительных срабатываний [1]. Особого внимания заслуживает применение ИИ для раннего выявления и прогнозирования злокачественных новообразований полости рта. Мета-анализ исследований по выявлению плоскоклеточного рака полости рта (oral squamous cell carcinoma, OSCC) показал обобщённую чувствительность 92% и специфичность 91,9%, хотя отмечается значительная гетерогенность между исследованиями ($I^2 = 78\%$) [5].

Российское исследование с участием 3701 пациента (10–18 лет) показало, что алгоритм CatBoost способен прогнозировать интенсивность кариеса с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,82$. Наиболее важным предиктором оказался индекс КПУ за предыдущий год, вклад которого составил 66,3%.

В ортодонтии ИИ демонстрирует высокую эффективность при анализе телерентгенограмм (ТРГ) – автоматическая постановка цефалометрических точек и расчёт углов выполняется с точностью, сопоставимой с экспертами-ортодонтами [6]. Прогностические инструменты для оценки ростовых паттернов показывают умеренную корреляцию с клиническими исходами ($r = 0,65–0,75$), однако требуют дальнейшей валидации [4].

Выводы:

1) Особый интерес представляет способность ИИ обнаруживать патологии, которые могут быть пропущены человеком. В исследовании сравнения диагностики скрытых кариозных полостей нейросети показали чувствительность около 93% при достаточном объёме обучающих данных, что сопоставимо с показателями опытных клиницистов и превосходит результаты начинающих врачей.

2) Несмотря на впечатляющие результаты в контролируемых исследованиях, реальная производительность ИИ в клинической практике изучена недостаточно. Значительная гетерогенность между исследованиями (I^2 до 98% для чувствительности и 87% для специфичности) указывает на необходимость стандартизации протоколов валидации.

3) Проблема «чёрного ящика» ограничивает доверие клиницистов. Разработка объяснимого ИИ является приоритетным направлением исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Самохвалова, Д.Д. Калькулятор пародонтального риска в системе поддержки принятия клинических решений / Д.Д. Самохвалова, М.Д. Перова // Вестник новых медицинских технологий. – 2024. – № 1. С. 23-29. – DOI: 10.24412/1609-2163-2024-1-123-130

2) Оценка диагностической возможности обученной нейросетевой модели в стоматологии В.В. Шкарин, Ю.А. Македонова, М.П. Порфириадис [и др.] // Клиническая стоматология. – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 45–52.

3) Accuracy of Machine-learning Model Using Prediction One to Predict Increase in Number of Decayed, Missing, Filled Teeth (DMF Teeth) after 5 Years // J Dent Health. – 2024.

4) AI-Based Detection of Dental Features on CBCT: Dual-Layer Reliability Analysis / N. Kazimierczak [et al.] // Diagnostics (Basel). – 2025. – Vol. 15(24). – 3207.

5) Performance of a Vision-Language Model in Detecting Common Dental Conditions on Panoramic Radiographs Using Different Tooth Numbering Systems / Z. Liu [et al.] // Diagnostics. – 2025. – Vol 15(18). – 2315.

6) Artificial Intelligence in dentistry: an overview of systematic reviews and meta-analysis / A. Saikia [et al.] // Evid Based Dent. – 2025. – Vol. 26. – P. 180.

7) Redefining oral healthcare through artificial intelligence: a review of current applications and a roadmap for the future of dentistry / Bharti Dua [et al.] // BMC Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 1. – article 13.

8) Rathod, R. The effectiveness of a novel artificial intelligence (AI) model in detecting oral and dental diseases / R. Rathod,, S. Dean, C. Sproat // BDJ Open. – 2025. – Vol. 11. – P. 62. – https://doi.org/10.1038/s41405-025-00336-6

УДК 667.662

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ФОСФАТА ЦИНКА В ПРИСУТСТВИИ РАЗЛИЧНЫХ ПАВ

Д.С. Саражинский, С.В. Варгасова

Научный руководитель – **С.В. Варгасова**, ассистент

Ярославский государственный технический университет

В ходе работы было исследовано влияние различных типов ПАВ на процесс диспергирования частиц фосфата цинка, а также нахождение их оптимального содержания в системе.

Ключевые слова: *фосфат цинка, водно-дисперсионные материалы, поверхностно-активные вещества (ПАВ), диспергирование*

STUDY OF THE DISPERSION PROCESS OF ZINC PHOSPHATE PARTICLES IN THE PRESENCE OF VARIOUS SURFACTANTS

D.S. Sarazhinsky, S.V. Vargasova

Scientific Supervisor – **S.V. Vargasova,** Assistant

Yaroslavl State Technical University

The study investigated the effect of various types of surfactants on the dispersion of zinc phosphate particles and determined their optimal concentration in the system.

Keywords: *zinc phosphate, water-dispersion materials, dispersion, surfactants.*

В связи с ужесточением экологических требований к лакокрасочным материалам наблюдается активное замещение органо-разбавляемых материалов на водно-дисперсионные. Однако эффективные антикоррозионные материалы традиционно содержат хроматы и ионы тяжелых металлов, негативно влияющие на здоровье человека и окружающую среду. В качестве замены токсичных пигментов выступает фосфат цинка $Zn_2(PO_4)_2$ – экологически чистый противокоррозионный пигмент, обладающий хорошей совместимостью с различными полимерными связующими [1].

Основная проблема при разработке водно-дисперсионных материалов на основе фосфата цинка заключается в его склонности к агрегации и седиментации. Решением является введение в систему поверхностно-активных веществ, которые адсорбируются на поверхности частиц, улучшают смачиваемость и препятствуют коагуляции [2].

Таким образом, правильный подбор ПАВ в процессе диспергирования позволяет снизить общее количество добавок в системе и оптимизировать рецептуру водно-дисперсионного противокоррозионного лакокрасочного материала [3].

Объектом исследования является фосфат цинка марки ZP производства ООО «Завод Кронакрил», произведенный по ТУ 20.30.21- 022 – 88737636-2017. Основные пигментные свойства представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические показатели фосфата цинка

Показатель	Значение
Внешний вид	Порошок белого цвета
Потери массы при прокаливании, %	5-12
Массовая доля веществ, растворимых в воде, %, не более	0,5
pH водной суспензии	6,0-8,0
Маслоемкость, г/100 г, не более	40
Размер частиц, мкм	2,9

В ходе литературного поиска были подобраны в качестве диспергаторов следующие типы ПАВ: алкилбензолсульфонаты, оксиэтилированные алкилфенолы, триполифосфат натрия, аммониевые соли гидрофобного соплимера.

Было изучено влияние концентрации ПАВ (0,5–2 мас. %) на процесс диспергирования частиц фосфата цинка.

Установлено, что самым эффективным ПАВ оказался оксиэтилированный алкилфенол, обеспечивающий средний размер частиц от 1,0 мкм до 1,9 мкм, а время диспергирования сократилось с 7 до 5 минут.

Для аммониевой соли гидрофобного сополимера было определено оптимальное содержание ПАВ в системе, которое составило 2 мас. %. В течение 1 минуты диспергирования размер частиц фосфата цинка составил 1,6 мкм.

Алкилбензосульфонат оказал незначительное влияние на процесс диспергирования по сравнению с вышеперечисленными ПАВ, позволяющий уменьшить размер частиц с 2,9 мкм до 2,2 мкм при содержании 0,5% масс.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что самыми эффективными ПАВ для процесса диспергирования частиц фосфата цинка являются оксиэтилированные алкилфенолы, позволяющие достичь минимальный размер частиц 1,0 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Ермилов, П.И. Пигменты и пигментированные лакокрасочные материалы: учебное пособие для вузов / П.И. Ермилов, Е.А. Индейкин, И.А. Толмачёв. – Ленинград: Химия, 1987. – 198 с.

2) Дринберг, А.С. Антикоррозионные грунтовки / А.С. Дринберг, Э.Ф. Ицко, Т.В. Калинская. – Л.: Химия, 1986. – 272 с.

3) Exploration of the Adsorption Reduction of the Pigment Aggregates Strength under the Effect of Surfactants in Water-Dispersion Paints / A. Dyuryagina, A. Lutsenko, K. Ostrovnoy, V. Yukanko, A. Demyanenko, M. Akanova // Polymers. – 2022. – Vol. 14 (5). – P. 996.

УДК 616.314-77

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛАЙНЕР-СИСТЕМ

К.М. Севринова, Е.А. Касьянова

Научный руководитель – **Д.А. Русанова**, канд. мед. наук, ассистент

Ярославский государственный медицинский университет

На основе сравнительной характеристики физико-механических свойств термопластических полимеров, используемых в производстве элайнер-систем, формируются рекомендации по применению представленных материалов для разных клинических случаев. Анализируются технологии производственного процесса элайнеров и разработки научно-обоснованных протоколов цифрового планирования ортодонтического лечения.

Ключевые слова: *элайнеры, термопластические полимеры, CAD/CAM-технологии, 3D-печать, виртуальный сетап, биомеханическое моделирование, ортодонтическое лечение, цифровая стоматология*

COMPARATIVE ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMOPLASTIC POLYMERS AND PRODUCTION TECHNOLOGIES OF ALIGNER SYSTEMS

K. M. Sevrinova, E.A. Kasyanova

Scientific Supervisor - **D. A. Rusanova**, Candidate of Medical Sciences, Assistant

Yaroslavl State Medical University

Based on the comparative characteristics of the physical and mechanical properties of thermoplastic polymers used in the production of alignersystems, recommendations are formed for the use of the presented materials for different clinical cases. Technologies of the production process of aligners and the development of evidence-based protocols for digital planning of orthodontic treatment are analyzed.

Keywords: *aligners, thermoplastic polymers, CAD/CAM technologies, 3D printing, virtual setup, biomechanical modeling, orthodontic treatment, digital dentistry*

Актуальность: В современной ортодонтии наступает период активной цифровой трансформации, сопровождаемый инновационными технологиями диагностики, планирования и лечения стоматологических патологий. Элайнер система представляет собой серию прозрачных термопластичных капп. Благодаря высоким эстетическим свойствам, комфортному использованию и способности предсказывать результаты лечения, он становится все более популярной альтернативой традиционным брекетам [2].

Согласно данным Ю.С. Парфеновой и А.В. Рощупкиной, с каждым днем возрастает количество пациентов, желающих, чтобы ортодонтическое лечение было незаметно окружающим, что обуславливает растущий интерес к элайнер-терапии [2]. Однако эффективность данного метода напрямую зависит от правильного выбора материалов, точности производственных технологий и корректности биомеханического планирования перемещения зубов.

Интеграция CAD/CAM-технологий и 3D-печати в стоматологическую практику открывает новые возможности для персонализированного подхода к ортодонтическому лечению [11]. Применение цифровых технологий при биомеханическом моделировании ортодонтического перемещения зубов позволяет повысить предсказуемость результатов и оптимизировать клинические протоколы [4].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью систематизации знаний о физико-механических свойствах современных термопластических полимеров, используемых в производстве элайнеров, анализа технологических процессов их изготовления и разработки научно обоснованных протоколов цифрового планирования ортодонтического лечения.

Цель исследования: комплексный анализ элайнер-систем с позиций материаловедения, технологий их производства и клинического планирования лечения.

Материалы и методы: Проведен аналитический обзор и структурный анализ данных зарубежных и отечественных печатных и электронных информационных ресурсов, посвященных вопросам материаловедения, технологий производства и цифрового сопровождения изготовления элайнер-систем.

Критерии включения: публикация по теме научного исследования в период с 2015 г. по 2025 г., среднее значение индекса Хирша (количественный индекс продуктивности ученого) одного из авторов не менее 3.

Критерии невключения: публикация по теме научного исследования ранее, чем 2015 г., индекс Хирша авторов ниже числового значения 3.

В качестве электронных информационных ресурсов были использованы следующие электронные поисковые системы: (eLibrary.ru, PubMed, Scopus, WebofScience, КиберЛенинка и др.). Стратегия поиска данных по теме научного исследования предполагала использование следующих ключевых слов и предложений: элайнеры, термопластические полимеры, CAD/CAM-технологии, 3D-печать, виртуальный сетап, биомеханическое моделирование, ортодонтическое лечение, цифровая стоматология.

Результаты и их обсуждение: Ортодонтическое лечение с использованием элайнер-систем представляет собой высокотехнологичный процесс, требующий интеграции знаний из области материаловедения, цифровых технологий производства и биомеханики зубочелюстной системы. А.Н. Михалин и Р.А. Никандров отмечают, что современные средства лечения зубочелюстных аномалий должны сочетать клиническую эффективность с высокими эстетическими характеристиками [7].

Элайнеры частично смогли заменить традиционные брекет-техники, а в некоторых клинических ситуациях стали их реальной альтернативой [2]. Системы типа Star Smile и Invisalign представляют собой серию назубных капп из прозрачного биополимера, в каждой из которых заложено микродвижение зуба, которое при постоянном воздействии приводит к запланированному результату [2].

Современные элайнер-системы изготавливаются из различных термопластических полимеров, выбор которых определяет эффективность ортодонтического лечения. Основными материалами являются:

- Полиуретан (PU) – обладает высокой эластичностью и биосовместимостью
- Полиэтилентерефталат гликоль-модифицированный (PETG) – характеризуется оптимальным сочетанием прозрачности и механической прочности
- Термопластичный полиуретан (TPU) – демонстрирует превосходные упругие свойства
- Поликарбонат (PC) – отличается высокой ударной прочностью

Ключевыми параметрами, определяющими клиническую эффективность материала для элайнеров, являются:

Модуль упругости – характеризует способность материала к деформации под действием нагрузки и последующему восстановлению формы. Для ортодонтических капп оптимальный модуль упругости составляет 400-600 МПа, что обеспечивает постоянное, но физиологичное давление на зубы.

Прочность на разрыв – определяет устойчивость материала к механическим повреждениям при эксплуатации. Современные полимеры для элайнеров демонстрируют прочность на разрыв в диапазоне 40-70 МПа.

Относительное удлинение при разрыве – показатель, характеризующий пластичность материала. Чаще используются каппы толщиной 0,75 мм, которые обеспечивают оптимальное сочетание прочности и эластичности [2].

Прозрачность – критически важный эстетический параметр. Качественные термопластические полимеры обеспечивают светопропускание на уровне 85-92%, что делает элайнеры практически незаметными при ношении.

Биосовместимость – все материалы должны соответствовать стандартам ISO 10993 и не вызывать аллергических реакций, токсического или мутагенного воздействия на ткани полости рта.

Термопластические полимеры подвержены влиянию температуры, что необходимо учитывать при клиническом применении. При температуре полости рта 35-37 °C материал сохраняет стабильные механические свойства, однако воздействие горячих напитков (температура выше 60 °C) может привести к деформации каппы и снижению ее ортодонтической эффективности.

В процессе использования элайнеры подвергаются воздействию слюны, микроорганизмов полости рта, механическим нагрузкам при жевании. Исследования показывают, что через 14 дней непрерывного ношения происходит снижение упругих свойств материала на 15-20%, что обосновывает рекомендацию о смене каппы каждые две недели [10].

Представлена сравнительная характеристика физико-механических свойств материалов:

Полиуретан (PU), механические свойства:

- модуль упругости: 10-1000 МПа (в зависимости от типа);
- прочность на разрыв: 30-55 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: 400-650%;
- твердость по Шору А: 60-95 (жёсткий/очень жёсткий материал, пригодный для высоких нагрузок).

Физические характеристики:

- плотность: 1,10-1,25 г/см³;
- температура стеклования: от -50 до +50 °C;
- высокая эластичность и способность к восстановлению формы;
- биосовместимость, что критично для длительного контакта с тканями полости рта.

Благодаря высокой эластичности полиуретан обеспечивает оптимальное распределение ортодонтических сил, что позволяет достигать контролируемого перемещения зубов с минимальным дискомфортом для пациента.

Модификация полиэтилентерефталата (ПЭТ или ПЭТФ) с добавлением гликоля, механические свойства:

- модуль упругости при растяжении: 2000-2100 МПа;
- прочность на разрыв: 50-55 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: 120-150%;
- ударная вязкость: 8-10 кДж/м².

Физические характеристики:

- плотность: 1,27-1,29 г/см³;
- температура стеклования: 75-80 °C;
- высокая прозрачность (светопропускание до 90%);
- устойчивость к химическому воздействию слюны.

Как отмечается в работах Низина Дмитрия Рудольфовича, PETG демонстрирует оптимальное сочетание прозрачности и механической прочности, что делает его предпочтительным материалом для изготовления элайнеров методом 3D-печати и термоформования. Материал обеспечивает эстетичность конструкции при сохранении необходимых силовых характеристик.

Термопластичный полиуретан (TPU), механические свойства:

- модуль упругости: 5-2000 МПа (широкий диапазон в зависимости от твердости);
- прочность на разрыв: 30-70 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: 450-700%;
- твердость по Шору А: 70-98;
- сопротивление истиранию: превосходное.

Физические характеристики:
- плотность: 1,10-1,25 г/см³;
- температура стеклования: от -60 до -20°С;
- превосходные упругие свойства с быстрым восстановлением формы;
- устойчивость к многократным деформациям.

Согласно данным Р.А. Гасанова, TPU демонстрирует превосходные упругие свойства, обеспечивая постоянное и контролируемое давление на зубной ряд в течение всего периода ношения элайнера. Материал сохраняет свои механические характеристики при циклических нагрузках, что критично для эффективности ортодонтического лечения.

Поликарбонат (PC), механические свойства:
- модуль упругости при растяжении: 2300-2400 МПа;
- прочность на разрыв: 60-70 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: 80-150%;
- ударная вязкость: 600-850 Дж/м (один из самых высоких показателей среди термопластов);
- твердость по Роквеллу (шкала М): 70-75.

Физические характеристики:
- плотность: 1,20-1,22 г/см³;
- температура стеклования: 145-150 °С;
- высокая прозрачность (светопропускание до 89%);
- термостойкость: рабочий диапазон от -40 до +130°С;
- высокая размерная стабильность.

Как указывается в исследованиях И.А. Дегтева и соавторов, поликарбонат отличается высокой ударной прочностью, что обеспечивает долговечность элайнеров и их устойчивость к случайным механическим воздействиям. Материал особенно предпочтителен для пациентов с бруксизмом или повышенной жевательной нагрузкой [3, 4].

По данным авторов М. Макри, Г. Мурмура, Г. Варвары, Т. Трейни и Ф. Феста в статье «Клинические характеристики и биологические особенности прозрачных элайнеров в ортодонтии, выбор материала для изготовления элайнеров определяется клинической ситуацией:
- PU и TPU предпочтительны для случаев, требующих максимальной эластичности и комфорта
- PETG оптимален для стандартных случаев благодаря балансу свойств
- PC рекомендуется при необходимости повышенной прочности конструкции

Все материалы совместимы с современными CAD/CAM технологиями и 3D-печатью [11, 6], что обеспечивает высокую точность изготовления элайнеров и эффективность ортодонтического лечения.

Сунарчин Э.И. с соавторами подчеркивают, что использование 3D-технологий и CAD/CAM в стоматологии позволяет достичь высокой точности и воспроизводимости результатов [11].

Сравнительная характеристика термопластических полимеров приведена в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика термопластических полимеров.

Материал		Полиуретан	**(ПЭТ или ПЭТФ) с добавлением гликоля**	Термопластичный полиуретан (TPU)	Поликарбонат (PC)
Мех. свойства	Модуль упругости, МПа	10-1000	2000-2100	5-2000	2300-2400
	Прочность на разрыв, МПа	30-55	50-55	30-70	60-70
	Относительное удлинение при разрыве, %	400-650	120-150	450-700	80-150
	Твердость по Шору А	60-95	-	70-98	-
	Ударная вязкость, кДж/м²	-	8-10	-	600-850
Физ. свойства	Плотность, г/см³	1,10-1,25	1,27-1,29	1,10-1,25	1,20-1,22
	Температура стеклования	от -50 до +50 °C	75-80	от -60 до -20 °C	145-150
Особенно-сти материала		Высокая эластичность и способность к восстановлени ю формы; биосовмести-мость, что критично для длительного контакта с тканями полости рта.	Высокая прозрачность (светопропускание до 90%); устойчивость к химическому воздействию слюны.	Превосходное сопротивление истиранию; превосходные упругие свойства с быстрым восстановлением формы; устойчивость к многократным деформациям	Термостойкость: рабочий диапазон от -40 до +130 °C; высокая размерная стабильность

Производственный процесс элайнер-систем включает следующие этапы:

Этап 1: Цифровое сканирование. Получение трехмерной модели зубных рядов пациента осуществляется с помощью интраорального или настольного сканера. Точность современных сканирующих систем достигает 20 микрон, что обеспечивает высокую детализацию анатомических структур.

Этап 2: Виртуальное планирование. На основе полученных данных в специализированном программном обеспечении создается виртуальный сетап – пошаговый план перемещения зубов от исходного положения к запланированному результату. Виртуальный план в формате 3D позволяет до начала лечения увидеть конечный результат.

Этап 3: CAD-моделирование. Для каждого этапа лечения создается отдельная цифровая модель зубного ряда с учетом запланированных перемещений. В каждой модели заложено микродвижение зуба (обычно 0,15-0,25 мм), которое при постоянном воздействии приводит к запланированному результату [2].

Согласно исследованиям Колонтая Ю.А. с соавторами, 3D-печать в стоматологии открывает новые возможности для персонализированного производства ортодонтических аппаратов.

Метод термоформования (традиционный подход):

1. Изготовление физических моделей зубных рядов методом 3D-печати (стереолитография, селективное лазерное спекание);
2. Нагрев термопластического листа до температуры размягчения (обычно 120-180 °C в зависимости от материала);
3. Вакуумное или давлением формование листа на модели;
4. Охлаждение и обрезка избытков материала;
5. Финишная обработка краев.

Альтернативно современные технологии позволяют печатать элайнеры непосредственно из биосовместимых фотополимерных смол, что исключает необходимость создания промежуточных моделей и термоформования. Прямая 3D-печать элайнеров – это инновационный подход, однако данный метод пока находится на стадии активного развития и недостаточно апробирован.

Критически важными параметрами контроля качества являются:

- Толщина каппы (допустимое отклонение ±0,05 мм)
- Точность воспроизведения анатомических деталей
- Отсутствие пузырей, включений и деформаций
- Качество обработки краев (гладкость, отсутствие острых участков)

Выводы: комплексный анализ элайнер-систем демонстрирует, что эффективность данного метода ортодонтического лечения определяется интеграцией трех ключевых компонентов: правильного выбора материалов, точности производственных технологий и корректности биомеханического планирования.

Современные термопластические полимеры обеспечивают оптимальное сочетание механических свойств, биосовместимости и эстетических характеристик. Применение CAD/CAM-технологий и 3D-печати позволяет достичь высокой точности изготовления индивидуализированных ортодонтических аппаратов. Цифровое планирование с использованием виртуального сетапа и биомеханического моделирования повышает предсказуемость результатов лечения.

Как справедливо отмечается в литературе, какой бы метод коррекции мы не выбрали, важно помнить, что лечит не аппаратура, а врач, и основным является правильный выбор плана лечения [2]. Элайнер-системы представляют собой эффективный инструмент в руках квалифицированного специалиста, владеющего современными цифровыми технологиями и глубоко понимающего биомеханические принципы перемещения зубов.

Дальнейшее развитие элайнер-терапии связано с совершенствованием материалов (разработка «умных» полимеров с программируемыми свойствами), улучшением производственных технологий (прямая 3D-печать элайнеров), внедрением искусственного интеллекта в процесс планирования лечения и расширением клинических показаний за счет лучшего понимания биомеханических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Гасанов, Р.А. Изучение положительных и отрицательных свойств элайнеров на основании мнения стоматологов-ортодонтов / Р.А. Гасанов // Бюллетень медицинских интернет-конференций. — Общество с ограниченной ответственностью «Наука и инновации». – 2018. – Т. 8, № 4. – С. 140 – 141.

2) Гянджали, Н.Т. Брекет-техника или элайнеры? / Н.Т. Гянджали // Bulletin of Medical Internet Conferences. – 2014. –Т. 4, № 4. – С. 370.

3) Материалы для термоформирования элайнеров / И.А. Дегтев, С.В. Казумян, Ф.А. Билалова, В.В. Борисов, Е.М. Басин // МНИЖ. – 2021. – № 4–2 (106). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/materialy-dlya-termoformovaniya-elaynerov (дата обращения: 15.01.2024).

4) Дубинин, А.Л. Применение цифровых технологий при биомеханическом моделировании ортодонтического перемещения зубов / А.Л. Дубинин, М.А. Осипенко, Ю.И. Няшин // Российский журнал биомеханики. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 359–374.

5) Загидуллов, М.Ф. Устройство для коррекции положения зубов / М.Ф. Загидуллов. – URL: https://elibrary.ru (дата обращения: 15.01.2024).

6) 3D-печать в стоматологии / Ю.А. Колонтай, Д.Р. Мастюкова, П.В. Строганова, Е.М. Шакаия. – URL: https://elibrary.ru (дата обращения: не указана).

7) Михалин, А.Н. Современные средства лечения зубочелюстных аномалий / А.Н. Михалин, Р. А. Никандров // Juvenis scientia. – 2017. – № 12. – С. 19–21.

8) Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика / Д.Р. Низин [и др.] // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 7. – С. 1078–1088.

9) Изменения микроциркуляции протезного ложа после протезирования у больных сахарным диабетом 2-го типа / Р. Нормуродова [и др.] // Медицина и инновации. – 2021. – Т. 1, № 4. – С. 373–377.

10) Парфенова, Ю.С. Изучение и анализ целесообразности применения элайнеров в качестве альтернативы брекет-системе / Ю.С. Парфенова, А.В. Рощупкина // Молодёжный инновационный вестник. – 2019. – Т. 8, № 2. – С. 179–180.

11) Сунарчин, Э.И. Использование 3D-технологий и CAD/CAM в стоматологии / Э. И. Сунарчин, Е.А. Самукова, А.А. Бабаева // Современные научные исследования и разработки. – 2018. – № 3. – С. 845–847.

12) Clinical performances and biological features of clear aligners materials in orthodontics / M. Macrì [et al.] // Frontiers in Materials. – 2022. – Vol. 9. – P. 819121.

УДК 616.31

ТЕРМОГЕНЕЗ ПРИ ПРЕПАРИРОВАНИИ ЗУБОВ: КАК АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ВЛИЯЮТ НА ПЕРЕГРЕВ ПУЛЬПЫ И МЕТОДЫ ЕГО ПРОФИЛАКТИКИ

А.Н. Стельмах

Научный руководитель – **Е.В. Сергеев**, ассистент

Ярославский государственный медицинский университет

В работе проанализированы физико-биологические механизмы термогенеза при препарировании твёрдых тканей зуба. Рассмотрены классификации боров, их конструкция и влияние на нагрев пульпы. Изучены ключевые факторы тепловыделения: скорость, сила давления и время контакта. Особое внимание уделено профилактике термического некроза пульпы: эффективности водяного охлаждения и интермиттирующей технике. Проанализирован износ боров, влияющий на перегрев. Определены пути сохранения витальной пульпы для долгосрочного прогноза.

Ключевые слова: *пульпа, термогенез, термонекроз, препарирование зубов, алмазные боры, твердосплавные боры, абразивные инструменты, зернистость бора, износ бора, охлаждение при препарировании, воздушно-водяной спрей, интермиттирующее препарирование, перегрев дентина, одонтобласты, профилактика пульпита*

THERMOGENESIS IN TOOTH PREPARATION: HOW ABRASIVE INSTRUMENTS INFLUENCE PULP OVERHEATING AND METHODS OF ITS PREVENTION

A.N. Stelmakh

Scientific Supervisor – **E.V. Sergeev**, Assistant

Yaroslavl State Medical University

This article analyzes the physical and biological mechanisms of thermogenesis during hard dental tissue preparation. Bur classifications, their designs, and their impact on pulp heating are discussed. Key factors of heat generation, including speed, pressure, and contact time, are examined. Particular attention is paid to the treatment of pulp necrosis, including the effectiveness of water cooling and intermittent techniques. Bur wear, which influences overheating, is analyzed. Pathways to preserving vital pulp for long-term prognosis are identified.

Keywords: *pulp, thermogenesis, thermal pulp necrosis, tooth preparation, diamond burs, carbide burs, abrasive instruments, bur grit, bur wear, cooling during preparation, air-water spray, intermittent preparation, dentin overheating, odontoblasts, pulpitis prevention*

Актуальность темы и преследуемая цель работы.

Пульпа зуба (pulpadentis) – это богатый кровеносными сосудами и нервными волокнами специализированный тип рыхлой волокнистой соединительной ткани, которая заполняет полость зуба, т.е. пульповую камеру и корневые каналы. За счет наличия в ней большого количества рецепторных нервных окончаний – пульпа обеспечивает очень высокую болевую чувствительность тканей зуба к воздействию механических, физических, химических раздражений.

Проблема термического повреждения пульпы, которая носит название термонекроза, сохраняет высокую медицинскую и социальную значимость. С одной стороны стремление к максимальной эстетике и долговечности реставрации часто требует значительного объема сошлифовывания твердых тканей, что критически уменьшает их теплоизолирующую способность (в ортопедии), а также к максимальному очищению пораженных кариесом твердых тканей зубов (в терапевтической стоматологии). С другой стороны использование нерациональных режимов препарирования (таких как чрезмерное давление на бор,

длительный и непрерывный контакт с тканями зуба и так далее) и недостаточно эффективного охлаждения нивелируют защитные механизмы зуба.

Препарирование твердых тканей зуба остается неотъемлемым этапом большинства терапевтических и ортопедических вмешательств. Однако механическое воздействие абразивными инструментами неизбежно сопровождается генерацией тепла (термогенезом), которое при превышении критических значений (выше 6-7 °C от исходной температуры пульпы) приводит к необратимым изменениям в пульпе - вплоть до ее некроза.

Несмотря на развитие стоматологического оборудования, проблема перегрева пульпы сохраняет высокую актуальность ввиду широкого распространения «агрессивных» методик препарирования, использования нерациональных режимов работы и недостаточной эффективности систем охлаждения. По данным литературы, частота диагностированных пульпитов после препарирования под ортопедические конструкции остается стабильно высокой, что диктует необходимость детального изучения факторов термогенеза и совершенствования методов его профилактики. На основе анализа литературных данных и современных клинических рекомендаций необходимо изучить механизмы тепловыделения при препарировании зубов различными абразивными стоматологическими инструментами, определить зависимость степени нагрева пульпы от режимов работы и морфологических характеристик боров, а также систематизировать эффективные методы профилактики термического повреждения пульпы.

Физические и биологические основы термогенеза при препарировании твердых тканей зуба. Термодинамика процесса препарирования.

Процесс препарирования твердых тканей зуба с неизбежностью сопровождается генерацией тепла, что обусловлено физическими законами взаимодействия инструмента и субстрата. Понимание термодинамики этого процесса является ключевым для предотвращения ятрогенного повреждения пульпы.

Основным источником тепловыделения (термогенеза) при препарировании является трение, возникающее между вращающимся инструментом и твердыми тканями зуба. Однако трение – не единственный механизм. В зависимости от типа инструмента, вклад вносят различные физические процессы:

1. Трение – основной источник. При любом типе обработки поверхности инструмента и зуба взаимодействуют, создавая силу трения, энергия которой рассеивается в виде тепла.

2. Процесс резания (для твердосплавных боров – вращающихся режущих инструментов в стоматологии, изготовленных из карбида вольфрама): Инструменты с режущей рабочей поверхностью при своей работе срезают стружку. Работа пластической деформации и разрушения срезаемого слоя также преобразуется в тепловую энергию .

3. Абразивный процесс (для алмазных боров – инструменты в стоматологии, покрытые микроскопическими алмазными частицами). Они работают по принципу микрорезания множеством абразивных частиц (той самой алмазной крошки). Этот процесс сопровождается интенсивным трением каждой частицы о ткань зуба, что приводит к значительному нагреву.

С физической точки зрения, процесс препарирования представляет собой преобразование кинетической энергии вращающегося бора в работу по разрушению тканей зуба. Однако коэффициент полезного действия этого процесса далек от 100%. Значительная часть механической энергии рассеивается в виде тепла в зоне контакта. Интенсивность этого преобразования зависит от ряда параметров: скорости вращения, силы давления инструмента на ткань, площади контакта и остроты (абразивности) инструмента.

Наиболее важным аспектом термодинамики препарирования с клинической точки зрения является порог термического повреждения пульпы. Исследования, проведенные *in vivo* («в (или на) живом»), установили, что повышение температуры в пульпарной камере на 5,5 °C (6 °C) в течение 10 секунд приводит к необратимым изменениям (пульпиту или некрозу) примерно в 15% случаев . При повышении температуры на 11,1 °C частота некроза

возрастает до 60-70% . Эти данные стали «золотым стандартом», на который ориентируются врачи-клиницисты и исследователи .

Важно отметить, что порог в 5,5 °C (6 °C) не является абсолютной константой. Это указывает на то, что скорость и длительность нагрева играют не менее важную роль, чем абсолютная величина прироста температуры. Кроме того, в клинических условиях за счет перфузии тканей кровью (термодиссипации пульпарным и пародонтальным кровотоком) фактический нагрев пульпы может быть ниже, чем в экспериментах *in vitro* («в пробирке»). Тем не менее, порог в 5,5 °C (6 °C) остается общепринятым ориентиром, превышение которого требует особой осторожности (однако до него лучшее вообще не доходить).

Реакция пульпы на тепловое воздействие.

Дентин, благодаря своей гистологической структуре, выполняет роль естественного теплоизолятора, защищающего пульпу от термических воздействий. Эффективность этой защиты прямо пропорциональна толщине сохранившегося дентина и обратно пропорциональна его проницаемости. Дентин имеет относительно высокое содержание воды благодаря своей тубулярной структуре. Теплопроводность дентина значительно ниже, чем у эмали или керамики. Это означает, что дентин способен поглощать и аккумулировать значительное количество тепловой энергии, замедляя ее передачу к пульпе.

При перегреве первыми примут на себя удар одонтобласты. Их отростки пронизывают дентинные канальцы и непосредственно контактируют с зоной препарирования. При критическом нагреве будет наблюдаться вакуолизация цитоплазмы одонтобластов - появление множественных вакуолей, свидетельствующее о повреждении внутриклеточных органелл и нарушении водно-электролитного баланса. В тяжёлых случаях происходит втягивание отростков и смещение тел одонтобластов в дентинные канальцы (аспирация одонтобластов), что было описано еще в ранних гистологических исследованиях . Это явление приводит к запустеванию периферического слоя пульпы и нарушению трофики дентина.

Нарушение микроциркуляции. При превышении критического порога наступает повышение проницаемости сосудистой стенки, выход плазмы в интерстиций, отек и, в конечном итоге, тромбоз капилляров. Нарушение реологии крови ведет к ишемии и гипоксии тканей пульпы.

Впоследствии возникает коагуляционный некроз. При прямом и интенсивном нагреве (например, при длительном препарировании без охлаждения) происходит денатурация белков цитоплазмы и внеклеточного матрикса. Гистологически эта зона характеризуется гомогенизацией ткани, исчезновением клеточных ядер и потерей нормальной структуры коллагеновых волокон.

В клинической практике термическое повреждение пульпы может проявляться в двух формах, различающихся по времени реализации патологического процесса.

Немедленный термонекроз – развивается непосредственно во время препарирования при грубом нарушении протоколов – использовании затупленных боров, отсутствии или неэффективности охлаждения, чрезмерном давлении на инструмент. В этом случае температура в пульпарной камере мгновенно превышает критический порог (56-60 °C абсолютной температуры, что соответствует приросту более 20 °C от исходной), вызывая необратимую денатурацию белков и гибель клеток. Клинически это может проявляться острой болью во время препарирования (при сохраненной витальности) или, напротив, безболезненным некрозом при использовании анестезии, маскирующей симптомы.

Отсроченный термонекроз - представляет собой более коварную форму повреждения. Нагрев не достигает уровня, вызывающего мгновенную гибель клеток, но оказывается достаточным для инициации воспалительной реакции, которая в замкнутом пространстве пульпарной камеры прогрессирует и приводит к некрозу спустя дни или недели после вмешательства. Именно этот механизм лежит в основе случаев, когда зуб, запломбированный без признаков пульпита, спустя некоторое время темнеет и требует депульпирования.

Характеристика абразивных инструментов как фактора термогенеза. Классификация и физика работы абразивных инструментов.

Несмотря на то, что и алмазные, и твердосплавные боры используются для препарирования, физика их работы принципиально различается, что определяет их клиническое применение и характер термогенеза.

Твердосплавные боры относятся к инструментам с режущей рабочей поверхностью. Их рабочая часть изготавливается из карбида вольфрама путем фрезерования, в результате которого формируются острые режущие грани, обычно в количестве от 6 до 30 и более . Механизм работы твердосплавного бора – это резание с образованием стружки. Острые грани инструмента внедряются в ткань зуба и срезают ее слой за слоем. Эти боры обладают высокой режущей способностью и могут эффективно работать как на низких, так и на высоких (турбинных) скоростях, выдерживая значительные тепловые нагрузки.

Алмазные боры представляют собой классический образец абразивного инструмента. Их рабочая поверхность формируется путем нанесения на металлическую основу слоя алмазной крошки, закрепленной в связке. Механизм препарирования здесь принципиально иной: множественные абразивные зерна, каждое из которых представляет собой многогранник неправильной формы с острыми кромками и углами, работают как микроскопические резцы, одновременно сошлифовывая (истирая) поверхность. Эмаль и дентин удаляются за счет миллионов микроцарапин, оставляемых абразивными частицами.

Ключевое различие в физике процесса, имеющее прямое отношение к термогенезу, заключается в том, что для абразивной обработки характерно наличие отрицательных углов резания. Это означает, что режущая грань алмазного зерна часто проходит по касательной к поверхности, не столько срезая стружку, сколько деформируя ткань. Это требует приложения больших усилий и сопровождается более интенсивным трением по сравнению с острым резцом твердосплавного бора.

Зернистость (грануляция) - это размер алмазных частиц, нанесенных на рабочую часть инструмента. Зернистость является важнейшей характеристикой, определяющей область применения бора и интенсивность съема тканей. Алмазные зерна крепятся к рабочей части стоматологического бора с помощью связки. Два самых распространенных метода крепления - гальванизация и спекание. При гальваническом методе крепления зерна связываются в металлической заготовке с помощью слоя металла (никеля), который составляет 2/3 размера алмазного зерна. Метод спекания используется для производства высокоабразивных инструментов, которые часто применяются в ортопедической стоматологии и зуботехнических работах. В качестве связки в этом случае применяется железомарганцевый сплав или бронза. В стоматологии принята стандартизированная цветовая маркировка алмазных боров в зависимости от размера зерна (стандарт ISO):

1. Черное кольцо. Сверхгрубая зернистость (размер гранул абразивных частиц 150-180 мкм). ISO № 544. Используется для самого грубого и быстрого предварительного сошлифовывания больших объемов тканей.

2. Зеленое кольцо. Грубая зернистость (125-150 мкм). ISO № 534. Предназначена для предварительного шлифования и быстрого препарирования.

3. Синее кольцо. Средняя зернистость (95-120 мкм). ISO № 524. Это универсальные боры для стандартного препарирования.

4. Красное кольцо. Тонкая зернистость (20-90 мкм). ISO № 514. Используется для шлифовки и чистовой обработки.

5. Желтое кольцо. Экстратонкая зернистость (12-20 мкм). ISO № 504. Применяется для предварительного финирования.

6. Белое кольцо. Ультратонкая зернистость (6-12 мкм). ISO № 494. Используется для окончательного финирования и полирования, получения оптимально гладкой поверхности.

Клинически значимым является то, что боры с более крупным зерном (черные, зеленые) обеспечивают высокую скорость съема ткани, но оставляют после себя грубую, неровную поверхность и, при прочих равных условиях, могут генерировать больше тепла из-

за большей площади контакта и силы трения. Мелкозернистые боры (красные, желтые, белые) предназначены для щадящей финишной обработки и полировки, они снимают минимальный слой ткани и меньше нагревают поверхность.

Концентрация алмазных зерен определяет количество абразивных частиц на единице площади рабочей поверхности бора. Высокая концентрация зерен обеспечивает более равномерное распределение нагрузки и более гладкую поверхность после обработки, однако может снижать пространство для отвода стружки (так называемую "пористость" инструмента). Снижение концентрации зерен в процессе эксплуатации является одним из признаков износа бора и ведет к ухудшению его режущих свойств.

Влияние износа инструмента на трение и нагрев:

1. Микроистирание вершин зерен. Это процесс постепенного сглаживания и притупления острых режущих кромок алмазных частиц. Зерна перестают эффективно врезаться в ткань, и работа бора все больше напоминает трение тупым предметом, что резко увеличивает тепловыделение.

2. Микроразрушение (сколы) режущих кромок. При этом острые кромки частично скалываются. С одной стороны, это может привести к образованию новых, временно острых граней (элемент самозатачивания), но с другой — делает поверхность бора более грубой и нестабильной. Так же с каждым применением твердосплавный бор затупляется, что приводит к снижению режущей способности, а как следствие врач неосознанно начнет сильнее давить на зуб бором, из-за чего твердые тькани зуба будут сильнее нагреваться.

3. Разрушение зерен на части. Крупные зерна раскалываются на несколько более мелких осколков. Это может на время сохранить абразивную способность, но меняет зернистость инструмента в непредсказуемую сторону.

4. Вырывание целых зерен или их блоков из связки. Это наиболее критичный вид износа. Потеря значительной части алмазного слоя приводит к тому, что оголившаяся металлическая связка или даже тело бора начинает напрямую контактировать с твердыми тканями зуба. Поскольку коэффициент трения металла о дентин и эмаль высок, а режущей способности нет, этот процесс сопровождается катастрофическим ростом температуры в зоне контакта и резким увеличением вибрации из-за разбалансировки инструмента.

Таким образом, изношенный бор перестает резать и начинает тереть, что является прямым путем к перегреву пульпы.

Режимы работы наконечника и их влияние на нагрев.

Если тип и состояние инструмента определяют потенциальную способность генерировать тепло, то режимы работы наконечника являются теми управляемыми параметрами, которые реализуют этот потенциал в клинической практике. Три взаимосвязанных фактора – скорость вращения, сила давления и время контакта – в совокупности определяют температурный режим в зоне препарирования.

А) Влияние скорости вращения на термогенез не является линейным и требует дифференцированного подхода в зависимости от типа привода.

При работе турбинным наконечником (300 000-400 000 об/мин) высокая скорость резания позволяет минимизировать усилие и время контакта. При оптимальном режиме основная часть энергии расходуется на резание, а не на трение. Однако парадокс заключается в том, что при недостаточном охлаждении именно высокая скорость создает наибольший риск критического перегрева из-за интенсивности процесса.

При работе микромотором с понижающим наконечником (до 40 000 об/мин) характер термогенеза иной.

Клинически значимым является правило: выбор скорости должен соответствовать задаче. Финирование и препарирование вблизи пульпы проводят на пониженных оборотах. Это снижает кинетическую энергию соударения абразивных частиц с тканью и, следовательно, тепловыделение.

Б) Сила, с которой оператор прижимает бор к тканям зуба, является, пожалуй, самым субъективным и вариабельным фактором. Интуитивное стремление ускорить процесс за счет усиления нажима приводит к обратному эффекту.

При увеличении давления возрастает глубина внедрения абразивных зерен в ткань, растет сила трения и площадь контакта. Это неизбежно ведет к росту температуры. Более того, сильное давление может вызвать деформацию и торможение бора в тканях, что еще больше увеличивает трение.

Существует важный компенсационный механизм: при высоких скоростях вращения давление должно быть минимальным – инструмент должен работать "как карандаш", практически под собственным весом. И наоборот, при низких скоростях допустимо несколько большее давление, так как сниженная частота вращения частично компенсирует тепловыделение.

Как говорилось выше, работа тупым изношенным инструментом вынуждает врача интуитивно увеличивать давление, что создает порочный круг: тупой бор требует большего нажима => больший нажим увеличивает трение => перегрев пульпы .

В) Время контакта. Длительность непрерывного воздействия бора на один участок ткани является критическим параметром, который легко контролировать клинически.

При статическом давлении и длительном контакте тепло не успевает рассеиваться, аккумулируется в твердых тканях и передается вглубь к пульпе. Экспериментально подтверждено, что повышение температуры на 5,5 °C (6 °C) в течение нескольких секунд уже создает риск необратимых изменений пульпы.

Метод прерывистого препарирования заключается в том, что длительность непрерывного контакта бора с тканью не должна превышать 3 секунд, после чего инструмент выводится из полости на примерно такое же время. За это время происходит частичное охлаждение тканей за счет кровотока пульпы и действия системы охлаждения. В сочетании с воздушно-водяным охлаждением прерывистая техника является наиболее эффективным способом контроля термогенеза.

Сравнительный анализ нагрева различными типами боров.

Главный вопрос в том, какие же боры генерируют больше тепла. И большинство исследователей сходятся во мнении, что алмазные боры при прочих равных условиях генерируют более высокие температуры по сравнению с твердосплавными за счет механизма работы: не срезание, а истирания. Однако наличие эффективного водяного охлаждения нивелирует эти различия.

В рамках самой группы алмазных боров термогенез коррелирует с зернистостью. Крупнозернистые боры, предназначенные для агрессивного съема тканей, создают более высокую тепловую нагрузку. Это связано с большей глубиной внедрения абразивных частиц, и, следовательно, большей силой трения. Финиры же работают в более щадящем режиме, снимая минимальный объем ткани, создавая меньше тепла. Однако их применение целесообразно лишь на последних этапах препарирования.

Помимо этого есть еще вибрация, которая не является прямым источником тепла, но упоминается в литературе как сопутствующий повреждающий фактор. Вибрация бора, особенно усиливающаяся при износе инструмента или нештатной работе наконечника, может вызывать механическое раздражение тканей пульпы и дентинных канальцев, усугубляя общее повреждающее действие.

Методы профилактики перегрева пульпы. Охлаждение как основной метод защиты.

Охлаждение зоны препарирования является наиболее эффективным и физиологичным способом профилактики термонекроза пульпы.

В клинической практике применяются три основных вида охлаждения: воздушное, водяное и комбинированное воздушно-водяное (спрей).

Воздушное охлаждение основано на конвективном отводе тепла потоком воздуха. Однако теплоемкость воздуха значительно ниже, чем у воды, поэтому его эффективность

ограничена. Воздушное охлаждение может применяться лишь на финальных этапах полировки или при работе с материалами, чувствительными к влаге, но для основного этапа препарирования оно недостаточно.

Водяное охлаждение обеспечивает эффективный теплоотвод благодаря высокой теплоемкости воды. Подача воды в зону препарирования может осуществляться как через отдельный шприц, так и через встроенную систему наконечника.

Воздушно-водяное охлаждение (спрей) является золотым стандартом современной стоматологии. Комбинация воды и воздуха решает две задачи: вода эффективно отводит тепло, а распыление под давлением позволяет доставить охлаждающую жидкость непосредственно в зону контакта бора с тканью, преодолевая воздушный барьер, создаваемый турбиной.

Так турбинные наконечники можно подразделить на наконечники с раздельным подведением воздуха и воды (такими являются МИДВЕСТ и БОРДЕН 3 отверстия); наконечники с совместным подведением воздуха и воды (БОРДЕН). Помимо этой классификации есть разделение по системе орошения рабочей части: одноканальная подача спрея; двухканальная подача спрея; трёхканальная подача спрея; четырехканальная подача спрея.

Клиническая эффективность охлаждения определяется объемным расходом воды и ее температурой. Инструкции производителей стоматологического оборудования (Sirona, KaVo) устанавливают минимальный расход охлаждающей воды на уровне не менее 50 мл/мин. Несоблюдение этого требования рассматривается как прямая угроза термического повреждения пульпы.

Исследования показывают, что температура охлаждающей воды также имеет значение. Использование воды любой температуры (от 10 до 35 °C) предотвращает критический нагрев пульпы, однако вода комнатной температуры (около 23 °C) обеспечивает оптимальный баланс между эффективным охлаждением и комфортом для пациента. Теплая вода (35 °C) лишь незначительно повышает температуру относительно исходной, а холодная вода (10 °C) создает активное, но потенциально избыточное охлаждение.

Принципиально важным является тот факт, что водяное охлаждение не только защищает пульпу от перегрева, но и повышает эффективность самого препарирования, увеличивая скорость удаления тканей и улучшая качество обработанной поверхности.

Эффективность любой системы охлаждения сводится к нулю при нарушении ее функционирования. К основным причинам нарушения работы системы относятся:

1) Забивание форсунок частицами извести из водопроводной воды (требуется использование дистиллированной воды);

2) Воздушные пробки в системе подачи воды;

3) Недостаточное давление в системе;

4) Механические повреждения сопел.

Производители предписывают обязательную ежедневную проверку проходимости форсунок и своевременную очистку каналов. Использование дистиллированной или тщательно отфильтрованной воды с размером фильтра менее 50 мкм позволяет минимизировать риск закупорки.

Оптимизация выбора инструментов и техники препарирования.

Эффективное охлаждение, рассмотренное в предыдущем разделе, является основным и одним из самых главных условием безопасности, но не единственным. Рациональный выбор инструментов и соблюдение правильной техники препарирования позволяют минимизировать тепловую нагрузку на пульпу еще до того, как система охлаждения вступит в работу. Эти факторы находятся в зоне непосредственного контроля врача и не требуют дополнительного оборудования.

Клинический принцип "от общего к частному" имеет под собой четкое физиологическое обоснование с точки зрения термогенеза. Каждому этапу препарирования должен соответствовать определенный тип инструмента.

Для грубого препарирования и снятия значительных объемов твердых тканей используются крупнозернистые алмазные боры (черное и зеленое кольцо, 160-180 мкм). Они обеспечивают высокую скорость съема, но создают и наибольшую тепловую нагрузку. Поэтому применение таких боров должно быть ограничено по времени и сопровождаться максимально эффективным охлаждением.

По мере приближения к пульпе необходимо переходить на боры со средней и мелкой зернистостью (синее и красное кольцо, 95-120 и 20-90 мкм соответственно). Это снижает агрессивность воздействия и уменьшает риск вскрытия пульповой камеры.

Финирование краев полости и окончательная обработка выполняются мелкозернистыми и ультрамелкозернистыми борами (желтое и белое кольцо, 12-20 и 6-12 мкм). На этом этапе удаляется минимальный слой ткани, и термогенез существенно ниже.

Тактика интермиттирующего (прерывистого) препарирования. Интермиттирующее препарирование, как уже говорилось выше, является одним из наиболее эффективных и простых в реализации методов профилактики перегрева. Суть метода заключается в чередовании коротких фаз контакта инструмента с тканью и фаз, во время которых бор выводится из полости, позволяя тканям охлаждаться. Контакт с твердыми тканями зуба не должен превышать 3-х секунд.

Стоит упомянуть, что современная стоматология всегда склоняется в сторону максимального сохранения здоровых тканей зуба. Малоинвазивное препарирование имеет прямое отношение к термогенезу, поскольку остаточная толщина дентина является одним из факторов защиты пульпы.

Чем больше дентина сохраняется между дном полости и пульпарной камерой, тем эффективнее естественная теплоизоляция. Дентин, благодаря высокому содержанию воды и особенностям структуры, обладает значительно меньшей теплопроводностью, чем эмаль или реставрационные материалы.

Клинические и технологические аспекты.

Помимо выбора инструментов и режимов препарирования, существуют дополнительные факторы, находящиеся в зоне ответственности врача и ассистента, которые могут существенно повлиять на термическую безопасность вмешательства. Эти аспекты часто остаются за рамками обсуждения, однако их игнорирование способно нивелировать все предыдущие усилия.

Любое препарирование должно начинаться с предварительной диагностики витальности зуба и исходного состояния пульпы. Это не просто формальность, а необходимый этап планирования тактики вмешательства.

Электроодонтометрия (ЭОД) является объективным методом оценки состояния пульпы. Проводится процедура так: исследуемый зуб очищают от налета, изолируют от слюны с помощью системы коффердам, ватных валиков или ретракционной нити. Для улучшения контакта электрода с зубом может использоваться контактный гель. Затем на зуб устанавливают активный электрод (на фронтальных зубах – середина режущего края, на премолярах – вершина щечного бугра, на молярах – вершина переднего щечного бугра). Если есть кариозная полость, то электрод помещают на дно полости. Пассивный электрод фиксируют на руке пациента. Сила тока постепенно увеличивается, пока пациент не начнет чувствовать легкое покалывание, или другие ощущения в зубе. После подачи сигнала от пациента подача тока прекращается. Исследования показывают, что после препарирования зубов показатели ЭОД закономерно снижаются – в среднем в 3,7 раза по сравнению с исходными значениями. Это объясняется уменьшением сопротивления твердых тканей за счет сошлифовывания эмали и части дентина. Чем тоньше остается дентинный слой, тем ниже порог электровозбудимости и тем уязвимее пульпа к последующим воздействиям.

Клинически значимым является наблюдение, что пациенты с исходно сниженной реактивностью пульпы (например, при возрастных изменениях или после травм) требуют особо щадящего режима препарирования, даже если витальность формально сохранена.

Вывод.

Данная работа посвящена проблеме термогенеза при препарировании зубов абразивными инструментами и позволяет сформулировать ряд выводов теоретического и практического значения.

Анализ литературы показывает, что препарирование неизбежно сопровождается генерацией тепла вследствие трения в системе «инструмент-ткань» и разрушения твердых структур зуба. Критический порог безопасности составляет повышение температуры в пульпарной камере на 5,5 °C (6 °C). При превышении этого значения развиваются необратимые изменения: вакуолизация одонтобластов, нарушение микроциркуляции, коагуляционный некроз с сосудистой окклюзией.

Остаточная толщина дентина является определяющим фактором теплоизоляции пульпы. Сохранение максимального объема здоровых тканей создает естественный защитный барьер, не компенсируемый искусственными материалами.

На интенсивность термогенеза влияют тип бора, его зернистость и степень износа. Алмазные боры генерируют больше тепла, чем твердосплавные, однако при надлежащем охлаждении различия минимизируются. Критический фактор – износ инструмента: работа тупым бором требует увеличенного давления и ведет к перегреву.

Управляемыми параметрами являются скорость вращения, сила давления и время контакта. Оптимальный режим предполагает высокую скорость, минимальное давление и кратковременный контакт. Интермиттирующее препарирование (3 секунды работы/3 секунды пауза) снижает тепловую нагрузку на 75% относительно непрерывного режима.

Профилактика перегрева включает три компонента:

1) воздушно-водяное охлаждение расходом ≥50 мл/мин с контролем проходимости форсунок;

2) рациональный выбор инструментов и техники;

3) диагностика, применение защитных прокладок и командная работа.

Сохранение витальности пульпы обеспечивает трофику дентина, его регенераторный потенциал, иммунную защиту и чувствительность. Пульпа поддерживает гидростатическое равновесие в дентинных канальцах и предотвращает развитие хрупкости депульпированного зуба

Последствия термического некроза пульпы значительны. Клинические наблюдения указывают на то, что срок функционирования депульпированного зуба редко превышает 8-10 лет. Это обусловлено прогрессирующей потерей упруго-эластических свойств дентина, его дегидратацией, нарушением краевого прилегания реставраций и возрастающей хрупкостью. Витальный зуб при надлежащем уходе функционирует значительно дольше.

Термогенез при препарировании является управляемым процессом. Современная стоматология располагает достаточными средствами для предотвращения термического повреждения: системы охлаждения и четкие клинические протоколы. Основная задача - это систематическое применение имеющихся знаний в клинической практике.

Каждое вмешательство требует учета биологических свойств твердых тканей и пульпы. Понимание анатомических особенностей, в частности минимальной толщины дентина над пульпарной камерой, должно определять тактику препарирования.

Краткий вывод: профилактика термонекроза требует комплексного подхода, сочетающего технические средства и клинические протоколы. Сохранение витальности пульпы обеспечивает оптимальный долгосрочный функциональный результат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Одонтопрепарирование под ортопедические конструкции зубных протезов / под ред. С.Д. И.Ю. Арутюнова, Лебеденко. – М.: Практическая медицина, 2007. – 80 с.: ил.

2) Базикян, Э.А. Стоматологический инструментарий : атлас / Э.А. Базикян. – 3-е изд., стер. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. – 168 с.

3) Справочник по стоматологии / под ред. В.М. Безрукова. – М.: Медицина, 1998. – 656 с.

4) Коэн, С. Эндодонтия. Иллюстрированное руководство по эндодонтии. – Москва: ГЭОТАР-Медия, 2022. – 1040 с.

5) Клинические рекомендации (протоколы лечения) «Кариес зубов» (Кузьмина Э.М., Леонтьев В.К., Максимовский Ю.М., Малый А.Ю., Смирнова Т.А., Боровский Е.В., Вагнер В.Д.). Утверждены Постановлением № 1 Совета Ассоциации «Стоматологическая Ассоциация России» от 30.09.2014, актуализированы 02.08.2018.

6) Лебеденко, И.Ю. Руководство к практическим занятиям поортопедической стоматологии длястудентов 3-го курса / И. Ю. Лебеденко, В. В. Еричев, Б. П. Марков; под ред. И. Ю. Лебеденко. – М.: Практическая медицина, 2012. – 431 с.

7) Лебеденко И.Ю., Каливраджиян Э.С. Ортопедическая стоматология: Учебник. – Москва, ГЭОТАР-Медиа, 2012. – 1027 с.

8) Практическая терапевтическая стоматология: учеб. пособие: в 3 т. / под ред. А.И. Николаева, Л.М. Цепова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : МЕДпресс-информ, 2018. – Т. 1. – 624 с.

9) Практическая терапевтическая стоматология: учеб. пособие: в 3 т. / / под ред. А.И. Николаева, Л.М. Цепова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Москва : МЕДпресс-информ, 2021. – Т. 2. – 1008 с.

10) Николишин, А.К. Современная эндодонтия практического врача. – Полтава, 2003. – 208 с.

11) Пархоменко, А.Н. Практическая значимость износа алмазных стоматологических боров / А.Н. Пархоменко, В.И. Шемонаев, Т.В. Моторкина // Вестник РУДН. Серия: Медицина. – 2010. – № 4. – С. 390-392.

12) Ржанов, Е.А. Сравнительная оценка температурных изменений в пульповой камере при препарировании зубов с помощью твердосплавных и алмазных инструментов под несъемные ортопедические конструкции / Е.А. Ржанов, М.С. Беляева, Т.С. Беляева // Клиническая стоматология. – 2007. – № 4. – С. 82-85.

13) Семенюк, В.М. Стоматология ортопедическая в вопросах и ответах / В.М. Семенюк, В.Д. Вагнер, П.А. Онгоев. – М.: Мед. книга; Н. Новгород: Изд-во НГМА, 2000. – 180 с.

14) Экспериментальная модель неразрушающих температурных воздействий на твердые ткани зуба / Т.Б. Ткаченко, В.В. Маслов, Г.В. Польщиков, Н.Ю. Шевелева // Стоматология. – 2018.

УДК 616.31

МАТЕРИАЛЫ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ БРЕКЕТ-СИСТЕМ

А.Н. Стельмах

Научный руководитель – **Е.В. Сергеев**, ассистент

Ярославский государственный медицинский университет

В работе проанализированы строение, материалы и технологии изготовления современных брекет-систем. Рассмотрены четыре класса материалов: металлические сплавы, керамика, сапфир и полимерные композиции. Изучено влияние методов производства (MIM, CAD/CAM, микроинжекционное формование, литьё под давлением, фрезерование монокристалла) на точность геометрии паза и биомеханику перемещения зубов. Особое внимание уделено преимуществам и клиническим рискам: гальванизм, аллергия, истирание эмали, потеря торкового контроля, выделение бисфенола А. Определены критерии выбора системы под конкретный клинический случай.

Ключевые слова: *брекет-система, брекеты, ортодонтическая дуга, материалы, металл, нержавеющая сталь, кобальт-хром, титановые сплавы, керамика, поликристаллический оксид алюминия, сапфир, монокристаллический оксид алюминия, пластик, полиуретан, технология изготовления, биомеханика, трение, паз, торковый контроль, клинический случай, преимущества, недостатки, гальванизм, аллергия, бисфенол А*

MATERIALS AND MANUFACTURING OF MODERN BRACE SYSTEMS

A.N. Stelmakh

Scientific Supervisor – **E.V. Sergeev**, Assistant

Yaroslavl State Medical University

This article analyzes the structure, materials, and manufacturing technologies of modern brace systems. Four classes of materials are considered: metal alloys, ceramics, sapphire, and polymer composites. The influence of manufacturing methods (MIM, CAD/CAM, microinjection molding, injection molding, and single-crystal milling) on the accuracy of slot geometry and the biomechanics of tooth movement is examined. Particular attention is paid to the advantages and clinical risks, including galvanism, allergies, enamel abrasion, loss of torque control, and bisphenol A release. Criteria for selecting a system for a specific clinical case are defined.

Keywords: *bracket system, braces, orthodontic arch, materials, metal, stainless steel, cobalt-chromium, titanium alloys, ceramics, polycrystalline aluminum oxide, sapphire, monocrystalline aluminum oxide, plastic, polyurethane, manufacturing technology, biomechanics, friction, groove, torque control, clinical case, advantages, disadvantages, galvanism, allergy, bisphenol A*

Актуальность статьи

Выбор брекет-системы в современной ортодонтии это сложная инженерно-клиническая задача, от решения которой напрямую зависят сроки лечения, состояние эмали после снятия аппаратуры и биомеханическая предсказуемость результата. Ключевую роль здесь играют два фактора: материал и конструкция.

Во-первых, знание материаловедческих основ важно для управления силами трения и предотвращения осложнений. Разница в коэффициенте скольжения между сталью и керамикой, риск высвобождения ионов никеля из дешёвых сплавов, что может сопроводится аллергической реакцией, или вероятность скола эмали при снятии брекетов являются рисками клинического приёма. Непонимание физико-химических свойств материала ведёт либо к затягиванию лечения, либо к ятрогенным (непреднамеренно вызванные медицинским вмешательством) повреждениям.

Во-вторых, изготовление правильной конструкции подразумевает точное соответствие геометрии паза и значений торка/ангуляции конкретному клиническому

случаю. Универсальных систем, так же как и одинаковых пациентов, не существует. Брекеты, идеально работающие при протрузии резцов (наклоне зубов в сторону губ, то есть вестибулярно), окажутся бесполезными или даже вредными при выраженной ретрузии (наклоне зубов внутрь, в сторону языка). Без учёта конструкционных особенностей (самолигирование против лигатур, ширина основания для контроля ротации) врач обрекает себя на проблемы с собственной работой, а пациента - на трату времени, риск резорбции корней и других осложнений.

Таким образом, систематизация данных о современных материалах и критериях подбора брекет-системы под определённую клиническую картину является насущной необходимостью для практикующего ортодонта. Данная работа направлена на анализ связи между составом сплава/конструкцией брекета и эффективностью лечения в конкретной клинической ситуации.

Брекет-система – это несъемная ортодонтическая конструкция, которая используется для выравнивания зубов и коррекции прикуса. Она помогает постепенно перемещать зубные единицы в нужное положение за счёт постоянного и точно дозированного давления.

Брекет-система состоит из трех основных компонентов:

1) Брекеты (пластины) – маленькие элементы, которые фиксируются на поверхности зубов с помощью специального стоматологического клея (адгезива). Каждый брекет имеет паз, в который вставляется ортодонтическая дуга, и крылышки, за которые цепляется лигатура. Брекеты могут быть изготовлены из разных материалов: металла, керамики, пластика, сапфира.

2) Ортодонтическая дуга - главный элемент системы. Представляет собой металлическую проволоку, которая соединяет брекеты и служит основным двигателем перемещения зубов. Дуга обладает «памятью формы»: при изгибе она стремится вернуться к исходной форме, оказывая постоянное давление на зубы, постепенно смещая их в нужное положение. Дуги изготавливаются из специальных сплавов, например никель-титановых (NiTi), нержавеющей стали, титан-молибденовых. Они различаются по материалу, форме сечения (круглые, прямоугольные, квадратные) и жёсткости, что подбирается врачом в зависимости от этапа лечения и клинической ситуации.

3) Элементы фиксации дуги – лигатуры, которые фиксируют ортодонтическую дугу в пазах брекетов в традиционных (лигатурных) системах. Могут быть эластичными (резиновыми) или металлическими.

4) Эластичные лигатуры – это маленькие резиновые кольца, которые со временем теряют упругость и требуют замены. Металлические представляют собой тонкую проволоку из медицинской стали, алюмо-бериллиевых сплавов или бронзалюминиевого серебра. В самолигирующих системах дуга фиксируется в пазах автоматически, без использования отдельных лигатур.

Помимо этих составляющих, существуют и вспомогательные элементы, которые так же подбираются под определенный клинический случай: 1. Эластические тяги (эластики) – резиновые кольца, которые создают межчелюстную тягу и корректируют прикус. Различаются по диаметру, силе натяжения, направлению тяги; 2. Пружины – устанавливаются на дуге между брекетами и оказывают точечное давление, например, чтобы раздвинуть или сдвинуть зубы в определённой области; 3. Ортодонтические кольца - металлические полоски, которые надеваются и цементируются на моляры; на наружной стороне кольца расположен замочек-трубка для дуги; 4. Щечные трубки - металлические элементы на кольцах или брекетах последних моляров, куда вставляются концы дуги и фиксируются; 5. Мини-импланты – маленькие титановые винтики в кости, служащие дополнительной опорой/зацепкой.

Дуга системы находится в натяжении. Она фиксируется в пазах брекетов и стремится принять свою первоначальную форму. Усилие передаётся на зуб. Под давлением дуги зуб начинает смещаться в заданном направлении. При этом происходит перестройка костной

ткани: с одной стороны корня рассасывается ткань кости челюсти, с другой - формируется новая ткань, закрепляющая зуб в новом положении.

Ортодонт периодически заменяет дугу или меняет её форму, чтобы постепенно корректировать силу воздействия и адаптировать ткани без травм и перегрузки.

Брекет-системы есть разных видов и предназначений. По типу фиксации дуги подразделяются на:

1) лигатурные – дуга фиксируется к пластинам лигатурами (резинками), которые заменяют по мере изменения прикуса;

2) безлигатурные (самолигирующие) – дуга удерживается встроенным замком, без дополнительных лигатур.

По расположению на зубах:

1) вестибулярные – классическая система, которую все привыкли видеть, фиксируемая к внешней стороне зубов;

2) лингвальные – располагаются с внутренней поверхности зубного ряда, полностью незаметны для окружающих, но сложнее в установке и требуют более длительного привыкания.

В зависимости от материала изготовления:

1) металлические — прочные, эффективны при сложных аномалиях, но заметны на зубах;

2) керамические — менее заметны благодаря цвету, приближенному к цвету зубов, но более хрупкие;

3) сапфировые — прозрачные, практически незаметны на зубах, прочны;

4) пластиковые (полимерные).

Металлические брекет-системы. Виды сплавов, технологии изготовления

А. Нержавеющая сталь. Но в изготовлении брекетов используется аустенитная нержавеющая сталь. Это тип нержавеющей стали с аустенитом в качестве основной кристаллической структуры (гранецентрированная кубическая решётка). Такая структура достигается за счёт добавления стабилизирующих элементов: никеля, марганца и азота. При этом доля хрома составляет не менее 10,5%; никеля – 8-12%; азот - как упрочняющий агент, могут быть добавки углерода (до 0,08%); возможны добавки молибдена (повышает стойкость к кислотам и коррозии), титана или ниобия (защищают от межкристаллитной коррозии). У такой стали есть ряд преимуществ:

1) Немагнитность. В отожжённом состоянии аустенитные стали обычно немагнитны. Однако после холодной прокатки или резкого охлаждения могут частично намагничиваться.

2) Пластичность и удобство обработки. Легко поддаётся резке, гибке, штамповке и сварке без трещин и деформаций.

3) Коррозионная стойкость. Высокая устойчивость к коррозии благодаря содержанию хрома (не менее 10,5%) и других легирующих элементов.

4) Стабильность формы. Сохраняет размеры и геометрию при резких перепадах температур.

5) Температурный диапазон эксплуатации. Сохраняет прочность и пластичность от -200 до +850 °C, отдельные марки выдерживают кратковременное воздействие температур выше 1000 °C.

В ортодонтической стоматологии при изготовлении брекетов из такого типа нержавеющей стали используют марки 316L, 17-4.

Марка 316L, она же Low carbon, что значит «малоуглеродистая» - является самой частой сталью для изготовления литых и фрезерованных брекетов. Буква «L» в названии как раз символизирует о низком содержании углерода, что позволяет брекету поддерживать антикоррозийную устойчивость. Однако в составе присутствует никель, поэтому не всем пациентам подходит.

Марка 17-4 – очень твердый вид нержавеющей стали. Она часто используется в замках самолигирующих систем. При этом обладает высокой упругостью, что позволяет держать дугу жёстко, выдерживая нагрузки. Например, если пациент захотел съесть яблочко, то после приема пищи, дуга останется на месте, и система не нарушится.

Б. Сплавы на основе кобальт-хрома. Кобальт составляет 60-67% металлов всего сплава, обеспечивает высокие механические свойства; доля хрома – 25-30% для придания антикоррозийных свойств и твердости, молибдена - 5,5% для усиления прочности, никеля - до 5% для повышения вязкости и пластичности. Помимо них, в сплав могут добавляться небольшие количества углерода, кремния и азота для снижения температуры плавления, и марганец для увеличения прочности.

Эти брекеты можно термически обрабатывать прямо в клинике. Если врач хочет сделать паз брекета более жёстким для контроля торка, он греет брекет до ~480 °C. Однако они быстрее истираются дугой, так как этот сплав мягче стали в исходном состоянии.

В. Титан и его сплавы (Grade 1-4). Основу таких сплавов составляет собственно титан (около 90%, но зависит от вида сплава); алюминий и ванадий. Есть титановые сплавы, которые были разработаны специально для стоматологии ортодонтической. Им является сплав TMA (Ti-Mo-Zr-Nb/титан-молибден-цирконий-ниобий), содержит около 79% Ti, 11% Mo, 6% Zr, 4% Nb.

Однако лечение на таких брекетах идёт медленнее, потому что силы тратятся на преодоление силы трения, а не на движение зуба. Плюс титан подавляет вибрацию, поэтому ощущения у пациента «ватные», зубы передвигаются нехотя.

У титановых сплавов есть ряд преимуществ. Они обладают хорошей биосовместимостью. Титан не вызывает токсических реакций и крайне редко провоцирует аллергию (в отличие от никеля и некоторых других металлов). Такие сплавы считаются гипоаллергенными. Имеют высокую прочность при малой плотности (около 4,5 г/см³) - конструкции получаются лёгкими и прочными. Низкая теплопроводность обеспечивает комфорт ношения брекетов для пациента, так как отсутствуют резкие температурные ощущения. У сплавов TiNi (с никелем) есть эффект памяти, что позволяет восстанавливать форму после деформации.

Технологии и принципы изготовления металлических брекет-систем.

А. Инжекционное формование порошков (MIM - Metal Injection Molding). Наиболее распространенный в настоящее время метод для брекетов массового спроса. В качестве основы используются металлический порошок и связующие вещества. Порошок практически любых металлов со средним размером частиц 5-20 мкм: стали, никеля, кобальта, титана, меди и так далее. Как правило, в роли связующего материала используются воск, термопластичная смола (составляет 10-20% от веса смеси). Все компоненты смеси тщательно перемешиваются до образования гомогенной смеси (фидстока). Любая даже незначительная ошибка в пропорциях получаемой смеси может негативно отразиться на качестве получаемого изделия.

Фидсток загружается в бункер термопластавтомата (литьевой машины) и при нагревании до 170-200 °C происходит расплавление полимерного связующего с образованием единой массы. Затем производится впрыск под давлением расплавленного фидстока, который заполняет нагретую до 125-145 °C пресс-форму. Впоследствии происходит охлаждение и затвердевание материала под давлением с получением первичной заготовки, которую называют «зеленой». Очень важно не допустить неточностей в расчетах при проектировании и изготовлении пресс-формы. Также важно учитывать усадку изделия, которая в зависимости от связующего вещества составляет до 30% от объема «зеленой» детали и происходит равномерно по всему объему детали.

На следующем этапе из заготовки удаляется связующее вещество. Оно экстрагируется с помощью растворителя или выгорает в печи в атмосфере инертного газа и паров азотной кислоты при температуре 110-140 °C. Полученная заготовка, называемая «коричневой», сохраняет размеры и обладает пористой структурой.

Заключительным этапом является спекание «коричневых» заготовок в вакуумной печи при температурах более 1200 °C. При спекании происходит уплотнение материала за счет слияния частиц и устранения пор. В результате получаются детали с точными заданными размерами и плотностью выше 97% от теоретической плотности материала.

Преимущества MIM-технологии:

1) возможность изготовления деталей сложной формы;

2) использование широкого спектра металлов;

3) высокая плотность и прочность изделий;

4) минимальные отклонения от заданных размеров.

Б. Технология CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing). Это цифровая технология, которая включает компьютерное моделирование и автоматизированное производство.

Сначала врач-стоматолог обследует пациента, используя цифровое сканирование полости рта пациента с помощью интраорального сканера для создания трёхмерной модели зубного ряда. Затем идет проектирование конструкции в программном обеспечении CAD с учётом анатомических особенностей пациента. Завершающий этап - передача данных в CAM-модуль, где конструкция изготавливается на фрезерных станках или с помощью 3D-принтеров.

Преимущества CAD/CAM:

1) высокая точность изготовления, минимизирующая ошибки человеческого фактора;

2) возможность адаптации конструкции к индивидуальным особенностям пациента;

3) сокращение времени лечения за счёт быстрого изготовления конструкций;

4) повышение комфорта для пациента благодаря точному соответствию брекетов анатомии зубного ряда.

В целом, с точки зрения практической ортодонтии, металлические брекеты являются классическим вариантом исправления прикуса и обладают рядом преимуществ.

1) Одним из них является демократичная цена, относительно других видов.

2) Разнообразие видов (лигатурные, самолигирующие, вестибулярные, лингвальные и так далее).

3) В отличие от керамических или пластиковых брекетов, металл не впитывает пигменты из пищи, напитков или курения.

4) Металлические брекеты часто рекомендуются ортодонтами при необходимости точного и прогнозируемого результата, особенно при выраженных аномалиях прикуса.

Ограничения и специфические осложнения:

1) Явление гальванизма. При наличии в полости рта протезов из разнородных металлов слюна выступает в роли электролита и возникает разность потенциалов. Это может индуцировать микротоки, воспринимаемые пациентом как жжение языка, металлический привкус (дисгевзия) и другие осложнения.

2) Иммунологическая реактивность (Никелевый аллергический стоматит). Несмотря на то, что системные реакции редки, локальный ответ десны в виде хронического катарального или гипертрофического гингивита, не купирующегося стандартной гигиеной, может быть обусловлен сенсибилизацией к ионам никеля. В таких случаях альтернативой служат брекет-системы из сплавов на основе титана.

Керамические брекет-системы.

Большинство керамических брекет-систем производится на основе поликристаллического оксида алюминия (Al_2O_3), который состоит из множества спекшихся между собой кристаллических зёрен Al_2O_3, разделённых межзёренными границами. Наличие этих границ приводит к рассеиванию света, из-за этого поликристаллические брекеты не бывают полностью прозрачными. Они обладают полупрозрачностью и матовостью. Однако можно подобрать оттенок, имитирующий цвет родного зуба, благодаря чему керамические брекеты становятся на зубах чуть менее заметными, в отличие от металлических. Материал довольно износостойкий, так как межзерные границы выполняют роль естественных

барьеров для распространения микротрещин, и когда трещина доходит до границы зерна, то ее энергия просто рассеивается, и дальше дефект не идет. Это создает меньший риск перелома крыльев брекета при манипуляциях с лигатурами, обеспечивает устойчивость к жевательным нагрузкам и давлению дуги, а также при употреблении горячей пищи и напитков не деформируется.

Нанокерамика. Используется, например, в брекетах Blesk от Smart. Обладает высокой износостойкостью.

Армированная керамика. В состав добавляется диоксид кремния. Пример – брекеты GAC Mystique от GAC.

Но стоит знать, что у всех материалов и тканей есть своя твердость. Твердость по Кнупу (КНМ) – это метод исследования твердости определенных структур (и твердых тканей зуба в том числе) с помощью алмазного индентора в виде пирамиды с ромбом в основании. Так, для керамических брекетов КНМ будет иметь значение 2400-2450, а эмаль зуба - 343. Поэтому при прямом окклюзионном контакте есть риск абразивного износа эмали зубов-антагонистов.

Керамические брекеты бывают цельнокерамическими, когда все элементы, кроме дуги, изготовлены из керамики, и комбинированными, когда тело брекета состоит из керамики, а паз или замок - из металлического сплава. Первые имеют лучшую эстетику, но стоимость их выше. Стоит упомянуть, что дуги, которые соединяют брекет, изготавливаются из сплавов металлов.

Кроме истирания эмали зубов-антагонистов можно выделить еще несколько недостатков:

1) На поверхности полупрозрачной керамики может скапливаться окрашенный налет, что визуально будет менять оттенок брекета.

2) Не рекомендовано ставить керамические брекеты на лингвальную поверхность зуба, так как это может повлечь за собой сколы как эмали, так и брекета.

3) Есть риск перелома брекета при процедуре снятия. Например, во время захвата щипцами. В отличие от металлического брекета, который немного деформируется при сжатии щипцов, нарушая адгезионную связь с эмалью зуба, керамика передает эту нагрузку на эмаль.

4) Не стоит забывать и про коэффициент трения в системе «брекет-дуга». Даже после тщательной обработки брекета, поверхность обладает шероховатостью, по сравнению со сплавами. Из-за этого коэффициент трения будет увеличиваться. Для поликристаллической керамики он выше, чем для монокристаллической. Для решения этой проблемы производители предложили гибридные конструкции, состоящие из керамического тела брекета и металлического паза, который впрессован или вклеен к основу.

Метод изготовления керамических брекетов. Инжекционное формование керамики (CIM – Ceramic Injection Molding).

Такой метод является основным для массового выпуска поликристаллических брекетов. Принцип изготовления включает в себя смешивание порошка Al_2O_3 с полимерным связующим (биндером), затем нагрев смеси до текучего состояния и впрыск в пресс-форму под давлением. После формовки биндер выжигается в печи (дебайндинг), а заготовка подвергается спеканию, нагреву без расплавления до высокой температуры, обеспечивающей сплавление зёрен Al_2O_3 в монолитный конгломерат. Преимущество метода – это возможность изготовления изделий сложной геометрии с гладкой поверхностью в крупносерийных масштабах. Недавние исследования в области микрокерамического инжекционного формования (μ-CIM) демонстрируют возможность получения брекетов с плотностью, приближающейся к теоретическому пределу для оксида алюминия, что положительно сказывается на прочностных характеристиках.

Сапфировые брекеты

Несмотря на их громкое и красивое название, с драгоценным камнем они имеют мало общего. Они будут являться разновидностью керамических брекетов.

Сапфировые брекеты изготавливаются из монокристаллического оксида алюминия (Al_2O_3) – искусственно выращенного сапфира. Главным отличием от керамических (поликристаллических) брекетов является отсутствие межзерных границ. Материал представляет собой единую, непрерывную кристаллическую решетку. Отсутствие границ зёрен означает отсутствие центров рассеивания света. В поликристаллическом материале свет, проходя через границы между отдельными кристаллитами, многократно преломляется и рассеивается, что придаёт брекету матовый или полупрозрачный оттенок. Монокристалл лишён этих внутренних оптических барьеров, благодаря чему сапфировый брекет пропускает свет практически без искажений. Показатель преломления монокристаллического сапфира составляет около 1,76-1,78, что достаточно близко к показателю преломления естественной эмали (примерно 1,62), и это обеспечивает минимальный визуальный контраст на поверхности зуба. Как следствие, сапфировые брекеты являются наиболее эстетичным вариантом среди всех существующих вестибулярных систем.

Однако, по закону равновесия, сапфировые брекеты хоть и обрели хорошие эстетические качества, потеряли прочность. В монокристалле отсутствуют такие же барьеры, как и у поликристаллических структур, и возникшую трещинку ничто не остановит. Поэтому сапфировый брекет не терпит технических погрешностей при манипуляциях с ним.

Искусственный сапфир по шкале твердости Мосса составляет 9. Для сравнения, алмаз по этой же шкале имеет значение 10. поэтому риски абразивного истирания эмали зубов-антагонистов такой же, как и у керамических брекетов.

Риск перелома брекета или повреждения эмали при процедуре снятия такой же, как и у поликристаллической керамики.

Преимущества сапфировых брекетов:

1) Абсолютная прозрачность делает такие брекеты максимально незаметными на поверхности зуба. Такое свойство особенно важно для пациентов с повышенными эстетическими требованиями.

2) Пониженное трение в пазе, по сравнению с поликристаллической структурой керамики. Это свойство обеспечивает более эффективное скольжение дуги, и, как следствие, более предсказуемую биомеханику зубов.

3) В отличие от пластиковых и, в меньшей степени, поликристаллических брекетов, сапфир непористый. А значит, отсутствуют микропоры, пищевые красители и налет проникнуть не смогут, следовательно, они сохранят свою прозрачность на протяжении всего времени ортодонтического лечения. Зубной налет легко сможет удалиться при ежедневной гигиене полости рта.

4) Оксид алюминия химически стабилен в агрессивной среде полости рта, он не подвержен коррозии, не вызовет аллергических реакций, как никель или другие компоненты металлических сплавов.

Механизм изготовления сапфировых брекетов - фрезерование монокристалла.

Исходным сырьём служит высокочистый порошок оксида алюминия. Кристаллизация происходит при экстремально высоких температурах – порядка 2050 °C, что близко к температуре плавления Al_2O_3. Процесс ведётся методом направленной кристаллизации из расплава, при котором формируется крупный монокристаллический блок – буля. Скорость роста кристалла очень низка, а требования к чистоте исходного сырья и стабильности температурного режима, наоборот, высоки. Любое отклонение приводит к появлению дефектов кристаллической решётки, внутренних напряжений или включений, делающих материал непригодным для дальнейшей обработки.

В отличие от поликристаллических брекетов, формуемых методом инжекции, сапфировые брекеты вытачиваются из цельного кристалла. Учитывая исключительную твёрдость материала (9 по Моосу), механическая обработка возможна только с применением алмазного инструмента или ультразвуковой резки. Процесс идёт медленно, износ режущего

инструмента высок, а стоимость обработки составляет значительную долю в себестоимости конечного изделия.

После механической обработки брекет накапливает внутренние напряжения и поверхностные микротрещины, возникшие при контакте с режущим инструментом. Обязательным этапом является высокотемпературный отжиг, в ходе которого происходит релаксация внутренних напряжений и частичное «залечивание» поверхностных дефектов кристаллической решётки. Завершающий этап – тщательная полировка, обеспечивающая гладкость поверхности и характерный стеклоподобный блеск. Закруглённая форма каждого элемента, достигаемая при финишной обработке, минимизирует травмирование слизистой оболочки щёк и губ в адаптационном периоде.

Пластиковые брекеты

Основу подавляющего большинства пластиковых брекетов составляют два класса полимеров: поликарбонат и полиуретан. Каждый из них обладает характерным профилем физико-химических и механических свойств, определяющим клиническое поведение готового изделия.

1) Поликарбонат.

Поликарбонат представляет собой аморфный термопластичный полимер, получаемый реакцией бисфенола А с фосгеном. Его ключевые характеристики, релевантные для ортодонтического применения, включают:

А. Оптические свойства. Поликарбонат обладает высокой светопроницаемостью. Это обеспечивает приемлемую эстетичность, хотя и уступает сапфировым и качественным керамическим системам. Важно отметить, что со временем поликарбонат склонен к пожелтению под действием пищевых красителей, что постепенно сводит первоначальный эстетический эффект на нет.

Б. Механические характеристики. Поликарбонат демонстрирует высокую ударную вязкость – свойство, важное для предотвращения переломов крыльев при манипуляциях с лигатурами и окклюзионных нагрузках. Однако этот же материал обладает сравнительно низким модулем упругости и склонностью к пластической деформации под постоянной нагрузкой. С клинической точки зрения это означает, что паз поликарбонатного брекета может постепенно «раскрываться» под действием напряжений, создаваемых активированной дугой, что приводит к непрогнозируемой потере торкового контроля .

В. Однако главным недостатком поликарбонатов на основе бисфенола А является потенциальная токсичность мономера. Бисфенол А (BPA) является известным эндокринным дизраптором (веществом, которое способно вмешиваться в работу эндокринной системы; а бисфенол обладает свойствами, схожими с эстрогеном, и, связываясь с гормонами и их рецепторами, нарушает гормональный баланс), хотя степень его высвобождения из готовых полимерных изделий в условиях полости рта остаётся под вопросом.

2) Медицинский полиуретан.

Полиуретаны представляют собой обширный класс полимеров, свойства которых могут варьироваться в широких пределах в зависимости от химической природы исходных компонентов (полиолов и изоцианатов). В ортодонтии находят применение как термопластичные, так и термореактивные полиуретановые композиции.

Полиуретановые брекеты характеризуются более высокой эластичностью по сравнению с поликарбонатными. Это свойство может быть как преимуществом (меньшая хрупкость, лучшая амортизация окклюзионных ударов), так и недостатком (ещё более выраженная потеря торкового контроля при длительном нагружении).

Также, согласно данным сравнительных исследований, полиуретановые брекеты демонстрируют меньшую остаточную деформацию паза после циклических торковых нагрузок, чем поликарбонатные аналоги, однако всё ещё значительно уступают по этому показателю металлическим системам.

К клиническим преимуществам данного вида брекетов относятся:

1) Прозрачность или полупрозрачность обеспечивает меньшую заметность конструкции на зубах, по сравнению с металлом. Но в эстетическом плане все равно уступают сапфировым брекетам.

2) Полимерные брекеты менее твердые и теплопроводные, в отличие от металла и керамики, что позволяет пациенту избавиться от ощущения инородного тела во рту во время периода адаптации, а также уменьшает риски травматизации слизистой оболочки губ и щек.

3) Как и керамические, и сапфировые брекеты, пластиковые так же не вызывают контактных аллергических реакций в полости рта.

4) Снятие таких брекетов проходит гораздо менее травматично, нежели керамических, так как адгезивная связь разрушается на границе «клей-основание» без передачи напряжений на эмаль.

5) Экономическая доступность.

Из недостатков пластиковых брекетов, помимо потенциального выделения токсичного бисфенола А, нужно выделить:

1) Низкая механическая прочность и износостойкость. Полимеры подвержены абразивному износу, в том числе и во время чистки зубов. При неосторожном лигировании крылья брекетов могут деформироваться или ломаться, поверхность паза теряет свою гладкость. Это в свою очередь увеличивает трение, замедляя процесс перемещения зубов.

2) Паз брекета постепенно «расползается», теряя способность точно передавать торковые и ангуляционные параметры дуги на зуб. Пластиковые брекеты без металлического паза теряют торковую стабильность уже после однократного приложения нагрузки, причём степень потери варьирует от 5 до 28,5% в зависимости от состава материала.

3) Полимерные материалы адсорбируют на себе пищевые красители. Это со временем приведет к изменению цвета брекетов, нарушая эстетику.

4) Нельзя использовать в тяжелых клинических случаях.

Технология производства пластиковых брекетов.

Основной метод изготовления пластиковых брекетов – горячее литье под давлением. Для этого заготавливается гранулированный полимер или смесь с армирующими наполнителями. В термопластавтомате полимер нагревается и переходит в жидкое состояние. Далее расплавленный материал впрыскивается в прецизионную пресс-форму под давлением. Эта форма и будет определять геометрию будущего брекета. С учетом усадочных характеристик полимера, производят контролируемое охлаждение. Пластик застывает, принимая нужную постоянную форму. Готовый брекет извлекается из формы и подвергается дальнейшей обработке.

Брекеты тщательно полируют, чтобы добиться гладкости и округлой формы. Это снижает риск травматизации слизистой оболочки полости рта.

Сложность процесса обусловлена миниатюрными размерами брекета и жёсткими требованиями к геометрии паза. Допуски на размеры паза должны укладываться в микроны, что предъявляет определенные требования к качеству изготовления пресс-форм и стабильности технологического процесса.

Ключевое технологическое противоречие заключается в том, что полимеры с наилучшими механическими характеристиками (высокий модуль упругости и низкая ползучесть) часто обладают плохой текучестью в расплавленном состоянии, что затрудняет их формование. Производители вынуждены искать компромисс между реологическими свойствами материала на стадии переработки и механическими характеристиками готового изделия. Это одна из причин, по которой пластиковые брекеты долгое время уступали по качеству керамическим и металлическим аналогам.

Вывод

Проведённый анализ материалов и технологий изготовления современных брекет-систем показывает, что выбор конкретной конструкции не может быть универсальным и тем более основываться только на эстетических предпочтениях пациента. Каждый из четырёх

рассмотренных классов материалов (металлические сплавы, керамика, сапфир, полимеры) имеет строго очерченную область клинической эффективности и сопряжён с определёнными рисками.

Металлические брекеты, особенно из аустенитной нержавеющей стали марок 316L и 17-4, остаются золотым стандартом для сложных аномалий прикуса благодаря предсказуемому контролю торка и ангуляции, минимальной потере геометрии паза в процессе лечения и приемлемому коэффициенту трения. Их главные ограничения связаны с потенциальной аллергической реакцией на никель и гальваническими эффектами, что требует обязательного сбора аллергологического анамнеза. Технологии MIM и CAD/CAM сегодня позволяют добиться высокой точности паза.

Керамические и сапфировые системы - это выбор в пользу эстетики, но с двумя принципиальными различиями. Поликристаллический оксид алюминия (керамика) обладает вязкостью за счёт межзёренных границ, что снижает риск перелома крыльев, но даёт более высокое трение и рассеивание света (полупрозрачность). Монокристаллический сапфир обеспечивает максимальную эстетику и лучшее скольжение дуги, однако хрупок и требует идеальной техники снятия, чтобы не повредить эмаль. Общая для обоих материалов проблема - абразивный износ антагонистов при прямом окклюзионном контакте (твёрдость по Кнупу 2400–2450 против 343 у эмали) — делает их нежелательными у пациентов с глубоким резцовым перекрытием и бруксизмом без защиты.

Пластиковые (полимерные) брекеты, несмотря на комфорт, низкую травматичность снятия и гипоаллергенность, имеют слишком узкие показания. Постепенная деформация паза (особенно у поликарбоната), потеря торкового контроля, окрашивание и потенциальный риск высвобождения бисфенола А исключают их применение в сложных случаях и при длительном лечении. Они могут рассматриваться лишь как временное или бюджетное решение при малых аномалиях у взрослых с низкими жевательными нагрузками и средними (или высокими) эстетическими требованиями.

С практической точки зрения, ключевым выводом работы является следующее: ни один материал не даёт одновременно идеальной эстетики, минимального трения, высокой прочности и полной безопасности для эмали. Поэтому стратегия ортодонта должна строиться на сопоставлении трёх факторов: клинической картины (тяжесть аномалии, состояние антагонистов, аллергологический статус), биомеханических свойств выбранного брекета (точность паза, риск деформации, коэффициент трения) и реалистичных ожиданий пациента. Современные гибридные решения (керамическое тело с металлическим пазом) и цифровое протоколирование CAD/CAM позволяют частично сгладить некоторые недостатки, но окончательная ответственность за результат лежит на враче, который должен понимать физико-химическую природу каждого компонента системы, и изготовителе брекетов.

С технической точки зрения, брекет-система – это прецизионный инструмент, и её клиническая надёжность закладывается ещё на этапе производства. Для каждого класса материалов критически важно строгое соблюдение состава и технологических режимов.

В металлических сплавах отклонение пропорций легирующих элементов (хрома, никеля, кобальта) приводит либо к потере коррозионной стойкости, либо к хрупкости, либо к неконтролируемой деформации паза под нагрузкой. Экономия на чистоте сырья означает непредсказуемую биомеханику.

Для керамики и сапфира ключевой параметр – это отсутствие внутренних дефектов (пор, включений, неоднородной структуры зерен). Даже микроскопический дефект в монокристалле или неравномерный размер частиц в поликристаллической массе превращаются в точки роста трещин, что ведёт к внезапному перелому брекета.

В пластиковых системах главным является молекулярная масса полимера и полнота полимеризации. Дешёвые материалы с низкой молекулярной массой быстро текут под нагрузкой – паз «расползается», теряется торковый контроль, и лечение затягивается.

Итог для технолога и врача одинаков: отклонение в составе сплава на доли процента, неконтролируемая пористость после спекания или использование некачественного полимера неизбежно оборачиваются клиническими потерями – замедлением движения зубов, поломкой брекетов, травмой эмали при снятии или невозможностью завершить лечение в срок. Успех ортодонтического лечения начинается не в кабинете, а на входном контроле сырья у производителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Стоматологическое материаловедение: учебник / Э.С. Каливраджиян, Е.А. Брагин, И.П. Рыжова [и др.]. - Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2023. - 560 с.

2) Каплан, Д. Б. Ортодонтия. Практическое руководство / Д. Б. Каплан; под ред. С.В. Текучевой, М.А. Колесовой. – Москва: Свет Знаний, 2024. – 320 с.

3) Клёмин, В.А. Пропедевтика ортодонтии: учебник / В.А. Клёмин [и др.]; под ред. В.А. Клёмина. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2025. – 288 с.

4) MIM-технология в ортодонтии: история, этапы, преимущества: офиц.сайт. – URL: https://orthodontia.ru/library/mim/?ysclid=mnppc827k3905882743 (дата обращения: 08.04.2026)

5) Персин, Л. С. Брекет-системы. Современный взгляд: учебное пособие / Л.С. Персин, А.Б. Слабковская, Е.И. Мержвинская. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2022. – 128 с.

6) Персин, Л.С. Ортодонтия. Диагностика илечение зубочелюстно-лицевых аномалий идеформаций: учебник / Л.С. Персин. – 4-еизд., перераб. и доп. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2022. – 640 с.

7) Поюровская, И.Я. Стоматологическое материаловедение: учебное пособие для студентов медицинских вузов / И.Я. Поюровская. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 185, с.

8) Стоматологическое материаловедение: учебник / С.Н. Разумова, И.С. Макеева, Н.В. Носова [и др.]; под ред. С.Н. Разумовой. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2024. – 184 с.

9) Саватеев, Ю.В. Зуботехническое материаловедение с курсом охраны труда и техники безопасности: учебное пособие для медицинских училищ и колледжей / Ю.В. Саватеев. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2020. – 168 с.

10) Токаревич И. В. Инновации в ортодонтии: учебное пособие / И.В. Токаревич, Л.В. Кипкаева, Т.В. Горлачева [и др.]; Министерство здравоохранения Республики Беларусь, Белорусский государственный медицинский университет. – Минск: БГМУ, 2022. – 100 с.

11) Хорошилкина, Ф. Я. Ортодонтия. Дефекты зубов, зубных рядов, аномалии прикуса, морфофункциональные нарушения в челюстно-лицевой области и их комплексное лечение: учебное пособие / Ф.Я. Хорошилкина. – Москва: Медицинское информационное агентство, 2006. – 541 с.

УДК 616.314-089.23-77

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭНДОПРОТЕЗИРОВАНИЯ И ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВЫХ ПРОТЕТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ: ТРЕБОВАНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

А.В. Фролова

Научный руководитель - **Д.А. Русанова**, канд. мед. наук, ассистент

Ярославский государственный медицинский университет

Был проведен анализ современных требований, классификаций и основных перспектив развития материаловедения для эндопротезирования и челюстно-лицевых протетических конструкций. Ретроспективный анализ печатных изданий и электронных ресурсов, посвященных данным вопросам, выявил, что на данный момент выбор материала является компромиссом между биосовместимостью, механикой и долговечностью.

Ключевые слова: *эндопротезирование, челюстно-лицевые протетические конструкции, ортопедия, материаловедение*

MATERIALS FOR ENDOPROSTHETICS AND MAXILLOFACIAL PROSTHETIC STRUCTURES: REQUIREMENTS, CLASSIFICATION, PROSPECTS

A.V. Frolova

Scientific Supervisor – **D.A. Rusanova**, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Medical University

An analysis of modern requirements, classifications, and key prospects for the development of materials science for endoprosthetics and maxillofacial prosthetic structures was carried out. A retrospective analysis of printed publications and electronic resources devoted to these issues revealed that at present, the choice of material is a compromise between biocompatibility, mechanics, and durability.

Keywords: *endoprosthetics, maxillofacial prosthetic structures, orthopedics, materials science*

Введение. По данным отечественных и зарубежных исследователей существует множество материалов для изготовления ортопедических конструкций и челюстно-лицевого протезирования, различающихся по своим характеристикам и параметрам. Наличие широкого выбора и непрерывное развитие индустрии материаловедения не означает, что существует идеальный и универсальный материал. Так же данная тема актуальна в период военных конфликтов, так как искусственно возрастает спрос не только на внутриротовые конструкции, но и протезы носа, глазницы, ушей и челюстных костей.

Цель исследования. На основании литературных данных и клинического опыта проанализировать современные требования, существующие классификации и основные перспективы развития материаловедения для эндопротезирования и челюстно-лицевых протетических конструкций.

Материалы и методы. Проведен ретроспективный анализ печатных изданий и электронных ресурсов, посвященных вопросам материаловедения в области современной ортопедии и челюстно-лицевой хирургии.

Результаты и обсуждение. Независимо от области применения все материалы, не только в ортопедии, но и в стоматологии в целом, должны соответствовать ряду требований, которые регламентируются международными стандартами:

1. Биосовместимость. Не должно возникать аллергических, токсических, канцерогенных и иммунных реакций. Однако даже "золотой стандарт" – сплав титана, в 0,6% случаях, вызывает реакцию гиперчувствительности.

2. Коррозионная стойкость;

3. Биоинертность/Биоактивность;

4. Прочность;

5. Износостойкость;

6. Стерилизуемость;

7. Эстетичность.

Классификация. Все материалы для эндопротезировния и челюстно-лицевых протетических конструкций можно разделить на несколько основных групп:

1. Металлы и сплавы;

2. Полимеры;

3. Керамика и оксиды.

К первой группе относится "золотой стандарт" – титан и его сплавы (ВТ1-0, ВТ6). Он нашел широкое применение в ортопедии благодаря своим повышенным качественным характеристикам, таким как биологическая инертность, обусловленная способностью образовывать на своей поверхности защитный оксидный слой-диоксид титана, высокая удельная прочность, химическая стойкость к агрессивным средам полости рта, низкий коэффициент усадки при литье. Эти свойства сплава титана сделали его востребованным материалом в стоматологии. Он используется для имплантации, вкладок, цельнолитых и облицованных коронок, мостовидных протезов и многого другого [1].

Сплав ВТ1-0: Ti (99,24-99,7%), с примесями железа (до 0,25%), кремния (до 0,1%), углерода (до 0,07%), азота (до 0,04%), кислорода (до 0,2%) и водорода (до 0,01%)

Предел прочности на растяжение 590 МПа, модуль упругости 110 ГПа в 5–7 раз выше, чем у кости, что может привести к «стресс-шилдингу» и атрофии костной ткани [6].

Сплав ВТ-6: Ti (84,45-91,2%), алюминий 5,3-6,8%, ванадий 3,5-5,3%, железо, кислород, азот, углерод, водород

Предел прочности 1100–1300 МПа, модуль упругости 110–120 ГПа. Прочность в 2 раза выше, чем у чистого титана; К недостаткам данного сплава можно отнести потенциальную токсичность ванадия при износе [2].

Также к этой группе мы можем отнести сплавы на основе кобальта, а конкретно кобальт-хром-молибденовые. Co 58,9–69,5%, Cr 27,0–30,0%, Mo 5,0–7,0%

Этот сплав обладает высокой твердостью и износостойкостью, коррозионной устойчивостью, однако наличие в сплаве вредных примесей, таких как сера и фосфор, способствует ограничению применения данного материала, а также высокий модуль упругости (выше, чем у титана).

Благородные сплавы на основе золота и платины, обладая хорошими физико-механическими характеристиками, не могут широко использоваться в ортопедии из-за своей высокой стоимости [5].

Во вторую группу входят акриловые пластмассы, которые являются сополимерами метилметакрилата, которые модифицируют для повышения ударной прочности (добавление каучука) и усталостной устойчивости. Это базовый материал для съемных протезов, которому, по мнению некоторых авторов, еще нет альтернативы. Акриловые пластмассы имеют ряд существенных недостатков, таких как наличие остаточного мономера, пористость, усадка при полимеризации, гигроскопичность, склонность к пигментации и хрупкость.

Также сюда можно отнести нейлон, который является полиамидным термопластом. Материалы типа Vertex ThermoSens, Valplast. Является гипоаллергенным, за счет отсутствия мономера, гибким и эстетичным, что позволяет использовать его для изготовления полных и частичных зубных протезов, а также кламмеров к ним. Но из-за его эластичности

существенным недостатком является передача жевательной нагрузки на десну, что ускоряет атрофию костной ткани. Возникают сложности с ремонтом и перебазировкой протеза, со временем может появиться пигментация.

Acry-Free-это современный материал на основе термопластичных акриловых смол, не содержащий свободного мономера (метилметакрилата). Он был разработан израильской компанией PerflexLtd как гипоаллергенная и более эстетичная альтернатива традиционному акрилу и нейлону

К третьей группе относится диоксид циркония. Он обладает высокими эстетическими показателями, биосовместимостью, износостойкостью, жесткостью, прочностью, невосприимчивостью к нагрузкам на изгиб (для большей стойкости его обогащают и стабилизируют алюминием и иттрием). Именно благодаря своей прочности и оптическим свойствам, близким к эмали зуба его используют для изготовления коронок преимущественно на фронтальную группу зубов. К недостаткам можно отнести низкотемпературную деградацию и сложность обработки.

К современным стоматологическим материалам предъявляются высокие требования, поэтому остро стоит вопрос о разработке новых или усовершенствовании уже имеющихся.

Например, для снижения модуля упругости разрабатываются β-титановые сплавы с низким модулем упругости, сплав титана с ниобием, танталом и цирконием-модуль упругости 40-60ГПа, что позволит минимизировать «стресс-шилдинг».

Также разрабатываются композиты на основе сверх-высокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), пригодные для 3D-печати. СВМПЭ с добавлением 20% полипропилена - это позволяет перерабатывать материал методом послойного наплавления.

Проблема развития воспалительных осложнений и недостаточной остеорегенерации после протезирования решается путем модификации поверхности имплантов, а не заменой базового материала, как, например, у имплантатов компании «Straumann». Линия имплантатов SLActive – инновационная технология, которая позволяет обеспечивать максимально быструю остеоинтеграцию благодаря своей гидрофильной поверхности.

Учеными НИТУ МИСИС разработано покрытие на основе оксида титана с добавлением кальция, фосфора, кремния и бора, в которое методом ионной имплантации введены частицы меди и серебра. Invitro это покрытие показало 100% бактерицидную эффективность против золотистого стафилококка и кишечной палочки при сохранении биосовместимости. Однако возникает проблема контроля скорости высвобождения ионов, которая влечет за собой возможную токсичность для тканей полости рта.

Выводы:

1. На данный момент выбор материала для эндопротезирования и челюстнолицевых протетических конструкций является компромиссом между биосовместимостью, механикой и долговечностью.

2. В настоящее время активно ведутся исследования в области материаловедения, что дает нам возможность преодолеть ограничения в существующих материалах, не путем создания новых, а путем усовершенствования имеющихся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Влияние физико-химических свойств поверхности титановых имплантатов и способов их модификации на показатели остеоинтеграции (часть 1. Основные показатели остеоинтеграции в зависимости от свойств поверхности имплантата) / Г.А. Воложин и др. // Институт стоматологии. – 2009. – № 3. – С. 81-83.

2) ГОСТ Р ИСО 5832-3–2014. Имплантаты для хирургии. Металлические материалы. Ч. 3. Сплав титана с 6% алюминия и 4% ванадия (деформируемый сплав). – М.: Стандартинформ, 2015. [Нормативный документ, регламентирующий состав сплава ВТ6/Ti-6Al-4V].

3) Галимзянова, Р.Ю. Биорезорбируемые конструкционные материалы и изделия для остеосинтеза: учебное пособие. – Казань: Школа, 2024. – 90 с.

4) Кирсанов, Д.В. Современные покрытия имплантатов в травматологии и ортопедии. Анализ экспериментальных и клинических исследований (обзор литературы) / Д.В. Кирсанов, В.А. Кирсанов, С.Я. Пичхидзе // Современные вопросы биомедицины. – 2024. – Т. 8, № 4 (30). – URL: https://svbskfmba.ru/arkhiv-nomerov/2024-4/kirsanov2024?ysclid=mqqekj3h2z570831374

5) Шулятникова, О.А. Разработка, оптимизация материалов и конструкций для ортопедического этапа лечения пациентов с переломами и приобретенными дефектами челюстных костей: специальность 14.01.14 «Стоматология»: дис. … канд. мед. наук / [Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера]. – Пермь, 2017. – 145 с.

6) Материалы для изготовления дентальных имплантатов (обзор литературы) / О.О. Янушевич, Н.И. Крихели, П.Ю. Перетягин [и др.] // Медицинский алфавит. – 2024. – № 1. – С. 7–15.

УДК 678

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ЖЁСТКОГО КАУЧУКОВОГО СЛОЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ АКТИВНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ УСИЛЕНИЯ

Д.А. Фахрутдинова, И.А. Хачатурова, Ю.А. Гамлицкий

Научный руководитель – **И.А. Хачатурова,** канд. техн. наук

МИРЭА - Российский технологический университет

Исследование было направлено на верификацию фундаментального положения современной физики полимеров о существовании в наполненных системах жёсткого каучукового слоя с ограниченной молекулярной подвижностью.

***Ключевые слова**: эластомерный материал, резина, усиление резин, резинотехнические изделия*

DETERMINATION OF THE VOLUME FRACTION OF A RIGID RUBBER LAYER NEAR THE SURFACE OF AN ACTIVE FILLER USING THE REINFORCEMENT THEORY

D.A. Fakhrutdinova, I.A. Khachaturova, Yu.A. Gamlitsky

Scientific Supervisor – **I. A. Khachaturova,** Candidate of Technical Sciences

MIREA – Russian Technological University

The study was aimed at verifying the fundamental concept of modern polymer physics regarding the existence of a rigid rubber layer with limited molecular mobility in filled systems.

***Keywords**: elastomeric material, rubber, rubber reinforcement, industrial rubber products*

Одним из ключевых компонентов резин, влияющим на выходные характеристики изделий, является наполнитель. Главной задачей при разработке составов наполненных эластомерных материалов с учетом ужесточающихся требований, предъявляемых к современным шинам и РТИ, наряду с обеспечением заданной себестоимости выпускаемой продукции, является повышение уровня их эксплуатационных характеристик.

Теплообразование и гистерезисные потери могут негативно влиять на долговечность и эффективность массивных шин двойного назначения. Введение инновационных наполнителей в эластомерные материалы может помочь снизить теплообразование и повысить усталостную долговечность шин, обеспечивая требуемую ходимость при динамических нагрузках.

Данное исследование было направлено на верификацию фундаментального положения современной физики полимеров о существовании в наполненных системах жёсткого каучукового слоя с ограниченной молекулярной подвижностью. В качестве объектов исследования были выбраны серии рецептур, включающие контрольный образец без наполнителя и смеси с прогрессивно возрастающим содержанием технического углерода марки N-330. Все рецептуры разрабатывались с ориентацией на типовые составы, применяемые в реальном производстве резинотехнических изделий (РТИ) и шинных резин, что обеспечивает практическую значимость полученных данных.

Ключевым варьируемым фактором выступила природа каучуковой матрицы, определяющая её склонность к кристаллизации:

1) Кристаллизующийся синтетический изопреновый каучук (СКИ-3), выбран с целью исследования взаимодействия наполнителя с упорядоченной полимерной фазой.

2) Некристаллизующийся статистический сополимер бутадиена и стирола (СКМС-30-АРКМ), представляющий класс аморфных эластомеров. Его нерегулярная структура позволяет изучить влияние наполнителя исключительно на молекулярную динамику в высокоэластическом состоянии.

Для каждой из выбранных каучуковых основ была реализована стратегия системного варьирования степени наполнения. Серия рецептур включала контрольный (ненаполненный) вулканизат для установления реперных свойств ненаполненной матрицы и вулканизаты с прогрессивно возрастающей массовой долей технического углерода марки N-330. Содержание наполнителя было обусловлено целью охватить как области слабого, так и сильного взаимодействия «полимер-наполнитель», что является необходимым условием для корректного применения аналитических моделей усиления. Испытания проводили растяжением образцов-лопаток. Записывали зависимость условного напряжения от степени растяжения.

Размеры (объёмная доля) каучуковой матрицы в псевдостеклообразном состоянии вблизи поверхности частиц наполнителя определяли на основе проведённых экспериментов и формул, полученных в теории усиления [1, 2]. Упругие свойства каучуковой матрицы описывали потенциалом Бартенева – Хазановича [3]. Исходя из этого, свойства наполненной резины подчиняются потенциалу Огдена [4]. Обработка экспериментальных данных показала, что в исследованных системах везде присутствует каучуковая матрица в псевдостеклообразном состоянии, размеры которой зависят от типа каучука и величины деформации, при которой определяли размеры слоя.

Полученные результаты (упругие потенциалы) могут быть использованы при расчётах РТИ и шин методом конечных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Гамлицкий, Ю.А. Наномеханика явления усиления наполненных эластомеров // Каучук и резина. – 2017. – № 5. – С. 308–317

2) Каблов, В.Ф. Физика и механика армированных пластиков и резинокордных композитов: монография / В.Ф. Каблов, Ю.А. Гамлицкий, В.Н. Тышкевич // Волгоград: ВПИ ВолгГТУ, 2020. – 472 с.

3) Бартенев, Г.М. О законе высокоэластичных деформаций сеточных полимеров / Г.М. Бартенев, Т.Н. Хазанович // Высокомолек. соед. – 1960. – Т.2, № 1. – С.20.

4) Ogden, R.W. Large deformation isotropic elasticity - on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids // Proc. Roy. Soc. London. A. – 1972. – Vol. 326. – P. 565.

5) Кандырин, К.Л. Связи между эластомером и наполнителем. Какие и зачем? / К.Л. Кандырин // Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов: сборник трудов 28-го международного симпозиума. г. Москва, 15-19 октября 2018 г.. – М.: НПКЦ ВЕСКОМ, 2018. – С. 32-39.

6) Сканирующая зондовая микроскопия эластомеров с минеральными наполнителями / Х.Х. Валиев, Ю.В. Корнев, Ю.Н. Карнет, О.Б. Юмашев // Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов: сборник трудов 28-го международного симпозиума. г. Москва, 15-19 октября 2018 г. – М.: НПКЦ ВЕСКОМ, 2018. – С. 127-133.

УДК 678.01:53

ВЛИЯНИЕ СТИМУЛЯТОРА БИОРАЗЛОЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАКАНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТЕКЛОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ

Л.А. Чернов, К.Е. Дмитриев, И.С. Коротнева

Научный руководитель – **И.С. Коротнева**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Получены эластомерные пленки на основе разработанной латексной композиции со стимуляторами биоразложения (древесная мука, крахмал, кофейный жмых, листья березы) в качестве наполнителей. С применением метода дифференциальной сканирующей калориметрии оценена температура стеклования полимерной матрицы – карбоксилсодержащего бутадиен-нитрильного сополимера. Установлено, что в исследованном диапазоне концентраций используемые наполнители не оказывают существенного влияния на температуру стеклования.

Ключевые слова: *маканые изделий, стимуляторы биоразложения, температура стеклования.*

INFLUENCE OF A BIODEGRADATION PROMOTER IN THE COMPOSITION OF ELASTOMERIC DIPPED PRODUCTS ON THE GLASS TRANSITION TEMPERATURE OF THE POLYMER MATRIX

L.A. Chernov, K.E. Dmitriev, I.S. Korotneva

Scientific Supervisor – **I.S. Korotneva,** Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

Elastomeric films based on a developed latex composition with biodegradation promoters (wood flour, starch, coffee grounds, birch leaves) as fillers were obtained. The glass transition temperature of the polymer matrix—carboxylated butadiene-nitrile copolymer latex—was evaluated using differential scanning calorimetry. It was established that within the investigated concentration range, the fillers used do not exert a significant influence on the glass transition temperature.

Keywords: *Dipped products, biodegradation promoters, glass transition temperature*

В настоящее время большое внимание уделяется разработке новых полимерных композиционных материалов, содержащих природные наполнители [4]. Помимо ускорения срока разрушения полимерных изделий после окончания их эксплуатации, стимуляторы биоразложения могут оказывать влияние на другие свойства (механические, физико-химические). Одной из важных характеристик маканых изделий является температура стеклования, влияющая как на выбор условий транспортировки, так и на их эксплуатационные свойства. Введение любого нового ингредиента в состав латексной композиции не только влияет на условия переработки, но и может кардинально изменить физико-механические свойства изделий. Для новых полимерных композиционных материалов является необходимым оценка температуры стеклования, в особенности для маканых изделий. Значения температуры стеклования учитываются, главным образом, при выборе условий хранения и транспортировки готовой продукции. В результате длительной изотермической выдержки материала при температурах ниже температуры стеклования происходит уплотнение аморфной фазы, что проявляется в увеличении модуля упругости, снижении ударной вязкости и, главное, в потере способности к высокоэластичным деформациям [5–7]. Знание температуры стеклования позволяет установить температурный интервал, в котором сохраняются механические свойства полимера, что является критически важным для обеспечения надежности изделий при эксплуатации.

Целью работы являлась оценка влияния природы и количества стимуляторов биоразложения в составе маканых изделий на температуру стеклования полимерной матрицы.

В качестве полимерной матрицы для создания полимерного композиционного материала (ПКМ) применяли латекс карбоксилсодержащего бутадиен-нитрильного сополимера (ТУ 2294-415-05842324-2006). Дополнительно в латексную композицию вводили дисперсии серы, оксида цинка и диэтилдиотиокарбамата цинка в качестве вулканизующей системы, дисперсию стимулятора биоразложения (СБ) в качестве хемоатрактанта для привлечения микробиоты для естественной деструкции изделий. В качестве стимуляторов биоразложения применялись отходы деревообрабатывающей или пищевой промышленности, представляющие собой древесную муку (ДМ), или кофейный жмых (КЖ), или листья березовые (ЛБ), с фракцией не более 100 мкм, а также крахмал картофельный (КК). ПКМ, содержащий стимуляторы биоразложения, изготавливали в соответствии с разработанной технологией, изложенной в работах [1-3]. Образцы маканых эластомерных пленок (рис. 1) получали на основе разработанного ПКМ методом коагулянтного отложения. На рис. 1 представлены плёнки, полученные на основе композита при введении в его состав 10 массовых частей дисперсий стимуляторов биоразложения на 100 массовых частей сухого остатка латекса.

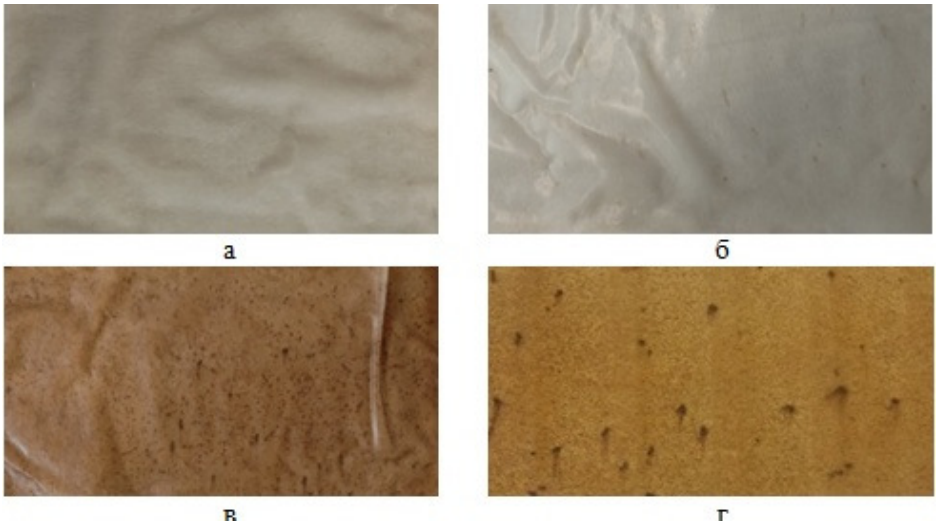


Рис. 1. Внешний вид полученных эластомерных маканых пленок, содержащих стимуляторы биоразложения:
а – древесная мука; б – крахмал картофельный; в – кофейный жмых; г – листья березовые

В работе устанавливали влияние наполнителя ПКМ на температуру стеклования полимерной матрицы. Определение температуры стеклования проводили с применением метода дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе STA 449 F3 Jupiter в диапазоне от -100 до 0 °С.

На рис. 2 представлены результаты оценки температуры стеклования образцов маканых изделий, содержащих различные типы и количество стимулятора биоразложения. Введение исследуемых наполнителей в состав ПКМ понижало температуру стеклования полимерной матрицы в среднем на 8,24% относительно контрольных образцов сравнения без наполнителя. Самую низкую температуру стеклования показали пленки с кофейным жмыхом (-27 °С) и листьями березы (-26 °С), применяемые в ПКМ в количестве 20 массовых частей. Данный факт обусловлен наличием в составе этих наполнителей природных пластифицирующих компонентов (масел, сахаридов), мигрирующих в полимерную матрицу в процессе получения изделий. Более плавное понижение температуры стеклования обеспечивает увеличение в составе ПКМ древесной муки (-23 °С) и крахмала картофельного (-24 °С), что возможно связано с особенностью их химического состава.

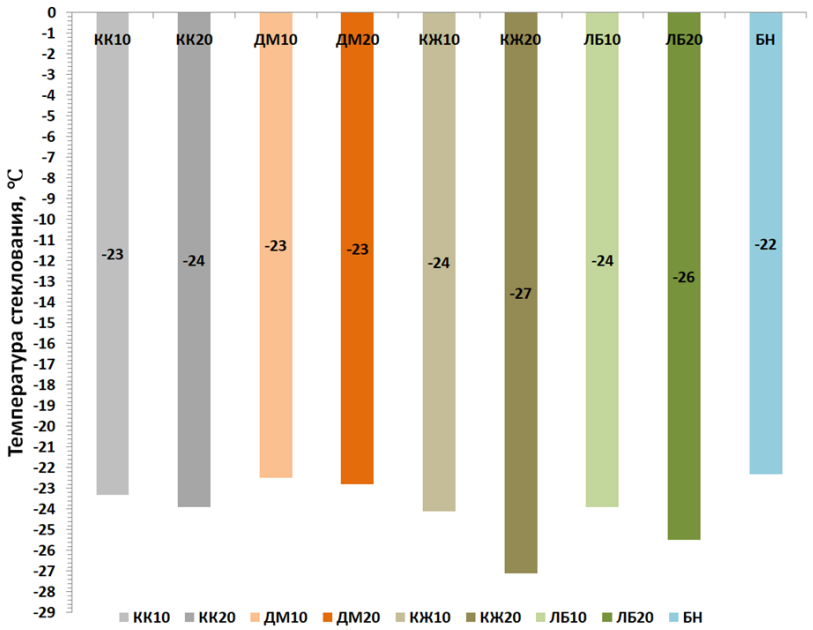


Рис. 2. Влияние стимулятора биоразложения в составе ПКМ на температуру стеклования полимерной матрицы:
10, 20 - количество стимулятора биоразложения в составе ПКМ, массовых частей на 100 массовых частей сухого остатка латекса;
БН - образец маканого изделия без наполнителя

Поскольку температура стеклования полимеров лежит в некотором диапазоне в пределах 10-15 °С, то на основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о несущественном влиянии на нее исследуемых наполнителей. Результаты проведенного исследования позволяют не вносить изменений в действующие рекомендации по температуре транспортировки и хранения для новой разработанной линейки маканых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Дмитриев, К.Е. Полимерный композиционный материал на основе карбоксилатного бутадиен-нитрильного сополимера для изготовления экологичных маканых изделий / К.Е. Дмитриев, И.С. Коротнева, А.О. Шамина // Перспективные материалы, 2025. – № 3. – С. 14-23.

2) Дмитриев, К.Е. Технология получения полимерного композиционного материала на основе латекса эластомера со стимуляторами биоразложения в составе для изготовления маканых изделий / К.Е. Дмитриев, И.С. Коротнева, А.О. Шамина // Промышленное производство и использование эластомеров, 2023. – № 2. – С. 27–30.

3) Пат. № 2813722, Российская Федерация, C08L 9/04, C08L 13/02, C08K 3/06, C08K 3/22, C08K 5/205. Полимерный композиционный материал, содержащий стимуляторы биоразложения, для производства маканых изделий / И.С. Коротнева, К.Е. Дмитриев. – Заявл. 09.03.2023; опубл. 15.02.2024. – Бюл. № 5

4) Boon, Z.H. Recent development of biodegradable synthetic rubbers and bio-based rubbers using sustainable materials from biological sources / Z.H. Boon, Y.Y. Teo, D.T. Ang // RSC Adv. – 2022. – Vol. 12. – № 52. – P. 34028-34052.

5) Carbohydrate Polymers in Amorphous States: An Integrated Thermodynamic and Nanostructural Investigation / D. Kilburn, J. Claude, T. Schweizer [et al.] // Biomacromolecules. – 2005. – Vol. 6, № 2. – P. 864-879.

6) Antiplasticization of Polymer Materials: Structural Aspects and Effects on Mechanical and Diffusion-Controlled Properties / L. Mascia, Y. Kouparitsas, D. Nocita [et al.] // Polymers (Basel). – 2020. – Vol. 12, № 4. – P. 769.

7) Ubbink, J. Structural and thermodynamic aspects of plasticization and antiplasticization in glassy encapsulation and biostabilization matrices // Adv. Drug. Deliv. Rev. – 2016. – Vol. 100. – P. 10–26.

УДК 669.295.5

ПРОБОПОДГОТОВКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

В.А. Чистякова, В.А. Иванова

Научный руководитель – **В.А. Иванова**, д-р техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Из многочисленных материалов, используемых в имплантологии, наиболее распространенным является титан и его сплавы. Успех имплантации определяется комплексом факторов, среди которых ключевую роль играют физико-химические свойства материала, его структурные характеристики и характер взаимодействия с биологическими тканями. Титан и его сплавы остаются «золотым стандартом» благодаря уникальному сочетанию биосовместимости, коррозионной стойкости и механических свойств. Однако, как показывают исследования, далеко не все вопросы, касающиеся структурной организации имплантатов на микро- и наноуровне, изучены в достаточной степени. В ходе работы был разработан и оптимизирован режим пробоподготовки образцов дентальных имплантатов, проведен анализ структуры и выявлены некоторые дефекты, влияющие на качество изделий.

Ключевые слова: *титан, титановые сплавы, дентальные имплантаты*

SAMPLE PREPARATION AND STRUCTURAL STUDY OF DENTAL IMPLANTS SAMPLES MADE OF TITANIUM-BASED ALLOYS

V.A. Chistyakova, V.A. Ivanova

Scientific Supervisor – **V.A. Ivanova**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

Of the numerous materials used in implantology, titanium and its alloys are the most common. The success of implantation is determined by a complex set of factors, including the material's physicochemical properties, its structural characteristics, and its interaction with biological tissue. Titanium and its alloys remain the "gold standard" due to their unique combination of biocompatibility, corrosion resistance, and mechanical properties. However, as research shows, not all issues related to the structural organization of implants at the micro- and nanoscale have been sufficiently studied. During the study, a sample preparation regime for dental implants was developed and optimized, the structure was analyzed, and certain defects affecting the quality of the implants were identified.

Keywords: *titanium, titanium alloys, dental implants*

В качестве образцов для исследований структуры дентальных имплантатов были взяты три образца – корейский INNO Implant, являющийся одним из ведущих корейских брендов, который занимает прочные позиции в среднем ценовом сегменте и часто рассматривается как баланс цены и качества. Остальные образцы принадлежат производителю "NIITOP". Производились в Нижнем Новгороде 13 лет, 3 года проходили клиническую апробацию (лицензия No99-03-000099, сертификат соответствия No РОСС RU. ИМ13.В02096). Изготавливались имплантаты из чистого титана марки ВТ 1-00, уникальная поверхность микротекстурного типа которых достигалась за счет ионно-плазменной обработки.

Для металлографических исследований образцов дентальных имплантатов необходимо провести соответствующую подготовку образцов, включающую ряд этапов: шлифование, черновая полировка, промежуточная полировка, финишная полировка. Шлифование образцов осуществляется на автоматическом шлифовально-полировальном станке с применением шкурки на тканевой основе с фиксированным абразивом карбида кремния. Цель шлифования получить однонаправленный микрорельеф, состоящий из

тончайших параллельных рисок. Поверхность приобретает матово-зеркальный оттенок, что является идеальным субстратом (подложкой) для алмазной суспензии на финишной полировке. Для шлифования используется нисходящий ряд зернистости от 800 до 4000. Это позволяет вести процесс съема материала в контролируемом режиме микрорезания. Каждая последующая, более мелкая, шкурка удаляет царапины и нарушенный слой, оставленные предыдущей. Зернистость 800 (средний размер зерна ~22 мкм) создает начальный, но уже достаточно чистый рельеф, а 4000 (~5 мкм) обеспечивает поверхность, близкую к полированной (сатиновое сияние).

Полирование образцов осуществляется для полного удаления дефектного слоя, сформированного при шлифовании, и получения поверхности с минимальной шероховатостью ($Ra \leq 0{,}05$ мкм), свободной от рисок и наклепа. Полирование осуществляется также на шлифовально-полировальном станке с использованием полировальных тканей и абразивных суспензий.

Черновая полировка применяется для удаления рисок, оставленных после финишного шлифования и частичного уменьшения толщины нарушенного слоя. Использование жесткой шелковой ткани с алмазом 3 мкм обеспечивает режим управляемого микрорезания. Частицы алмаза, закрепляясь в ворсе, работают как микролезвия, срезая микростружку. Давление 25 Н является оптимальным для титана: оно достаточно для внедрения зерен 3 мкм в поверхность и эффективного съема материала, но не вызывает глубокого пластического деформирования. Скорость 100 об/мин снижает тепловыделение, что предотвращает адгезионное схватывание титана с тканью (налипание). Время 240 с обеспечивает полное удаление рисок от предыдущей стадии и формирование равномерного матового рельефа с шероховатостью на уровне ~0,2 мкм.

Промежуточная полировка применяется для утонения и гомогенизации нарушенного слоя, удаления более глубоких рисок, оставшихся после первого этапа. Повышение нагрузки до 30 Н при той же зернистости (3 мкм) и увеличенной до 120 об/мин скорости ускоряет процесс съема материала. Это позволяет «пробить» возможный остаточный рельеф и более эффективно удалить наклепанный слой, который мог образоваться на предыдущих этапах шлифовки из-за вязкости титана. Умеренное увеличение скорости (с 100 до 120 об/мин) при сохранении той же ткани компенсирует большее давление, предотвращая засаливание. Данный этап служит переходным мостом к финишной полировке, подготавливая поверхность с минимальной глубиной дефектов.

Цель финишной полировки – получение поверхности, свободной от механических нарушений, пригодной для оптической и электронной микроскопии, с последующим химическим травлением для выявления микроструктуры. Переход к абразиву 1 мкм и более мягкой ткани переводит процесс из режима микрорезания в режим микропластического оттеснения и тонкого абразивного износа. Давление снижено до 20 Н, чтобы исключить глубокое внедрение мелких (1 мкм) частиц и минимизировать образование тончайшего аморфного слоя, который может маскировать истинную структуру при травлении. Скорость 120 об/мин и время 240 с обеспечивают полное удаление рисок от 3 мкм алмаза и создание поверхности с зеркальным блеском. При этом достигается минимальная шероховатость ($Ra \leq 0{,}05$ мкм), необходимая для высококонтрастного выявления микроструктуры титана (границ зерен и двойников) при последующем химическом травлении.

Для сплава ВТ1-0, который является технически чистым титаном, оптимальным выбором для выявления общей микроструктуры (например, границ зерен) является реактив Кролла [1]. Если при стандартном травлении структура проявляется недостаточно четко, имеет смысл попробовать электрохимическое травление. Оно обеспечивает более контролируемое и деликатное выявление фаз и может дать более контрастную картину, особенно для образцов с тонкими структурными элементами. Образцы травили 12 минут в подогретом до 20-25 ℃ травителе.

На рис. 1 представлена типичная структура деформированного и рекристаллизованного однофазного α-титана. При увеличении ×100 микроструктура

имплантата INNO из ВТ1-0 представляет собой типичную для технически чистого титана структуру: равноосные зёрна α-фазы. Наличие мелких включений в пределах допустимых норм. Такая структура обеспечивает хорошую биосовместимость и удовлетворительные механические свойства для дентальной имплантации. Наблюдается структура с равноосными зернами различных размеров и большеугловыми границами. Очевидно, что в ходе отжига при 700 ℃ протекают процессы рекристаллизации структуры, заключающееся в зарождении и росте новых зерен, свободных от дефектов [2].

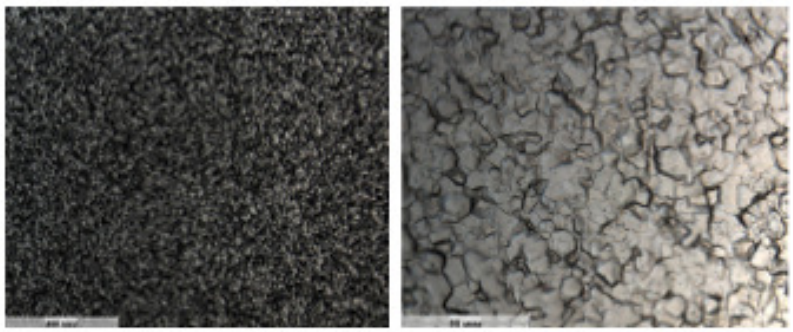


Рис. 1. Микроструктура образца дентального имплантата INN Oimplantinnovation (Cowell Medi, Южная Корея):
а – увеличение ×100; б – увеличение ×500

На рис. 2 микроструктура исследуемого образца представляет собой полиэдрическую структуру, характерную для технически чистого титана в отожженном состоянии. Матрица материала образована зернами α-титана, имеющими гексагональную плотноупакованную (ГПУ) решетку. Наблюдается значительный разброс зерен по форме и размерам: от равноосных, близких к изометричной форме, до более сложных неправильных очертаний. На стыке зерен в образце могут возникать большие внутренние напряжения и появляться различного типа несплошности — поры и микротрещины. Такого рода дефекты, как и дислокации, оказывают заметное влияние на упругие и неупругие свойства любых поликристаллических материалов [3]. Примечательной особенностью является малое количество вытянутых, ламеллярных (пластинчатых) зерен. Разнозернистость приводит к неоднородности механических свойств по объему имплантата. На границах между областями с разным размером зерен возникают микроскопические концентраторы напряжений при жевательных нагрузках. Также структурная неоднородность может привести к неравномерной остеоинтергации.

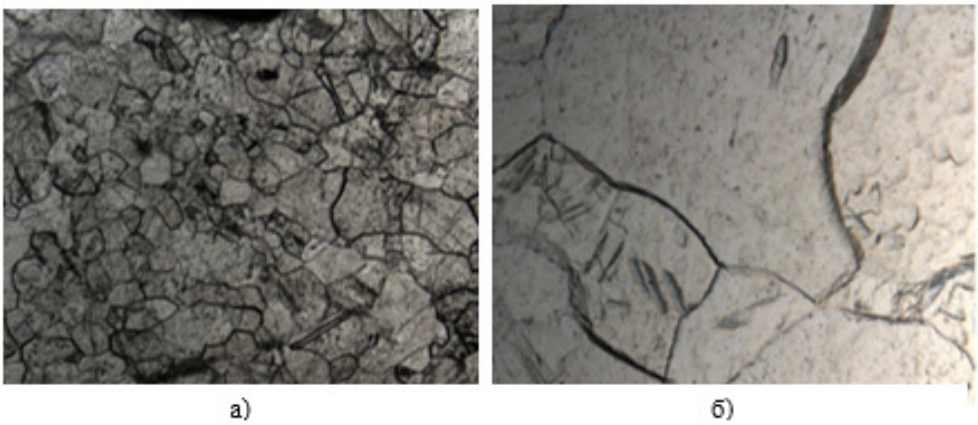
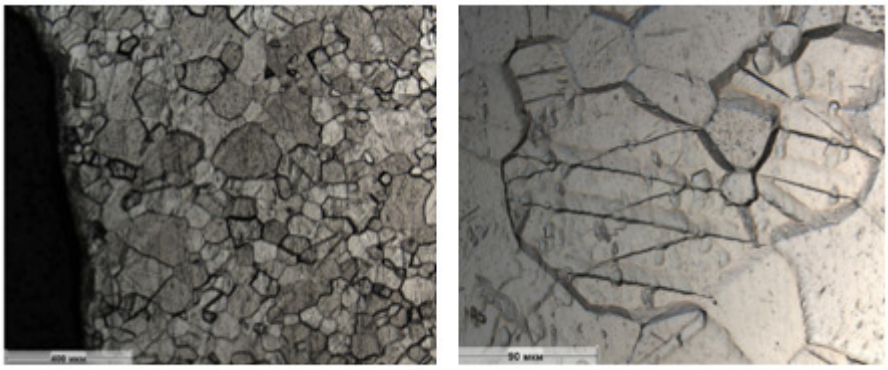


Рис. 2. Микроструктура образца дентального имплантата ООО «Торговый центр НИИТОП», находившегося в эксплуатации 20 лет (г. Нижний Новгород):
а – увеличение ×100; *б* – увеличение ×500

На рис. 3 микроструктура характеризуется полидисперсным распределением зёрен α-фазы, наличием развитой субструктуры (субзёрен) и следов деформационного двойникования. Формирование такой структуры обусловлено неравномерным распределением деформации по объёму материала в процессе обработки и неполным протеканием процессов рекристаллизации [4]. Внутри некоторых зёрен, особенно крупных, наблюдается ячеистая субструктура. Субзёрна представляют собой области внутри исходного зерна, слабо разориентированные друг относительно друга и являются результатом перестройки дислокационной структуры — процесса полигонизации [5]. Наличие субзёрен является промежуточной стадией между деформированным и полностью рекристаллизованным состоянием. Их присутствие подтверждает, что материал подвергался пластической деформации, а последующий отжиг был недостаточен для полного снятия наклёпа, но привёл к начальной стадии рекристаллизации.

Важной особенностью микроструктуры является наличие систем деформационных двойников. Образованные концентрированной нагрузкой механические двойники в образцах, деформированных прокаткой и закаленных от высоких температур, отличаются друг от друга не только геометрическими размерами, но и конфигурацией двойниковой границы [6]. Существуют два основных типа двойников: внутризёренные и сквозные, пересекающие несколько зёрен. Двойники имеют вид чётких, прямолинейных полос, часто с характерной для металлов линзовидной формой. Наличие двойников указывает на то, что в процессе обработки (например, прокатки или осадки) материал испытывал значительные механические нагрузки при относительно низких температурах (ниже температуры рекристаллизации). Двойники, как и субзёрна, вносят вклад в упрочнение материала, однако в данном контексте они служат прямым свидетельством деформационной истории образца.



а) б)

Рис. 3. Микроструктура образца дентального имплантата ООО «Торговый центр НИИТОП», не находящегося в эксплуатации (г. Нижний Новгород):
а – увеличение ×100; *б* – увеличение ×500

Таким образом, были подготовлены образцы и проведены металлографические исследования структуры образцов дентальных имплантатов на основе титана трех разных производителей. Пробоподготовка титановых сплавов – это сложный, но ключевой этап для получения достоверных результатов металлографического анализа. Основная сложность заключается в высокой пластичности и химической активности титана. Металлографические исследования образцов свидетельствуют о том, что для успешной эксплуатации дентальных имплантатов на основе титана структура должна быть однородной [7], иметь равноосные мелкие зерна, микроструктура должна быть чистой, без посторонних фаз и включений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Беленький, В.Я. Гальванотехника. Справочное издание / В.Я. Беленький, Г.П. Виткина. – Москва: Металлургия, 1991. – 416 с.

2) Усманов, Э.И. Влияние термообработки на микроструктуру и микротвердость титана grade 4, подвергнутого ИПДК / Э.И. Усманов, Л.Р. Резяпова, Р.Р. Валиев // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. – 2021. –№3 (93). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-termoobrabotki-na-mikrostrukturu-i-mikrotverdost-titana-grade-4-podvergnutogo-ipdk (дата обращения: 01.04.2026).

3) Кардашев, Б.К. Упруго-пластические свойства микро- и субмикрокристаллических металлов и сплавов / Б.К. Кардашев, В.И. Бетехтин, М.В. Нарыкова // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, вып. 12. – С. 94−106.

4) Формирование субмикрокристаллической структуры в титане и его сплавах / Ю.Р. Колобов [и др.] // Вестник Тамбовского университета. – 2015. – Т. 20Б № 4. – С. 878–884.

5) Исследования термической стабильности микроструктуры титана, сформированной воздействием интенсивной пластической деформации / Ю.Р. Колобов, А.Г. Липницкий [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016.

6) Взаимодействие дислокаций в процессе двойникования в титане ВТ1-0, прошедшего закалку от высокой температуры // Вестник российских университетов / Н.В. Камышанченко, И.С. Никулин, Д.П. Кузнецов, М.С. Кунгурцев, И.М. Неклюдов, О.И. Волчок // Математика. – 2010. – № 3-1н. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimodeystvie-dislokatsiy-v-protsesse-dvoynikovaniya-v-titane-vt1-0-proshedshego-zakalku-ot-vysokih-temperatur (дата обращения: 01.04.2026).

7) ГОСТ Р ИСО 5832-2-2020. Имплантаты для хирургии. Металлические материалы. Ч. 2. Нелегированный титан. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 8 с.

УДК 620.18:620.181.4

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЧУГУНА

А.М. Шишкин[1], А.Г. Панов[1,2]

Научный руководитель - **А.Г. Панов**, д-р техн. наук, профессор

[1]Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО КФУ
[2]Ярославский государственный технический университет

В работе термический анализ рассматривается как инструмент для получения и интерпретации моделей структурообразования (кривых охлаждения) чугуна — графиков зависимости температуры от времени в процессе кристаллизации. Описаны материалы и оборудование для термического анализа, а также параметры модели структурообразования. Приводится обзор современных зарубежных решений, позволяющих использовать модели структурообразования в серийном производстве чугунных отливок для повышения их качества. Сделан вывод о влиянии на модели структурообразования технологической наследственности, связанной со спецификой производства каждого отдельно взятого предприятия.

Ключевые слова: *термический анализ чугуна, кривые охлаждения, микроструктура, модель структурообразования*

THERMAL ANALYSIS AS A METHOD FOR MODELING CAST IRON STRUCTURE FORMATION PROCESSES

A.M. Shishkin[1], A.G. Panov[1,2]

Scientific Supervisor - **A.G. Panov**, Doctor of Technical Sciences, Professor

[1]Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University
[2]Yaroslavl State Technical University

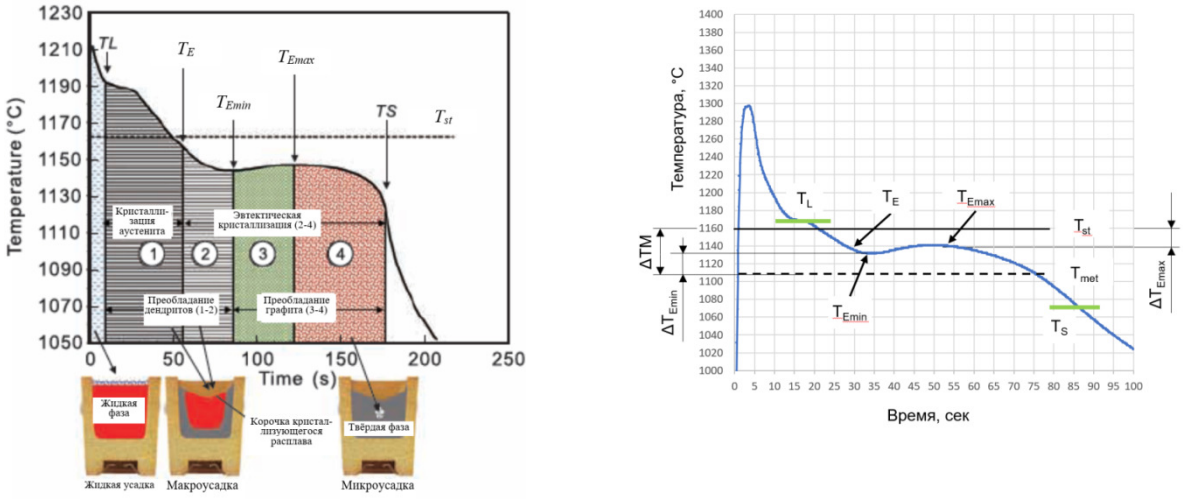
The paper examines the thermal analysis is considered as a tool for obtaining and interpreting models of structure formation (cooling curves) of cast iron, which are graphs of temperature dependence on time during the crystallization process. The article describes the materials and equipment for thermal analysis, as well as the parameters of the structure formation model. It provides an overview of modern foreign solutions that allow the use of structure formation models in the mass production of cast iron castings to improve their quality. The article concludes that the structure formation models are influenced by the technological inheritance associated with the specific production processes of each individual enterprise.

Keywords: *thermal analysis of cast iron, cooling curves, microstructure, and structure formation model.*

Термический анализ (ТА) представляет собой группу методов исследования физических и физико-химических процессов, основанных на регистрации изменений различных свойств вещества в условиях изменения температуры. В чугунолитейном производстве одним из наиболее применяемых является метод анализа кривых охлаждения (АКО), который позволяет по характеру изменения температуры, в зависимости от времени, делать заключения об изменениях в системе при её охлаждении. Принцип метода АКО заключается в том, что каждый этап процесса кристаллизации расплава оставляет характерную температурную точку на форме кривой охлаждения, позволяя детально изучить происходящие явления (рис. 1, *а*). В данной работе рассматриваются кривые охлаждения первичной кристаллизации (температурный диапазон ликвидус-солидус) доэвтектических нелегированных чугунов.

Кривая охлаждения расплава является графической моделью структурообразования – она воспроизводит ключевые механизмы, управляющие возникновением и эволюцией структурных элементов (зёрен, фаз, кластеров и т.д.) под влиянием внешних и внутренних факторов. Исследование данных моделей основано на детальном анализе ключевых

температурных точек, в частности точек перегиба и экстремумов графика, служащих объективными маркерами, фиксирующими начало и/или завершение процессов фазовых превращений в системе. На рис. 1, *б* представлена графическая модель структурообразования доэвтектического чугуна с ключевыми температурными точками, полученная в собственных экспериментах.



а) *б)*

Рис. 1. Графические интерпретации:
а - фазовые превращения при первичной кристаллизации доэвтектического чугуна [2];
б - модель структурообразования доэвтектического чугуна с ключевыми температурными точками, полученная в собственных экспериментах

Ключевыми температурными точками являются температура ликвидуса (TL), температура начала кристаллизации эвтектики (TE), температура переохлаждения эвтектики (TEmin), максимальная эвтектическая температура (TEmax), температура солидуса (TS).

Для проведения термического анализа чугуна используются специализированные приборы, которые позволяют контролировать параметры кристаллизации непосредственно в процессе выплавки. В нашей работе применяется оборудование фирмы Heraeus Electro-Nite, на рис. 2 показана схема измерительной системы, которая состоит из:
- кристаллизационного стаканчика, подходящего для данного измерения;
- стенда для установки кристаллизационного стаканчика с контактным блоком Quik-Cup;
- компенсационного кабеля типа К;
- разъема для подключения кабеля к регистрирующему прибору;
- регистрирующего прибора (например, Quik-LabE).

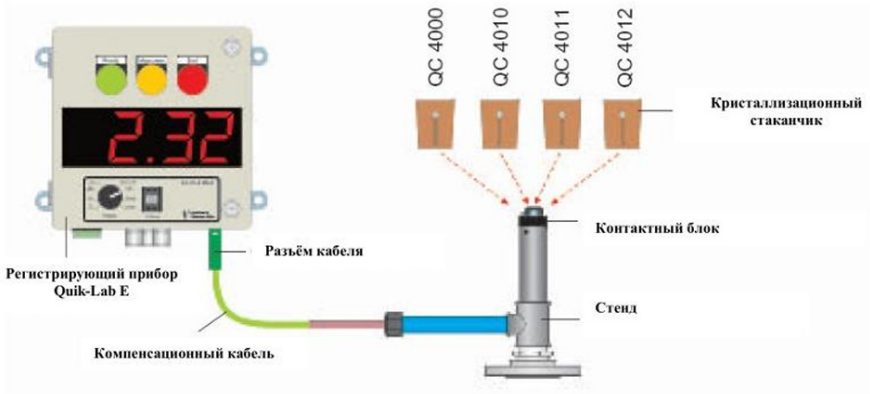


Рис. 2. Схема измерительной системы для термического анализа фирмы Heraeus Electro-Nite [3]

На современных зарубежных литейных производствах метод термического анализа активно применяется для мониторинга и оптимизации технологических процессов. В частности, он используется для определения оптимального химического состава чугуна, выбора подходящих модификаторов и расчёта их расхода, установления наилучшей температуры заливки и времени выдержки металла в ковше, оценки необходимости вторичного модифицирования и т. д. [1]

Ключевыми разработчиками систем термического анализа являются шведская компания SinterCast AB и испанский институт Azterlan — они последовательно внедряют свои решения в промышленное производство. Например, шведские специалисты демонстрируют эффективность ТА на примере оптимизации ковшевого модифицирования проволокой при получении ЧВГ.

В рамках SinterCast-метода регулировка расхода модификатора для текущих ковшей текущей плавки базируется на статистической обработке данных термического анализа расплавов из предыдущих ковшей той же плавки, учёте содержания серы в базовом расплаве текущей плавки, анализе веса и температуры металла в ковше.

Благодаря ТА специалистам SinterCast AB удалось выявить оптимальное «технологическое окно» критериев для получения ЧВГ — именно в его границах осуществляется контроль производственного процесса (рис. 3).

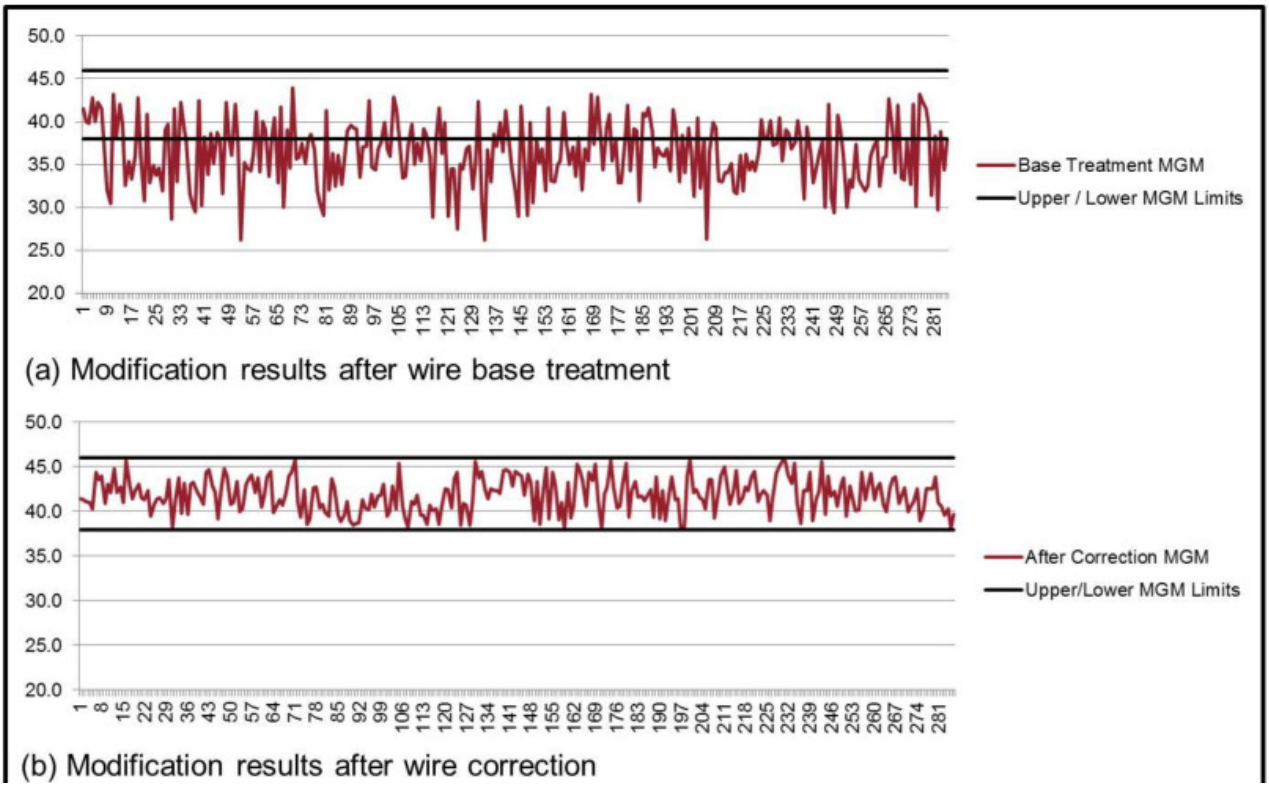
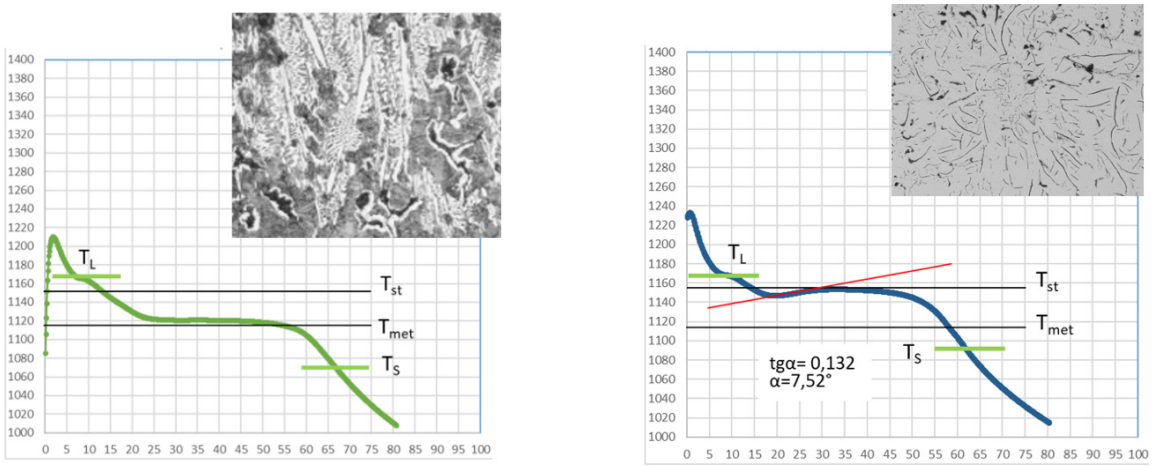


Рис. 3. Результаты внедрения метода SinterCast при серийном производстве 281 ковша из чугуна с вермикулярным графитом [4]

Однако существующие комплексы ТА зачастую не содержат развёрнутой научно-технической информации, которая бы поясняла критерии ТА, определяющие это «технологическое окно». В контексте задач импортозамещения и укрепления технологического суверенитета были проведены исследования, направленные на сопоставление термических кривых с формирующимися структурами отливок из нелегированного чугуна (рис. 4).



а б

Рис. 4. Графические модели чугуна:
а – с низкой степенью модифицирования;
б – с высокой степенью модифицирования

На основании проведенных исследований предлагается собственная модель «технологического окна», которая основывается на эмпирическом опыте получения кривых охлаждения в конкретных производственных условиях (рис. 5).

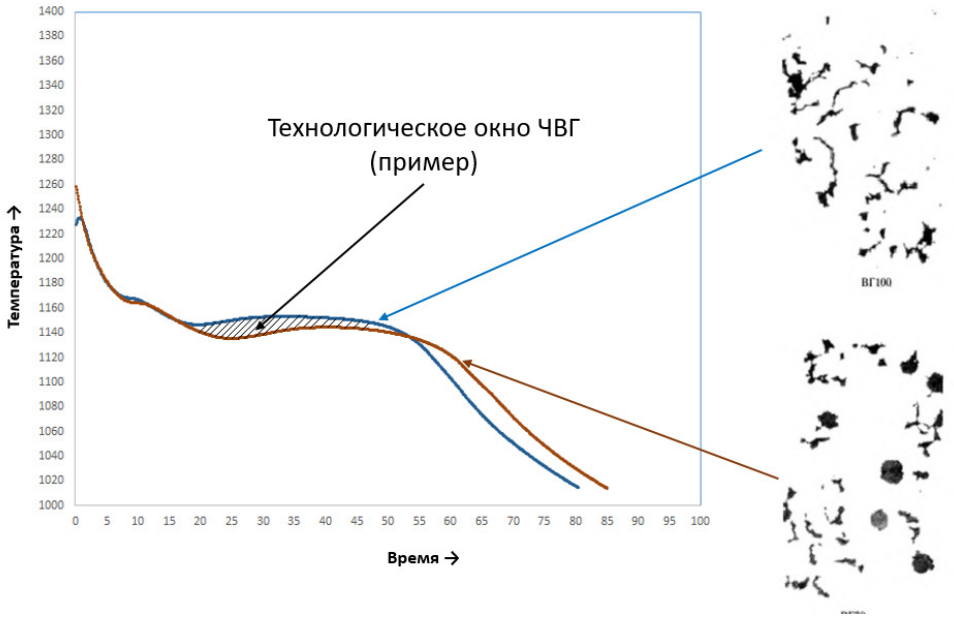


Рис. 5. Пример графической модели «технологического окна» ЧВГ

Проведенные исследования показали, что для каждых условий производства чугунных отливок необходимо предварительно опытным путём подбирать как минимум уровни технологических окон критериев ТА (TL, Tst, Tmet и др.), поскольку единую «универсальную» кривую охлаждения для конкретного вида чугуна с определённой микроструктурой для разных отливок получить очень сложно (вероятно, невозможно). Это связано с так называемой технологической наследственностью, поскольку каждое предприятие имеет свою собственную технологию, отличающуюся применяемым оборудованием, оснасткой, конструкцией литниковой системы, массой и толщинами стенок отливки, различием используемых материалов, квалификацией персонала и др., что в свою очередь и влияет на критерии термического анализа расплава, которым заливаются отличающиеся в разных производственных условиях литейные формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Технология стабильного получения вермикулярного графита в отливках массового производства / С. Доусон, А.Г. Панов, Д.А. Гуртовой, С.А. Аникин // Литейное производство. – 2018. – № 4. – С. 7-12.

2) Stefanescu, D.M. 90 years of thermal analysis as a control tool in the melting of cast iron / D.M. Stefanescu, R. Suarez, S.B. Kim. // China Foundry. – 2020. – Vol. 17. – P. 69–84. – URL: https://doi.org/10.1007/s41230-020-0039-x.

3) Heraeus Electro-Nite: официальный сайт. – URL: https://www.heraeus-electro-nite.com/en/foundry/melting-solutions-for-foundry/temperature-measurement-technology-for-foundry-melting/ (дата обращения: 09.04.2026).

4) SINTERCAST: Thermal analysis and process control for compacted graphite iron and ductile iron / Техническая информация SinterCast. – URL: https://sintercast.com/library/published-papers (дата обращения 09.04.2026).

УДК 616.31

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ. МЕРЫ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ПРОФИЛАКТИКУ ПЕРИИМПЛАНТИТА

К.Е. Шорохова

Научный руководитель – **Е.В. Сергеев**, ассистент

Ярославский государственный медицинский университет

В работе проведен сравнительный анализ современных дентальных имплантатов, включая их материалы (титан, цирконий, инновационные сплавы) и способы изготовления. Рассмотрены ключевые методы модификации поверхности, влияющие на остеоинтеграцию. Особое внимание уделено проблеме периимплантита: его этиологии, факторам риска и роли антимикробных покрытий в профилактике воспалительных осложнений. Обоснована необходимость комплексного подхода к выбору имплантационной системы и соблюдения клинических протоколов для повышения долгосрочного прогноза лечения.

Ключевые слова: *дентальная имплантация, остеоинтеграция, периимплантит, титан, диоксид циркония, антимикробные покрытия, модификация поверхности, факторы риска*

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN MANUFACTURING METHODS, MATERIALS, AND DESIGNS OF DENTAL IMPLANTS. MEASURES AIMED AT THE PREVENTION OF PERI-IMPLANTITIS

K.E. Shorokhova

Scientific Supervisor – **E.V. Sergeev**, Assistant

Yaroslavl State Medical University

This study presents a comparative analysis of modern dental implants, including their materials (titanium, zirconium, innovative alloys) and manufacturing methods. Key surface modification techniques influencing osseointegration are examined. Particular attention is paid to the issue of peri-implantitis: its etiology, risk factors, and the role of antimicrobial coatings in the prevention of inflammatory complications. The necessity of an integrated approach to the selection of implant systems and adherence to clinical protocols to improve long-term treatment outcomes is substantiated.

Keywords: *dental implantation, osseointegration, peri-implantitis, titanium, zirconium dioxide, antimicrobial coatings, surface modification, risk factors*

Актуальность проблемы. Статистические данные и системные последствия утраты зубов

Нарушение анатомической целостности зубных рядов входит в число наиболее часто встречающихся стоматологических патологий на территории Российской Федерации. Согласно имеющимся статистическим данным, порядка 70% российских граждан в возрастной категории от 20 до 50 лет уже сталкиваются с данной проблемой. Приведенные цифры демонстрируют, что дефекты зубного ряда более не являются уделом исключительно лиц пожилого возраста, а существенно «омолодились».

Результаты эпидемиологических исследований свидетельствуют о высокой потребности населения в ортопедическом лечении:

- В структуре общей стоматологической заболеваемости именно частичное или полное отсутствие зубов занимает ведущие позиции, выступая причиной от 40% до 75% всех визитов к стоматологу.

- Данные региональных исследований (включая Москву, Алтайский край, Омскую область, Республику Дагестан и другие субъекты) подтверждают повсеместный характер проблемы: от 70% до 90% совершеннолетнего населения нуждается в протезировании. При этом качество уже имеющихся протезов зачастую остается низким: средний срок службы несъемных ортопедических конструкций составляет не более 5–6 лет, а съемных – 3–5 лет,

после чего они подлежат обязательной замене. Более того, существенная доля пациентов (до 20% и выше) продолжает эксплуатировать несостоятельные протезы, срок использования которых превышает 9–15 лет, что лишь отягощает клиническую картину.

Необходимо осознавать, что потеря зубов представляет собой не локальный дефект зубочелюстной системы и не только эстетическую проблему. Это патологический процесс, инициирующий каскад негативных изменений в функционировании всего организма. Утрата зубов оказывает серьезное влияние на качество жизни человека и способна провоцировать следующие тяжелые последствия:

А) Расстройства пищеварительной функции

Полость рта является начальным и критически важным этапом механической переработки пищи. Тщательное пережевывание выступает необходимым условием для полноценного пищеварения.

В условиях отсутствия зубов человек неосознанно отдает предпочтение более мягкой углеводистой пище, избегая твердых продуктов (свежих овощей, мяса), которые необходимы для сбалансированного питания.

Недостаточно измельченные пищевые комки поступают в желудок и кишечник, провоцируя их функциональную перегрузку, развитие гастритов, колитов и прочих патологий ЖКТ. В результате организм испытывает дефицит нутриентов, что приводит к общему ослаблению здоровья.

Б) Атрофия костной ткани (резорбция кости)

Корни зубов обеспечивают передачу жевательного давления на костную ткань челюстей, стимулируя в ней метаболические процессы и поддерживая необходимый объем.

После экстракции зуба данная стимуляция прекращается. Костная ткань, лишенная физиологической нагрузки, подвергается процессу «рассасывания» — атрофии.

Это становится ключевым препятствием для последующего ортопедического лечения, особенно в плане имплантации: атрофированная кость не способна обеспечить надежную фиксацию имплантата без проведения дополнительных сложных и затратных хирургических вмешательств по ее наращиванию (синус-лифтинг, костная пластика).

В) Деформация зубных рядов и изменение прикуса

Зубочелюстная система представляет собой единый взаимосвязанный комплекс. Удаление даже одного зуба создает дефект, вследствие чего соседние зубы смещаются в сторону образовавшейся «пустоты», а зубы-антагонисты на противоположной челюсти выдвигаются (так называемый феномен Попова–Годона).

Указанные процессы ведут к деформации окклюзии, скученности оставшихся зубов, что осложняет их гигиенический уход и увеличивает риск возникновения кариеса и заболеваний пародонта.

Кроме того, изменяется биомеханика жевания. Нагрузка перераспределяется на сохранившиеся зубы, что вызывает их повышенную стираемость, функциональную перегрузку и последующую подвижность. В конечном итоге потеря одного зуба нередко влечет за собой утрату остальных по «цепной реакции».

Г) Дисфункция височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС)

Изменение прикуса и характера смыкания зубных рядов оказывает непосредственное влияние на функционирование ВНЧС.

Клинически это проявляется хроническим болевым синдромом, щелканьем при открывании рта, головными болями, а также болями в шейном отделе и мимической мускулатуре.

Д) Психологические и социальные аспекты

Отсутствие зубов, в особенности в переднем отделе, представляет собой значительный эстетический недостаток. Это неизбежно влечет за собой:

- падение самооценки, появление чувства неуверенности в себе;
- сужение круга социальных контактов (человек испытывает стеснение при улыбке, общении);

- изменение мимических паттернов.

Таким образом, проблема утраты зубов на сегодняшний день является крайне актуальной. Следует подчеркнуть, что высокая распространенность частичного и полного отсутствия зубов ставит перед ортопедической стоматологией задачу не просто эстетического восполнения имеющихся дефектов, но и полноценного восстановления жевательной эффективности с предотвращением атрофических процессов в костной ткани. Среди существующих подходов к замещению дефектов зубных рядов (применение мостовидных конструкций, съемных протезов) наиболее перспективным представляется метод дентальной имплантации.

В связи с вышеизложенным, целью работы является проведение сравнительного анализа современных методов изготовления, применяемых материалов и конструкционных особенностей дентальных имплантатов, а также изучение мер, направленных на профилактику периимплантита.

Определение и состав дентального имплантата.

Дентальный имплантат – это искусственная конструкция, предназначенная для внедрения в костную ткань челюсти с целью воссоздания корневой части утраченного зуба.

В конструктивном отношении включает в себя три ключевых элемента:

1. Тело – основная составляющая имплантата, подвергающаяся погружению в костную структуру челюсти. Учитывая, что большинство современных имплантатов выполняются в винтовой конфигурации, их тело представляет собой удлиненный стержень, имеющий заостренный дистальный конец и резьбу, расположенную по всей протяженности. Наличие резьбы позволяет вводить штифт в костную ткань по принципу самореза, благодаря чему достигается высокая степень фиксации и требуемый уровень первичной стабильности. В последующем происходит обрастание тела костной тканью — процесс, обозначаемый термином «остеоинтеграция».

2. Верхушка – наиболее суженная часть имплантата, характеризующаяся выраженной резьбой; анатомически соответствует верхушечной части естественного корня зуба.

3. Шейка – верхний внекостный сегмент имплантата, служащий зоной крепления сначала формирователя десневого контура, а затем абатмента с последующей коронкой. В ряде конструкций шейка дополняется микрорезьбой, что способствует равномерному распределению жевательной нагрузки на костные структуры челюсти и выступает фактором, препятствующим редукции костной ткани.

Приведенные элементы являются базовыми для большинства имплантационных систем. В зависимости от конкретной модели они могут варьироваться по геометрическим параметрам, размерам и иным характеристикам, что определяет практические и функциональные возможности конкретной имплантационной системы.

Функционирование имплантата предполагает его использование совместно с винтом-заглушкой. Данный элемент надевается на область шейки и выполняет роль герметичного барьера, защищающего установленный штифт от инфицирования и иных потенциальных рисков на этапе приживления. После завершения процесса остеоинтеграции заглушка удаляется, а на ее место устанавливаются наддесневые компоненты – абатмент и коронка.

Классификации имплантов.

В современной стоматологии существует несколько подходов к классификации дентальных имплантатов, базирующихся на различных системообразующих признаках.

Классификация по конструктивным особенностям

По данному признаку выделяют две основные группы:

- Разборные конструкции – состоят из трех самостоятельных компонентов: внутрикостной части (имплантата), соединительного элемента (абатмента) и коронковой части.

- Неразборные конструкции – в них абатмент изначально интегрирован с внутрикостной частью, что обеспечивает повышенную механическую прочность всей системы на всем протяжении от апикальной части до выхода абатмента в полость рта для

последующего соединения с коронкой. Такие изделия характеризуются более высокой устойчивостью к нагрузкам по сравнению с разборными аналогами.

Классификация по геометрической форме

В зависимости от конфигурации имплантаты подразделяются на:

- винтовые;
- цилиндрические;
- пластиночные;
- конические;
- ступенчатые и иные разновидности.

Классификация по способу протезирования и конструкционному типу

1. Корневидные имплантаты – наиболее широко применяемая разновидность, чаще выполняемая в винтовой конфигурации, напоминающей саморез. Данные изделия показаны при наличии достаточного объема и сохранности костной ткани. Резьбовая поверхность способствует плотной фиксации в кости и ускорению процессов остеоинтеграции. Как правило, изготавливаются из титана, обладают высокой несущей способностью, что делает их предпочтительным выбором при замещении жевательной группы зубов.

2. Пластиночные имплантаты характеризуются уплощенной формой, напоминающей пластину. Их применение целесообразно в условиях тонкой костной ткани, когда установка широкого корневидного аналога невозможна (например, во фронтальном отделе). Данная конфигурация позволяет охватить значительную площадь при необходимости протезирования нескольких рядом расположенных зубов.

3. Комбинированные имплантаты объединяют в своей конструкции элементы корневидных и пластиночных систем. Используются в сложных клинических ситуациях (выраженные деструктивные изменения, посттравматические состояния) и изготавливаются по индивидуальным параметрам.

4. Субпериостальные (поднадкостничные) имплантаты размещаются под слизистой оболочкой, между костной тканью и надкостницей, без внедрения в толщу кости. Данный метод представляет собой вариант выбора при значительной атрофии костного массива, когда установка внутрикостных конструкций невозможна. Такие имплантаты имеют ажурную конфигурацию, удерживающуюся за счет плотного прилегания к костной поверхности.

5. Внутрислизистые имплантаты фиксируются не в костной, а в слизистой ткани ротовой полости. Их основное назначение – повышение стабильности съемных ортопедических конструкций посредством замковых элементов.

6. Эндодонтические имплантаты (штифты) по своей сути не являются способом замещения утраченного зуба, а представляют собой метод сохранения собственного зуба. Они вводятся в корневую систему через апикальное отверстие с целью укрепления при условии сохранности корня, способного удерживать коронковую часть.

Требования, предъявляемые к материалам для имплантатов

Материал, используемый для изготовления имплантационных систем, должен соответствовать следующим критериям:

- обладать достаточной механической прочностью;
- характеризоваться устойчивостью к коррозии, отсутствием растворения и структурной деградации в биологических средах;
- проявлять биохимическую инертность по отношению к окружающим тканям;
- не оказывать аллергизирующего и канцерогенного действия, не нарушать гомеостаз и жизнедеятельность организма в целом.

Классификация имплантатов по материалу изготовления

С учетом характера взаимодействия с тканями организма выделяют три категории материалов:

1. Биоинертные материалы (титан, диоксид циркония, корундовая керамика) — не вступают в химическое взаимодействие с тканями, являются наиболее востребованными в клинической практике.

2. Биоактивные материалы (гидроксиапатит, фосфатная керамика) — способствуют стимуляции остеогенеза и активизации костеобразования.

3. Биотолерантные материалы (хромокобальтовые сплавы, нержавеющая сталь) — относятся к устаревшим вариантам, в настоящее время практически не применяются ввиду недостаточной долговечности.

Материалы для имплантатов

Современный рынок имплантологических систем отличается большим разнообразием: производители предлагают конструкции из различных металлов, сплавов и керамических соединений. Несмотря на то что титан прочно удерживает статус «золотого стандарта» благодаря оптимальному сочетанию эксплуатационных характеристик, активное внедрение в клиническую практику циркония и его диоксида свидетельствует о том, что поиск идеального материала для внутрикостной имплантации продолжается и остается предметом активных научных дискуссий.

Анализ 17 имплантационных систем (включая «U-Impl», «Alpha Dent», «MIS», «Straumann» и другие) позволяет выявить следующую структуру рынка по материальному признаку: абсолютное большинство имплантатов производится из титана и его сплавов; около 15% приходится на керамические изделия на основе оксида циркония; незначительный сегмент занимают системы из металлического циркония.

1. Титан и сплавы на его основе

Титан занимает доминирующее положение в имплантологии благодаря комплексу уникальных физико-химических характеристик. Ключевыми достоинствами данного материала выступают биоинертность и высокая коррозионная стойкость. При контакте с биологической средой на поверхности титана практически мгновенно формируется плотная пассивная пленка диоксида титана (TiO_2), которая надежно изолирует металл от окружающих тканей, предотвращает выход ионов и тем самым минимизирует риск развития воспалительных реакций и отторжения.

Достоверные данные о выраженной реактивности тканей человеческого организма на титан в настоящее время отсутствуют. Данный металл инертен по отношению к биологическим структурам, продукты его коррозии не обладают токсичностью и накапливаются локально, в зоне непосредственного контакта с имплантатом, не распространяясь по организму.

В медицинской практике применяются различные марки титана, которые подразделяются на две основные категории.

- Нелегированный (чистый) титан

Данная категория представлена титаном, в состав которого не вводятся специальные легирующие добавки для повышения прочности (такие как алюминий или ванадий в сплаве Ti-6Al-4V). Материал содержит практически чистый титан и незначительное количество неизбежных примесей (железо, кислород, азот, углерод, водород). Свойства сплава определяются именно концентрацией этих примесей: чем выше их содержание (особенно кислорода и азота), тем более прочным, но менее пластичным становится материал (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика марок нелегированного титана

Марка сплава	Содержание титана	Fe	C	O	N	H
Grade 1	99,6	0,1-0,2	0,06-0,1	0,12-0,2	0,03-0,05	0,01-0,015
ВТ1-00	99,6	0,15-0,2	до 0,05	до 0,1	до 0,04	до 0,008
Grade 2	95,5	0,1-0,3	0,08-0,1	0,18-0,25	0,03-0,04	0,01-0,015
ВТ1-0	99,5	0,25-0,3	до 0,07	до 0,2	до 0,04	до 0,01
Grade 3	99,2	0,2-0,3	0,08-0,1	0,25-0,35	0,05-0,07	0,01-0,015
Grade 4	99,0	0,2-0,5	0,06-0,08	0,35-0,4	до 0,05	0,01-0,015

Отечественные марки ВТ1-00 и ВТ1-0 соответствуют требованиям международного стандарта ISO 5832. Они демонстрируют высокие показатели пластичности (до 40%) и технологичности (хорошо поддаются литью и обработке давлением). К числу недостатков

чистого титана следует отнести его относительно невысокую механическую прочность (предел прочности на разрыв составляет около 500 МПа) и склонность к водородному охрупчиванию — процессу проникновения атомов водорода в кристаллическую решетку металла, что приводит к резкому снижению пластичности и прочностных характеристик. Примером использования чистого титана служит шведская система «Biomain».

- Сплав титана с алюминием и ванадием (Ti-6Al-4V, Grade 5, отечественный аналог ВТ6)

Данный сплав является наиболее распространенным титановым соединением в мире (стандарт ISO 5832-3), на его долю приходится около 50% всего производимого титана. Легирование алюминием позволяет повысить прочность, а введение ванадия — одного из немногих элементов, одновременно увеличивающих как прочностные, так и пластические характеристики — обеспечивает комплексное улучшение механических свойств. Этот сплав широко используется в имплантатах ведущих мировых брендов, таких как «Nobel Biocare», «Biomet 3i» и «Lifecore». Основным недостатком материала является некоторое снижение биосовместимости вследствие присутствия токсичных компонентов: ванадий способен нарушать клеточный метаболизм, а алюминий может замедлять процессы минерализации костной ткани.

В связи с этим перспективным направлением считается повышение прочностных характеристик чистого титана без использования токсичных легирующих добавок. Метод интенсивного пластического деформирования (ИПД) позволяет получать наноструктурированный титан. Изменение структуры металла на наноуровне существенно повышает его прочностные показатели, приближая их к характеристикам сплава ВТ6, и одновременно улучшает биологический отклик тканей, способствуя более эффективной остеоинтеграции.

Помимо титановых сплавов, в имплантологии находят применение и другие металлы, в частности кобальт-хромовые сплавы (Co-Cr-Mo, Co-Ni-Cr-Mo по стандартам ISO 5832-4 и ISO 5832-6). Они обладают высокой прочностью, однако из-за более низкой биосовместимости используются значительно реже. Такие металлы, как тантал и ниобий, не получили широкого распространения либо из-за высокой стоимости, либо вследствие отсутствия явных преимуществ перед титаном.

2. Металлический цирконий

Значительно реже на рынке представлены имплантаты из металлического циркония (например, сплав КТЦ-100). Его состав принципиально отличается от титановых сплавов: в качестве основного легирующего элемента выступает ниобий, а не токсичный ванадий. Содержание алюминия в нем составляет тысячные доли процента, а концентрация других вредных примесей на два порядка ниже, чем в титановых сплавах.

Преимущества циркония обусловлены его физико-химическими свойствами. Данный металл обладает меньшим отрицательным электродным потенциалом по сравнению с титаном, что теоретически указывает на его более низкую электрохимическую активность и менее выраженное взаимодействие с тканями организма. Как и титан, цирконий биоинертен, формирует на поверхности защитную оксидную пленку, устойчив к коррозии и характеризуется высокой усталостной выносливостью. Несмотря на эти перспективные качества, широкое внедрение циркониевых имплантатов ограничено недостаточной клинической изученностью, поскольку они используются относительно недавно.

3. Керамические материалы

Особое место в современной имплантологии занимает керамика, производство которой является более экологичным и менее энергоемким по сравнению с металлургическим. Керамические материалы ценятся за высокую биосовместимость, эстетические свойства и доступность сырьевой базы.

Наибольший интерес представляет диоксид циркония (ZrO_2). Это керамический материал, не относящийся к металлам, обладающий уникальными характеристиками:

- Эстетические свойства: белый цвет имплантатов из диоксида циркония исключает просвечивание через слизистую оболочку, что обеспечивает высокий уровень «розовой эстетики» и делает данный материал предпочтительным при замещении дефектов в зоне улыбки.

- Прочностные характеристики: по механическим показателям диоксид циркония сопоставим с легированными сталями благодаря эффекту трансформационного упрочнения. Современные стандарты (ISO 13356) предъявляют высокие требования к чистоте материала (размер зерна менее 0,5 мкм), что гарантирует прочность на изгиб более 800 МПа.

- Биосовместимость: он превосходит алюмооксидную керамику по прочности, трещиностойкости и износостойкости, обеспечивая низкий коэффициент трения при контакте с металлами.

Дальнейшим развитием этого направления выступает композиционная керамика ZTA (оксид алюминия, армированный диоксидом циркония). Введение 10–20% диоксида циркония в матрицу оксида алюминия позволяет значительно повысить прочность материала. Соответствуя новому стандарту ISO 6474-2:2012 (прочность на изгиб выше 900 МПа), такие композиты существенно увеличивают срок службы имплантатов, хотя и отличаются более высокой стоимостью.

4. Кобальтохромовые сплавы (КХС)

Состав данной группы материалов: кобальт (до 75%), хром (15–30%), молибден (3–7%). Кобальтохромовые сплавы относятся к категории биотолерантных материалов. Они характеризуются высокой прочностью, твердостью и устойчивостью к коррозии в обычных условиях, однако в биологической среде их защитная пленка разрушается, что инициирует процессы электрохимической коррозии. Биосовместимость КХС оценивается как удовлетворительная, однако полноценной остеоинтеграции не происходит: вокруг имплантата со временем формируется фиброзная капсула. Благодаря высокой прочности и модулю упругости, вдвое превышающему титановый, КХС используются для крупных субпериостальных (накостных) конструкций.

5. Инновационные сплавы (Roxolid — Ti-Zr)

Roxolid представляет собой высокопрочный сплав, содержащий около 15% циркония и 85% титана, разработанный компанией Straumann специально для применения в дентальной имплантологии. Преимуществом данного материала является более высокая прочность при меньшем диаметре имплантата, что позволяет снизить травматичность операции и сохранить больший объем костной ткани.

6. Тантал

Тантал – это прочный металл, обладающий хорошей биосовместимостью и устойчивостью к воздействию кислот и щелочей. Компания Zimmer заявляет о превосходстве тантала над титаном по ряду характеристик. Имплантаты Zimmer выпускаются с двумя типами поверхности — равномерно шероховатой и с гидроксиапатитовым покрытием. Трабекулярная структура поверхности данных имплантатов максимально приближена по внешнему виду к архитектонике губчатой кости человека. Такая конфигурация обеспечивает эффективную остеоинтеграцию на клеточном уровне, поскольку ткань прорастает внутрь имплантата.

Проведенный анализ показывает, что выбор материала для дентальных имплантатов определяется сложным балансом между механическими свойствами, биосовместимостью и эстетическими требованиями. Титан сохраняет позиции безусловного лидера, однако развитие нанотехнологий и совершенствование керамических материалов открывают новые перспективы для создания имплантатов следующего поколения.

Основные технологические способы изготовления имплантов.

Конструктивные особенности зубных имплантатов определяются не только медико-биологическими требованиями, но и уровнем развития современных производственных технологий. Критическое значение имеют не только свойства исходного материала (например, титана), но и способы его обработки. Даже относительно простые

технологические приемы способны существенно улучшить биосовместимость имплантата и повысить его механическую надежность. Это особенно важно, учитывая, что миниатюрная конструкция должна выдерживать значительные жевательные нагрузки, возникающие в полости рта.

Особое внимание в процессе производства уделяется поверхности имплантата. Именно от ее характеристик зависят не только прочностные параметры, но и способность костных клеток к адгезии, а также эффективность функционирования всей биомеханической системы «искусственный зуб — имплантат — челюстная кость».

Ключевые задачи производственного процесса:

1. Обеспечение максимальной биосовместимости материала.

2. Формирование на поверхности микроструктуры, оптимальной для контакта с костной тканью.

3. Придание имплантату геометрии, обеспечивающей максимальную площадь соприкосновения с костью для достижения надежной фиксации.

Основные методы изготовления

1. Фрезерование (механическая обработка резанием)

Данный метод заключается в вытачивании имплантата из цельной металлической заготовки с использованием станочного оборудования.

Достоинства: технологический процесс не влечет за собой изменения химических свойств титана.

Недостатки: после механической обработки поверхность не является идеальной; на ней могут сохраняться микротрещины и следы режущего инструмента. Указанные дефекты выступают в качестве зон концентрации напряжений, что со временем может привести к усталостному разрушению имплантата.

2. Обработка давлением (ковка и ротационная обкатка)

Сущность метода заключается в придании металлу необходимой конфигурации посредством силового воздействия.

Штамповка: металл подвергается сжатию в специальной форме. Холодная штамповка способствует упрочнению титана, однако сам материал в холодном состоянии обладает ограниченной технологической пластичностью, что затрудняет получение сложных геометрических форм. Горячая штамповка облегчает формообразование, но не приводит к повышению прочностных характеристик.

Поверхностное пластическое деформирование (наклеп): обработка поверхности детали специальными роликами, в результате которой происходит уплотнение металла в зоне контакта.

Достоинства: достигается высокая гладкость и точность поверхности. Принципиальным преимуществом является избирательное упрочнение: упрочняется только поверхностный слой, тогда как внутренние объемы металла сохраняют эластичность. Это создает оптимальное сочетание износостойкой поверхности и упругой основы, механические характеристики которой приближены к свойствам костной ткани.

3. Методы порошковой металлургии (формирование пористых структур)

Технология предполагает спекание титанового порошка в термических печах, в результате чего формируется изделие с пористой структурой, напоминающей губку.

Достоинства: возможность создания имплантатов, внутрикостная часть которых обладает пористостью. Костная ткань прорастает в поры, что обеспечивает значительную площадь контакта и высокую стабильность фиксации. Кроме того, пористый титан характеризуется сниженным модулем упругости (модулем Юнга), что приближает его механические свойства к свойствам костной ткани и благоприятно сказывается на биомеханической совместимости.

Недостатки: пористый металл обладает существенно меньшей прочностью по сравнению с компактным (цельным). Например, его сопротивление сжимающим нагрузкам может быть в четыре раза ниже, чем у обычного титана.

4. Литье (заливка расплава в форму)

Метод основан на заполнении готовой литейной формы расплавленным титаном.

Достоинства: возможность получения изделий практически любой, в том числе сложной, конфигурации.

Недостатки: сложность контроля внутренней структуры металла и, следовательно, его прочностных характеристик. Последующее упрочнение литых изделий затруднительно. По этой причине литье редко применяется для производства имплантатов.

Значение микроструктуры поверхности

Характер взаимодействия тканей организма с имплантатом в значительной степени определяется микрорельефом его поверхности. Исследования показали, что модификация поверхности (создание шероховатости, увеличение толщины оксидной пленки) способствует ускорению и повышению надежности остеоинтеграции.

- Улучшение адгезии: шероховатая поверхность характеризуется повышенной поверхностной энергией. Это способствует более эффективной адсорбции белков, прикреплению фибробластов, остеобластов и фибриновых волокон, которые формируют костную ткань.

- Увеличение площади контакта: микрорельеф увеличивает площадь соприкосновения имплантата с костной структурой, что повышает прочность соединения и снижает удельную нагрузку на костную ткань.

- Оптимальные параметры: наиболее благоприятными для прорастания костной ткани являются поры и углубления размером от 70 до 700 мкм.

Цифровые технологии в производстве имплантатов.

Современная наука характеризуется активным внедрением информационных технологий в стоматологическую практику. Цифровые решения используются на всех этапах лечения. Наиболее значимым нововведением является компьютерное 3D-моделирование с применением CAD/CAM-систем.

Понятие CAD/CAM:

- CAD (Computer Aided Design) – система автоматизированного проектирования, позволяющая создавать компьютерные трехмерные модели.

- CAM (Computer Aided Manufacturing) — система автоматизированного производства, обеспечивающая изготовление изделий на основе цифровых моделей.

В стоматологии применение CAD/CAM-технологий позволяет изготавливать зубные протезы и ортопедические конструкции с высочайшей точностью, обеспечивая идеальное соответствие анатомическим особенностям пациента.

Технологическая цепочка процесса:

1. Сбор данных: с помощью оптического или механического сканера выполняется считывание рельефа протезного ложа с последующим преобразованием информации в цифровой формат (создание 3D-модели).

2. Моделирование: на экране компьютера специалист (врач или зубной техник) строит трехмерную модель будущей конструкции.

3. Изготовление: автоматизированный станок выполняет обработку выбранного материала в соответствии с разработанной моделью.

3D-моделирование применяется в стоматологии на протяжении более 20 лет. В настоящее время в мире насчитывается свыше 70 подобных систем, из которых 12 разработаны в России. Указанные системы подразделяются на два типа:

- Индивидуальные (кабинетные): позволяют выполнить реставрацию непосредственно в стоматологическом кресле в присутствии пациента (например, CEREC 3).

- Централизованные (лабораторные): используются в зуботехнических лабораториях для серийного изготовления конструкций (например, Pro CERA).

Преимущества CAD/CAM-технологий по сравнению с традиционными методиками:

- Исключительно высокая точность изготовления каркасных конструкций.

- Существенное сокращение времени изготовления.

- Повышение производительности труда врача и зубного техника.
- Автоматизация и оптимизация рабочих процессов.
- Расширенный выбор доступных материалов.
- Возможность применения непосредственно в клинических условиях.
- Реализация индивидуального подхода в каждой клинической ситуации.

Значение качества поверхности для остеоинтеграции.

Как было показано ранее, геометрическая форма имплантата играет определяющую роль в обеспечении первичной механической стабильности. Однако не менее важным, а по мнению многих исследователей, ключевым фактором долгосрочного успеха выступает качество поверхности. Именно поверхность служит интерфейсом, через который происходит взаимодействие между инородным телом и живым организмом. От свойств поверхности зависит, будет ли имплантат воспринят тканями как чужеродный объект или интегрируется в единую биологическую систему.

Ключевым показателем в данном контексте выступает **концепция BIC (Bone-Implant Contact)** — площади непосредственного контакта костной ткани с поверхностью имплантата. Результаты исследований убедительно демонстрируют, что гладкие поверхности обеспечивают значительно менее эффективную остеоинтеграцию по сравнению с имплантатами, обладающими развитым микрорельефом. Шероховатость создает условия для механической адгезии клеток, стимулирует их пролиферацию и дифференцировку, направляя процесс костеобразования в благоприятное русло. Именно поэтому первостепенной задачей является создание на поверхности имплантата оптимального микрорельефа и химического состава.

Классификация методов модификации поверхности

Классификация методов обработки внутрикостной части имплантатов

Существующие технологии модификации внутрикостной поверхности дентальных имплантатов могут быть систематизированы в четыре основные категории, каждая из которых характеризуется специфическими достоинствами и ограничениями.

1. Механическая обработка (формирование рельефа)

Данная группа методов базируется на пластической деформации либо эрозионном воздействии на поверхностный слой.

Накатка (рельефное формообразование) – технология, при которой с помощью специального инструмента на поверхности выдавливаются микроскопические канавки и выступы. Данный способ относится к числу наиболее ранних и простых методик создания макрорельефа.

Пескоструйная обработка – метод, заключающийся в направлении под высоким давлением потока абразивных частиц (чаще всего оксида алюминия) на обрабатываемую поверхность. Частицы формируют микроскопические углубления, создавая равномерную шероховатость. Согласно литературным данным, оптимальный размер абразивных частиц для достижения максимальных показателей площади контакта кость-имплантат (BIC) составляет около 75 мкм.

2. Удаление материала (аддитивные методы)

Методы данной категории позволяют создавать более тонкий и контролируемый рельеф на химическом или физическом уровне.

Травление кислотами — технология, при которой имплантат подвергается воздействию агрессивных химических реагентов (смеси серной, соляной и других кислот), избирательно «разъедающих» поверхностный слой. Данный метод обеспечивает более равномерную микроструктуру по сравнению с механической обработкой, однако точное регулирование размера пор представляет определенные сложности. В клинической практике кислотное травление часто комбинируют с предварительной пескоструйной обработкой (технология SLA – Sandblasted, Large-grit, Acid-etched): на первом этапе песком формируется крупный рельеф, после чего кислоты сглаживают острые пики, сохраняя необходимую топографию.

Лазерная обработка – высокотехнологичный метод, позволяющий выжигать на поверхности микроуглубления с заданными параметрами глубины, диаметра и пространственного рисунка. Данная технология открывает возможности для создания поверхности с идеально контролируемой архитектоникой, что способствует направленной миграции клеток.

3. Добавление материала (субтрактивные методы)

Указанные методы направлены не только на изменение рельефа, но и на модификацию химического состава поверхности посредством нанесения дополнительных слоев, в том числе обладающих биоактивными свойствами.

Плазменное напыление — технология, при которой частицы материала (титана или биоактивной керамики) расплавляются в высокотемпературной плазменной струе и с большой скоростью осаждаются на поверхность имплантата, формируя пористый слой.

Детонационно-газовый метод — разновидность газотермического напыления, при котором частицы порошка разгоняются и нагреваются за счет энергии взрывной волны (продуктов детонации газовой смеси) и буквально «выстреливаются» в поверхность.

Золь-гель технология (шликерный метод) — «химический» способ нанесения тончайших пленок (толщиной около 1 мкм). Имплантат погружается в жидкий раствор (золь), содержащий частицы гидроксиапатита. При определенных условиях золь трансформируется в гель, и на поверхности формируется равномерное покрытие.

Магнетронное распыление – вакуумный метод, при котором ионы плазмы выбивают атомы из мишени (например, из гидроксиапатита), которые затем осаждаются на имплантат, формируя тончайший слой. Для распыления диэлектрических материалов, таких как керамика, применяется высокочастотное (ВЧ) магнетронное распыление.

4. Пассивация (формирование оксидного слоя)

Титан обладает уникальным свойством: на его поверхности самопроизвольно образуется пассивная оксидная пленка (TiO_2), выполняющая защитную функцию и препятствующая коррозии. Технологическая пассивация представляет собой совокупность приемов (обработка кислотами, термическое воздействие, стерилизация), направленных на увеличение толщины и повышение плотности этой естественной пленки. Однако в научной среде отсутствует единое мнение относительно оптимальной толщины оксидного слоя: чрезмерно толстый слой может состоять из менее стабильных модификаций оксида и разрушаться под действием нагрузок, что приведет к проникновению микрочастиц титана в окружающие ткани. Примером коммерческой реализации данного подхода служит технология TiUnite (Nobel Biocare).

5. Биоактивные покрытия на основе гидроксиапатита

Особое место среди методов поверхностной модификации занимает нанесение биоактивных покрытий, преимущественно из гидроксиапатита. Логика применения данного подхода обусловлена естественными биологическими процессами: именно гидроксиапатит ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ является основной минеральной составляющей костной ткани (около 50% массы кости) и зубной эмали (до 96%).

Концептуальная идея заключается в объединении механической прочности титановой основы с биологической активностью поверхности, имитирующей нативную костную ткань. Предполагается, что такое покрытие будет способствовать не просто механической фиксации, а полноценной биохимической интеграции — остеоинтеграции.

Вопрос о целесообразности применения биоактивных покрытий остается дискуссионным.

Аргументы в пользу применения:

Многочисленные исследования *in vivo* подтверждают, что гидроксиапатитовое покрытие увеличивает площадь контакта костной ткани с имплантатом (BIC) на ранних этапах заживления, ускоряя и улучшая процессы интеграции, что положительно сказывается на клинических исходах.

Аргументы против применения:

- Ряд экспериментальных работ не выявил значимых преимуществ покрытий по сравнению с чистым титаном, имеющим развитую микроструктуру поверхности.

- Существуют данные о резорбции (рассасывании) покрытия спустя год после установки. На месте деградировавшего гидроксиапатита может формироваться не костная, а фиброзная ткань.

- Основная опасность связана с риском отслоения или скалывания частиц покрытия. Микрочастицы, отделившиеся от поверхности имплантата, способны инициировать локальную воспалительную реакцию, что приводит к резорбции костной ткани и развитию периимплантита.

Особенности обработки трансмукозальной части (шейки импланта)

Если в отношении внутрикостной части имплантата существует однозначное требование – наличие развитой шероховатости для обеспечения эффективной остеоинтеграции, то к поверхности шейки, контактирующей с мягкими тканями десны, предъявляются принципиально иные, а в определенной степени и противоречивые требования. В данной зоне необходим компромисс между биологическими факторами и условиями поддержания гигиены.

С одной стороны, клетки соединительной ткани (фибробласты) демонстрируют хорошую адгезию к шероховатой поверхности. С другой стороны, эпителиальные клетки, формирующие защитный барьер, более эффективно мигрируют и закрепляются на гладкой поверхности. Кроме того, любые микронеровности и поры в области десневого контура служат идеальной средой для колонизации бактерий, что создает предпосылки для развития мукозита и периимплантита – основных причин отторжения имплантатов на поздних этапах послеоперационного периода.

Для обеспечения плотного прилегания мягких тканей (формирования полноценного эпителиального барьера) и минимизации риска бактериальной инвазии поверхность шейки имплантата и его абатмента должна характеризоваться максимальной гладкостью с классом чистоты обработки 7–10. Достижение такой зеркальной гладкости обеспечивается методами электрохимической полировки либо пластического деформирования (обкатки роликами).

Таким образом, создание оптимальной конструкции имплантата представляет собой задачу поиска баланса и выбора наилучшей комбинации технологических приемов обработки для различных функциональных зон с учетом сложных и многогранных требований, предъявляемых живым организмом.

Периимплантит: этиология, патогенез и влияние конструктивных особенностей имплантата на развитие воспалительных осложнений.

Дентальная имплантология в настоящее время относится к числу наиболее активно развивающихся направлений современной стоматологической практики. Во всем мире наблюдается устойчивый рост числа пациентов, пользующихся как съемными, так и несъемными ортопедическими конструкциями, фиксированными на внутрикостных имплантатах. За четыре десятилетия, прошедших с момента начала массового внедрения корневидных внутрикостных имплантатов, индустрия претерпела значительное расширение: сотни производителей поставляют компоненты для специалистов по всему миру. В связи с этим вопросы повышения эффективности дентальной имплантации и предупреждения осложнений приобретают особую актуальность.

Однако следует признать, что активное развитие и демократизация рынка имплантационных систем, снижение себестоимости производства и, как следствие, несоблюдение международных протоколов установки имплантатов приводят к увеличению числа побочных эффектов. Одним из наиболее серьезных и широко распространенных осложнений выступает периимплантит, частота развития которого, согласно данным клинических исследований, составляет от 12 до 43% при использовании различных имплантационных систем. По сведениям Mia Rakic и соавторов, от 10 до 28% пациентов с установленными имплантатами сталкиваются с периимплантитом на разных этапах лечения,

что свидетельствует о высокой значимости проблемы инфекционных осложнений в данной области.

Определение, классификация и клинические проявления периимплантита.

В соответствии с Международной классификацией болезней (МКБ), периимплантит относится к категории воспалительных заболеваний челюстных костей. Данное патологическое состояние развивается в твердых и мягких тканях, окружающих дентальный имплантат, и характеризуется воспалительной реакцией с прогрессирующей убылью опорной костной структуры. При отсутствии своевременного лечения данный процесс неизбежно приводит к утрате имплантата.

В динамике развития заболеваний тканей, окружающих имплантат, выделяют две последовательные стадии:

1. Периимплантитный мукозит – воспалительный процесс, локализованный исключительно в мягких тканях, прилегающих к имплантату, без признаков деструкции костной ткани. Данное состояние является обратимым и представляет собой предшественник более тяжелой формы патологии.

2. Периимплантит — прогрессирующее воспаление, сопровождающееся деструкцией костной ткани, обеспечивающей стабильность имплантата. На данной стадии требуется хирургическое вмешательство.

Клиническая картина периимплантита характеризуется следующими проявлениями:

- болевой синдром в области установленного имплантата;
- отек и гиперемия (покраснение) десны в зоне имплантации;
- формирование десневых карманов и свищевых ходов;
- кровоточивость либо гноетечение из области, окружающей имплантат;
- прогрессирующее снижение уровня костной ткани;
- по мере усугубления патологического процесса — развитие подвижности имплантата с последующей утратой его функциональности. При периимплантите III–IV степени вероятность отторжения имплантата оценивается как крайне высокая.

Симптоматика может манифестировать как в ранние сроки после оперативного вмешательства, так и в отдаленном периоде — спустя месяцы и даже годы после установки имплантата.

Этиология и факторы риска развития периимплантита.

Причины возникновения периимплантита могут быть систематизированы в три основные категории: ятрогенные факторы (врачебные ошибки), особенности используемой имплантационной системы и факторы, обусловленные состоянием здоровья пациента и его поведением.

Врачебные ошибки и нарушения клинических протоколов.

В раннем послеоперационном периоде осложнения зачастую связаны с техническими погрешностями, допущенными на этапах планирования и проведения вмешательства:

- неадекватная оценка факторов риска и имеющихся противопоказаний;
- нарушение правил асептики и антисептики;
- некорректное позиционирование имплантата либо формирователя десневого контура;
- несоответствие размеров костного ложа параметрам устанавливаемого имплантата;
- избыточное усилие при вкручивании (более 45 Н/см), приводящее к компрессионному некрозу окружающих тканей;
- некачественно выполненное протезирование, вызывающее перегрузку и травматизацию тканей;
- наличие микрозазоров в соединении имплантата с абатментом.

Факторы, связанные с пациентом и состоянием его тканей.

В отдаленные сроки ключевое значение приобретают исходные характеристики тканей пациента, а также его приверженность гигиеническим рекомендациям.

- Гигиена полости рта. Конструктивные особенности имплантатов и ортопедических коронок создают предпосылки для аккумуляции зубного налета и образования зубного камня. Недостаточный уровень гигиены, пренебрежение профилактическими осмотрами и профессиональной чисткой являются частыми причинами развития воспалительных изменений. В целом риски возникновения периимплантита сопоставимы с рисками развития пародонтита и утраты естественных зубов.

- Биотип костной ткани. Согласно классификации Misch, плотность костной ткани имеет определяющее значение. В плотной кости типов D1 и D2 периимплантит встречается значительно чаще по сравнению с рыхлой костью типов D3 и D4. Высокая минеральная плотность требует применения более агрессивных протоколов для достижения первичной стабильности, что повышает риск компрессионного повреждения тканей.

- Биотип слизистой оболочки. Тонкий биотип десны характеризуется сниженной барьерной функцией. После формирования периимплантитной костной «воронки» тонкая слизистая легче подвергается бактериальной контаминации, что ускоряет прогрессирование патологического процесса.

Общие факторы риска. К числу значимых общих факторов относятся: курение (согласно данным исследований, среди курящих пациентов периимплантит диагностируется в 72,7% случаев против 27,3% у некурящих), наличие хронических заболеваний пародонта в анамнезе, бруксизм, некомпенсированный сахарный диабет. Системные заболевания, возникшие после успешной остеоинтеграции имплантата, не оказывают прямого изолированного влияния на риск развития периимплантита.

Факторы, связанные с хирургической методикой и протезированием.

- Методика имплантации и сроки нагрузки. Немедленная нагрузка требует достижения высокого крутящего момента, что само по себе является фактором риска, а открытый способ заживления дополнительно усугубляет ситуацию. Применение немедленной нагрузки существенно повышает вероятность развития периимплантита.

- Тип фиксации коронки. Цементная фиксация сопряжена с риском развития «перицементита» — проталкивания избытков цемента в поддесневую зону, что отягощает течение периимплантита. Винтовая фиксация представляется более предпочтительной с гигиенической точки зрения.

- Качество протезирования. Ортопедическая конструкция должна обеспечивать удобство для проведения гигиенических мероприятий, поскольку скопление зубного налета под коронкой неизбежно приводит к развитию воспалительных изменений.

Роль материала, поверхности и покрытия имплантата в развитии периимплантита.

Вопрос о том, каким образом конструктивные особенности и состав имплантата влияют на предрасположенность к развитию периимплантита, требует отдельного детального рассмотрения. В данном контексте необходимо дифференцировать микроструктуру поверхности, макрогеометрию имплантата и, что особенно значимо в свете современных исследований, химический состав нанесенных покрытий.

Влияние микроструктуры и макродизайна имплантата на риск развития периимплантита.

С определенной долей условности можно утверждать, что микроструктура поверхности сама по себе не выступает в качестве фактора, защищающего от развития воспалительных осложнений. Различные производители предлагают запатентованные методики обработки поверхности (SLActive, Laser-Lok и другие), направленные на улучшение процессов остеоинтеграции. Однако сверхшероховатая поверхность, будучи эффективной для прорастания костной ткани, становится проблематичной в случае ее бактериальной контаминации: проведение качественной очистки такой поверхности при развившемся воспалительном процессе представляет значительные сложности. На сегодняшний день не существует независимых статистических данных, подтверждающих

преимущество какой-либо конкретной микроструктуры в отношении устойчивости к периимплантиту.

В отличие от микрорельефа, макродизайн (геометрическая конфигурация) имплантата может выступать непосредственной причиной возникновения осложнений. Имплантаты, характеризующиеся агрессивной глубокой резьбой, при высоком установочном моменте оказывают избыточное давление на костную ткань, провоцируя компрессионное повреждение. Уменьшение диаметра и длины имплантата сопровождается увеличением давления на костную структуру, а также создает дополнительные сложности для проведения гигиенических мероприятий в подкоронковой зоне.

Антимикробные покрытия: современное направление в профилактике периимплантита.

Наиболее перспективным подходом в контексте влияния материала имплантата на риск развития периимплантита является разработка и клиническое внедрение антимикробных покрытий. Результаты исследований свидетельствуют о том, что применение таких покрытий способно снизить частоту возникновения периимплантита до 90% по сравнению с традиционными имплантационными системами. Основная задача данных покрытий заключается в предотвращении бактериальной колонизации и формирования биопленок (БП), которые представляют собой главную защитную структуру для патогенных микроорганизмов.

В настоящее время разработаны различные типы антимикробных покрытий, которые классифицируются по составу и механизму действия (табл. 2).

Таблица 2. Виды антимикробных покрытий для дентальных имплантатов

Тип покрытия	Пример покрытия	Антимикробная активность	Преимущества	Особенности
Металлические	Серебряные наночастицы, тантал, стронций	Высокая	Долгосрочная защита от бактерий, значительная антимикробная активность	Возможна цитотоксичность
Полимерные	PLA, PGA матрицы с антибиотиками	Контролируемое высвобождение антибиотиков, антибактериальная защита	Продолжительное высвобождение агентов, высокая биосовместимость	Риск антибиотикорезистентности
Керамические	Гидроксиапатит с добавлением Ag, Cu,Sr	Противогрибковая и антибактериальная активность	Улучшает остеоинтеграцию	Антимикробная активность ограничена, высокая стоимость
Биологические	Антимикробные пептиды (GL13K,RRP9W4N)	Разрушение мембран бактерий, широкий спектр действия	Низкая вероятность резистентности	Требуются доп. исследования биосовместимость и срока службы

Клиническая эффективность антимикробных покрытий.

Многочисленные клинические и экспериментальные исследования подтверждают эффективность данного подхода. В обзоре, выполненном Nansi López-Valverde и соавторами (включавшем анализ исследований *in vivo* по состоянию на декабрь 2020 года, всего 212 имплантатов), все проанализированные работы продемонстрировали положительное влияние антибактериальных поверхностей на процессы остеоинтеграции. Металлические покрытия (на основе тантала, стронция, серебра) показали выраженную активность в подавлении бактериальных инфекций.

В исследовании Vinita Vishwakarma и соавторов установлено, что применение покрытий на основе гидроксиапатита увеличивает скорость остеоинтеграции на 45%, а дополнительное введение серебра позволяет снизить количество бактериальных колоний на

60%. Использование многофункциональных покрытий способно уменьшить риск развития таких осложнений, как периимплантит, более чем на 70%.

Abhishek Tiwari и соавторы изучали покрытия с контролируемым высвобождением антибиотических препаратов (гентамицин). Результаты показали, что биодеградируемые полимерные покрытия обеспечивают пролонгированное высвобождение антибиотика в течение 42 дней, снижая бактериальную активность на 50–85% в первые 24 часа после установки.

Особый интерес представляют покрытия на основе антимикробных пептидов. В исследовании Isha Mutreja и соавторов покрытие, содержащее пептид GL13K, продемонстрировало снижение жизнеспособности Streptococcus gordonii и Streptococcus mutans более чем на 50% по сравнению с контрольными образцами (рис. 2). Данное покрытие сохраняло свои прочностные характеристики после ультразвуковой обработки и проявляло совместимость с клетками пульпы зуба человека.

Клинические исходы использования антимикробных покрытий

Многочисленные исследования подтверждают эффективность данного подхода. В обзоре Nansi López-Valverde et al. (анализ исследований in vivo до декабря 2020 года, 212 имплантатов) все работы показали положительное влияние антибактериальных поверхностей на остеоинтеграцию. Металлические покрытия (тантал, стронций, серебро) продемонстрировали значительную активность в борьбе с бактериальными инфекциями.

Исследование Vinita Vishwakarma et al. показало, что применение покрытий на основе гидроксиапатита увеличивает скорость остеоинтеграции на 45%, а добавление серебра позволяет снизить количество бактериальных колоний на 60%. Многофункциональные покрытия способны снизить риск осложнений, таких как периимплантит, в более чем 70% случаев.

Abhishek Tiwari et al. изучали покрытия с контролируемым высвобождением антибиотиков (гентамицин). Было показано, что биодеградируемые полимерные покрытия обеспечивают пролонгированное высвобождение препарата до 42 дней, снижая бактериальную активность на 50-85% в первые 24 часа.

Особый интерес представляют покрытия на основе антимикробных пептидов. В исследовании Isha Mutreja et al. покрытие на основе пептида GL13K продемонстрировало снижение жизнеспособности *Streptococcus gordonii* и *Streptococcus mutans* более чем на 50% по сравнению с контролем (рис. 2*)*. Покрытие сохраняло прочность после ультразвуковой обработки и было совместимо с клетками пульпы зуба человека.

Обсуждение рисков и ограничений

Несмотря на высокую эффективность, применение антимикробных покрытий сопряжено с определенными рисками:

1. Цитотоксичность: Высокие концентрации металлических наночастиц (серебро, медь) могут вызывать воспалительные реакции и отторжение.

2. Антибиотикорезистентность: Длительное высвобождение антибиотиков из полимерных матриц требует тщательного контроля, чтобы не спровоцировать развитие устойчивых штаммов бактерий.

3. Механическая нестабильность: Несоответствие механических свойств покрытия и основы имплантата может приводить к его разрушению и нарушению остеоинтеграции.

Стерильные, но загрязненные: скрытая угроза на этапе производства.

Помимо сознательно наносимых покрытий, существует недостаточно учитываемый аспект, связанный с чистотой поверхности имплантата на этапе его изготовления. Исследования, проведенные фондом CleanImplant с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), показали, что имплантаты, позиционируемые производителями как стерильные в индивидуальной упаковке, могут содержать загрязнения производственного происхождения: органические остатки, металлическую стружку (частицы никеля, вольфрама, железа), микрофрагменты пластика от упаковочных материалов.

Данные инородные тела размером от 0,2 до 7,2 мкм обладают противоспалительным потенциалом. Попадая в костное ложе, они активируют макрофаги, инициируя каскад провоспалительных цитокинов (TNF-α, IL-1β, IL-6) и стимулируя активность остеокластов. Указанные процессы могут служить причиной ранней резорбции костной ткани и выступать триггером развития периимплантита даже в условиях идеально выполненного хирургического вмешательства.

Принципы диагностики и лечения периимплантита.

Диагностика периимплантита базируется на данных клинического стоматологического осмотра, анализе жалоб пациента и результатах рентгенологических методов исследования (ортопантомография, конусно-лучевая компьютерная томография), позволяющих оценить степень убыли костной ткани.

Лечение периимплантита представляет собой сложный многоэтапный процесс, эффективность которого находится в прямой зависимости от качества используемой имплантационной системы.

Этап 1. Консервативная терапия

Данный этап направлен на купирование воспалительного процесса. Включает проведение профессиональной гигиены полости рта, удаление зубных отложений, орошение периимплантатных карманов антисептическими растворами, применение лазерной терапии.

Этап 2. Хирургическое вмешательство

Проводится при отсутствии эффекта от консервативной терапии. Включает отслаивание слизисто-надкостничного лоскута, удаление патологических грануляций, тщательную очистку и детоксикацию поверхности имплантата, заполнение костного дефекта остеокондуктивным материалом с последующим покрытием мембраной.

Важное примечание: В случае применения имплантатов низкой ценовой категории с несовершенной поверхностью проведение эффективной очистки зачастую оказывается невозможным. В подобной ситуации имплантат подлежит незамедлительному удалению, а основная задача врача сводится к санации воспалительного очага и сохранению имеющегося объема костной ткани.

Этап 3. Удаление имплантата

При рецидивирующем течении заболевания, выраженной деструкции костной ткани либо невозможности адекватной очистки поверхности имплантат подлежит удалению.

Заключение и ключевые принципы профилактики.

Завершая обсуждение этиологии периимплантита, можно заключить, что данное патологическое состояние является результатом сложного взаимодействия множества факторов. В значительной степени (до 90%) риски формирования осложнений закладываются на этапах оперативного вмешательства и последующего протезирования. Понимание этого позволяет сформулировать основные принципы профилактики:

- Выбор качественной имплантационной системы: применение имплантатов с чистой, сертифицированной поверхностью, а у пациентов из групп риска — с доказанной эффективностью антимикробных покрытий.
- Корректный подбор макродизайна: исключение необоснованного использования агрессивной резьбы в условиях плотной костной ткани, тщательный выбор диаметра имплантата.
- Неукоснительное соблюдение клинического протокола: точное выполнение хирургического протокола, отказ от избыточного крутящего момента при установке.
- Гигиенический контроль: своевременное выявление мукозита является ключевым фактором сохранения костной ткани и обеспечения долгосрочного успеха имплантации.

Перспективные научные исследования должны быть направлены на разработку многофункциональных покрытий, сочетающих высокую антимикробную активность с биосовместимостью и механической стабильностью, что позволит минимизировать риск развития осложнений в отдаленном периоде наблюдения.

Вывод

Дентальная имплантация является наиболее перспективным методом замещения дефектов зубных рядов, однако успех лечения определяется комплексом взаимосвязанных факторов. Титан и его сплавы сохраняют позиции «золотого стандарта» благодаря оптимальному сочетанию биоинертности, коррозионной стойкости и механической прочности, хотя активное внедрение керамических материалов (диоксид циркония) и инновационных сплавов (Roxolid) открывает новые перспективы. Технологические методы изготовления и обработки поверхности имплантата играют ключевую роль: шероховатость внутрикостной части необходима для эффективной остеоинтеграции, тогда как гладкость шейки обеспечивает надежный эпителиальный барьер и профилактику бактериальной колонизации.

Периимплантит, развивающийся в 12–43% случаев, представляет собой серьезное осложнение многофакторной этиологии, включающей врачебные ошибки, особенности имплантационной системы и факторы, связанные с пациентом. Наиболее перспективным направлением профилактики является применение антимикробных покрытий, способных снизить частоту осложнений до 90%. Скрытую угрозу представляет загрязнение поверхности имплантатов производственными частицами, обладающими провоспалительным действием.

Таким образом, долгосрочный успех дентальной имплантации обеспечивается выбором качественной имплантационной системы с чистой, сертифицированной поверхностью, неукоснительным соблюдением хирургического протокола, адекватной гигиеной и своевременным выявлением мукозита. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку многофункциональных покрытий, сочетающих антимикробную активность с биосовместимостью и механической стабильностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Анализ профессиональных ошибок и осложнений при стоматологической имплантации с целью повышения ее эффективности / А.В. Камалян, Г.А. Пашинян, Э.А. Базикян. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-professionalnyh-oshibok-i-oslozhnenii-pri-stomatologicheskoy-implantatsii-s-tselyu-povysheniya-ee-effektivnosti/pdf (дата обращения: 15.12.2025).

2) Выбор биосовместимых композиционных покрытий на импланты / У.С. Рыбакова, Д.В. Раводина, С.С. Ивасев [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов конф. – Красноярск : СибГУ, 2016. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-biosovmestimyh-kompozitsionnyh-pokrytiy-na-implanty/pdf (дата обращения: 20.12.2025).

3) Дентальная имплантация. Материалы и компоненты / В.А. Загорский // Символ науки. – 2016. – № 9. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dentalnaya-implantatsiya-materialy-i-komponenty/pdf (дата обращения: 25.12.2025).

4) Дентальная имплантология : учебное пособие / Ф.З. Мирсаева, М.Б. Убайдуллаев, А.Б. Вяткина, С.Ш. Фаткуллина ; под ред. проф. Ф.З. Мирсаевой. – Уфа : Изд-во ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, 2015. – 124 с. (дата обращения: 23.12.2025).

5) Дентальная имплантология: основы теории и практики / В.Л. Параскевич. – М. : Медицинское информационное агентство, 2006. (дата обращения: 20.12.2025).

6) Имплантаты на основе металлических материалов: обзор материалов и конструкций / А.Ю. Королёв. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/implantaty-na-osnove-metallicheskih-materialov-obzor-materialov-i-konstruktsiy/pdf (дата обращения: 10.01.2026).

7) Клинические исходы и осложнения долгосрочных эффектов антимикробных покрытий на стоматологические имплантаты / Ю.Г. Авдюшкина // Холодная наука. – 2024. – № 9. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/klinicheskie-ishody-i-oslozhneniya-dolgosrochnyh-effektov-antimikrobnyh-pokrytiy-na-stomatologicheskie-implantaty/pdf (дата обращения: 18.01.2026).

8) Морфофункциональная характеристика системного воздействия имплантов с покрытием на основе сверхтвердых соединений / И.Ф. Ахтямов, Ф.В. Шакирова, А.Р. Яруллин [и др.] // Гений Ортопедии. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 324–329. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/morfofunktsionalnaya-harakteristika-sistemnogo-vozdeystviya-implantov-s-pokrytiem-na-osnove-sverhtverdyh-soedineniy/pdf (дата обращения: 25.01.2026).

9) Обзор свойств материалов, используемых в производстве дентальных имплантатов / С.А. Чертов, С.В. Стойков. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-svoystv-materialov-ispolzuemyh-v-proizvodstve-dentalnyh-implantatov/pdf (дата обращения: 01.02.2026).

10) Ортопедическое лечение с опорой на дентальные имплантаты / К.Е. Миш ; пер. с англ. Л.Т. Хисамутдинова. – М. : Рид Элсивер, 2010. – 616 с.

11) Возможности применения трёхмерного моделирования в имплантационной стоматологии / Т.Н. Позднякова // Символ науки. – 2016. – № 9. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-primeneniya-tryohmernogo-modelirovaniya-v-implantatsionnoy-stomatologii/pdf (дата обращения: 10.02.2026).

12) Сравнительная характеристика материалов, применяемых в стоматологической имплантации / А.А. Егоров, М.Н. Дровосеков, А.М. Аронов [и др.]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-harakteristika-materialov-primenyaemyh-v-stomatologicheskoy-implantatsii/pdf (дата обращения: 20.02.2026).

13) Технологии создания биосовместимых покрытий на импланты / У.С. Рыбакова, С.С. Ивасев, Д.В. Раводина. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-sozdaniya-biosovmestimyh-pokrytiy-na-implanty/pdf (дата обращения: 03.03.2026).

УДК 616.31

ТЕХНИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ БОРОВ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

К.Е. Шорохова

Научный руководитель – **Е.В. Сергеев**, ассистент

Ярославский государственный медицинский университет

В работе представлен анализ технологии производства стоматологических боров. Рассмотрены классификации инструментов по материалу изготовления и их конструктивные особенности. Изучены два основных метода нанесения алмазного покрытия: гальванический и метод спекания. Особое внимание уделено вопросам износостойкости как ключевому фактору эффективности работы боров. Проанализированы виды изнашивания и факторы, влияющие на долговечность режущих инструментов. Определены технологические пути повышения срока службы режущих инструментов.

Ключевые слова: *стоматологический бор, алмазный инструмент, износостойкость, технология изготовления, гальванический метод, метод спекания, классификация боров, металлическая связка*

THE TECHNIQUE OF DENTAL BUR MANUFACTURING AND WAYS TO IMPROVE THEIR EFFICIENCY

K.E. Shorokhova

Scientific Supervisor – **E.V. Sergeev**, Assistant

Yaroslavl State Medical University

The work presents an analysis of the technology of production of dental burs. The classifications of instruments by material of manufacture and their design features are considered. Two main methods of applying a diamond coating are studied: galvanic and sintering. Special attention is paid to the issues of wear resistance as a key factor in the effectiveness of burs. The types of wear and factors affecting the durability of cutting tools have been analyzed. Technological ways of increasing the service life of cutting tools have been determined.

Keywords: *dental drill, diamond tool, wear resistance, manufacturing technology, galvanic method, sintering method, classification of drills, metal*

Введение

Стоматологический бор является основным режущим инструментом в арсенале врача-стоматолога, применяемым для препарирования твердых тканей зуба, обработки пломбировочных материалов, а также в ортопедической и хирургической практике. Качество и эффективность проводимого лечения напрямую зависят от рабочих характеристик бора: его остроты, износостойкости и способности сохранять режущие свойства на протяжении всего срока службы. Современный рынок предлагает широкий ассортимент ротационных инструментов, различающихся по материалу, форме, типу покрытия и технологии изготовления. Однако проблема преждевременного износа и потери режущей способности, особенно алмазных боров, остается актуальной, что определяет необходимость глубокого изучения технологических процессов их производства и поиска путей повышения долговечности. В данной работе рассматриваются классификация стоматологических боров, существующие методы их изготовления, анализируются механизмы изнашивания и определяются перспективные направления повышения износостойкости инструментов.

Цель работы: Изучение технологии изготовления стоматологических боров, анализ факторов, влияющих на их износостойкость, и определение перспективных путей повышения эффективности и срока службы алмазных ротационных инструментов.

Стоматологический бор – представляет собой насадки небольшого размера, которые подсоединяются к бормашине и осуществляют такие задачи как: препарирование, удаление инфицированных и некротизированных тканей зуба, подготовка кариозной полости к пломбированию, полировка и так далее.

Этот инструмент состоит из трех частей:

1. Головка – это часть бора, которая контактирует с зубом. Ее форма, размер и материал выбираются врачом в зависимости от клинической ситуации.

2. Шейка соединяет головку с хвостовиком и передает вращательные движения от наконечника к головке.

3. Хвостовик, также известный как стержень, это часть бора, которая вставляется в цангу наконечника.

Классификация боров

Различают несколько видов боров в зависимости от различных характеристик.

Головки боров бывают различных форм: шаровидные, цилиндрические, конусовидные, пламевидные, игловидные и другие. Выбор формы зависит от конкретной клинической ситуации и задачи, которую необходимо выполнить.

Длина хвостовика инструмента зависит от типа наконечника, с которым он будет использоваться при работе.

Оценивая абразивность материала и тип зубьев, выбирают боры для работы: с алмазной крошкой, твердосплавные или стальные.

По материалу изготовления.

Важно отметить, что каждая из упомянутых выше классификаций имеет свои вариации.

Важно рассмотреть классификацию боров по материалу изготовления и дать доплнительную информацию о ней.

Классификация боров по материалу изготовления

Боры стоматологические классифицируются по материалу изготовления для удобного выбора инструмента в зависимости от задачи.

В этом перечне находятся различные категории:

1) Алмазное зерно

Эти стоматологические инструменты считаются дорогостоящими, но очень эффективными.

Для покрытия используют как природные технические алмазы, так и синтетическую алмазную крошку. Натуральные алмазы более устойчивы к стиранию и скалыванию из-за их упорядоченной кристаллической решетки. Для соединения алмазных зерен со стальной заготовкой применяют металлическую связку, нанося ее методом гальванизации или спекания.

Гальваническая заливка улучшает закрепление абразивных гранул и точность работы инструмента за счет уменьшения радиального биения. Важно, чтобы алмазные зерна равномерно погружались в заливку, иначе инструмент быстро изнашивается и забивается. Одноуровневое алмазное покрытие помогает повысить режущую эффективность и снизить нагревание, так как зерна равномерно распределены по поверхности инструмента.

Для изготовления инструментов для зуботехнических работ используют метод спекания с применением железомарганцевого сплава и бронзы в качестве связующего материала.

Некоторые компании используют нитрид титана для защиты алмазных инструментов от загрязнений на рабочей поверхности.

Алмазная крошка применяется для покрытия инструментов и добавляется в полировочные средства для придания абразивности.

2)Рубиновое зерно.

Рубиновые инструменты для обработки пластмассовых изделий в стоматологии не нагревают поверхность, позволяя делать точные корректировки без деформации.

3)Твердосплавное покрытие

Для стоматологических боров и фрез используется твердосплавное покрытие, полученное методом порошковой металлургии. Оно образуется путем сплавления карбида вольфрама с кобальтом. Для создания режущих граней применяется алмазная фрезерная головка, управляемая компьютером, что обеспечивает точную центровку и симметрию зубьев.

Есть две группы инструментов: твердосплавные боры и фрезы.

Инструменты из твердосплавного материала самые прочные и выдерживают экстремальные нагрузки.

Инструменты из высокопрочной стали с твердосплавным материалом менее долговечны и имеют ограниченные возможности использования.

Лезвия инструментов для нарезки могут меняться в зависимости от назначения: они применяются для работы с различными материалами, такими как зубная ткань, керамика, гипс, пластмасса, сплавы и титан.

Производят инструменты с разным количеством граней - от 6 до 30. Для грубой обработки применяются инструменты с меньшим количеством зубцов, а для финишной бработки и предотвращения растрескивания материала - с большим количеством зубцов.

Врачи-стоматологи применяют твердосплавные боры для удаления инфицированного дентина, но не для препарирования эмали.

4) Стальное покрытие

Стальные ротационные инструменты создают из специальных видов стали. Для придания сложной текстуры поверхности используют метод фрезерования.

Поскольку стальные инструменты менее тверды и долговечны, чем алмазные или твердосплавные, их применение в стоматологии ограничено работой с мягкими структурами. К таковым относят препарирование костной ткани, устранение размягченного дентина, а также финишную корректировку ортопедических и ортодонтических аппаратов.

5) Корундовое зерно

Корунд применяется как абразивное вещество в инструментах для завершающей обработки стоматологических материалов.

Инструменты с корундовой насыпкой используют для обработки поверхности и шлифования. В них присутствует керамическая масса, жесткость которой может варьироваться. Для крепления абразивных зерен используются синтетические смолы в сепарационных дисках и эластичная силиконовая связка в полирующих инструментах.

6) Покрытие с зернами карбида кремния

Инструменты с карбидом кремния используются для шлифования стоматологических конструкций в клинической и лабораторной практике. В них применяются различные степени зернистости насыпки и связующие матриксы, такие как керамика, силикон, синтетические смолы и мягкая магнезитная связка.

Используются инструменты с карбидом кремния для обработки зубов, керамики, металла и акрила.

7) Покрытие из оксида кремния

Абразивные камни из оксида кремния (песчаник, SiO_2) используются для шлифовки и полировки различных поверхностей. Синтетический связующий материал производится с использованием мелкозернистой и среднезернистой силикатной насыпи для финишного полирования, а также крупнозернистой насыпи для предварительной обработки.

8) Силиконовое покрытие

Инструменты с силиконовым покрытием изготавливают из безопасных материалов, устойчивых к агрессивным веществам. Они применяются в стоматологии и зуботехнических лабораториях для обработки керамики, металлов, реставрации и полировки зубов.

9) Керамическое покрытие

Инструмент с керамическим покрытием предназначен для обработки мягких тканей полости рта. Он уменьшает кровотечение и используется для удаления десны, обнажения зубов, отделения грануляций и открытия зубодесневой борозды.

Процесс изготовления.

Производство стоматологических боров на заводе проходит через ряд важных этапов:

1. Алмазные зерна покрывают металлическим слоем для подготовки материала.

2. Материал укладывается в форму с хвостовиком и закрепляется литником.

3. При запекании форма помещается в вакуумную печь, где при температуре до 1000 °C происходит спекание металлическим соединением, заполняя микропустоты между зернами.

4. После охлаждения бор извлекается из формы, очищается и подвергается обработке для достижения необходимой чистоты.

Этот метод гарантирует долгий срок службы и эффективную работу инструментов.

Продолжительность использования режущих инструментов зависит от способа изготовления. Существуют два метода нанесения алмазных частиц на боровые заготовки – **метод спекания** и **метод гальванопластики**.

Метод спекания используется для создания покрытия из порошкообразного металла (медь, серебро, олово), связки (стекла) и алмазного порошка(не более 25% объёма). После спекания, боры отпрессовываются и далее механически обрабатываются для уменьшения напряжений. Этот метод обеспечивает более длительную эксплуатацию боров за счет увеличения толщины алмазного покрытия. Он также предотвращает деформацию связки и неравномерное распределение алмазов, что помогает сохранить комфорт и эффективность инструмента.

Гальванический метод создает монолитный композитный слой из металла и алмазного порошка на поверхности заготовки. Заготовка бора действует как катод, металл - как анод. Процесс образует двойной слой зарядов, что улучшает рассеивание веществ на молекулярном уровне и укрепляет алмазные зерна. Электролиз позволяет исправить механические дефекты заготовки, увеличивая износостойкость бора. Применение данного метода повышает производительность инструментов и уменьшает риск осложнений при эксплуатации.

Для улучшения работы стоматологических боров важно, чтобы они были износостойкими.

Основным качеством алмазного бора является его износостойкость. Износ алмазного инструмента зависит от нескольких факторов.

- рассматриваются свойства алмазного зерна: его прочность, размер, и распределение на поверхности.

- улучшение долговечности связки, удерживающей алмазные зёрна во время обработки поверхностей, путем изменения её физико-химических и эксплуатационных характеристик.

Необходимо учитывать форму, размер и способ нанесения алмазных зерен при работе инструментом.

Для достижения более высокой эффективности стоматологических боров необходимо улучшить прочностные характеристики алмазного зерна, его концентрацию на поверхности и улучшить износостойкость связки.

Характеристики алмазных зёрен имеют важное значение для износостойкости стоматологических боров.

Для препарирования зубов используют вращающийся инструмент с абразивными алмазными зернами.

Природный и синтетический алмаз являются лучшими материалами из-за своих технологических характеристик и высокой теплопроводности.

Диффузионные и адгезионные процессы влияют на износ режущего инструмента. При высоких температурах и давлении частицы инструмента и обрабатываемой поверхности взаимодействуют, что приводит к нарушению изотропии связки и разрушению граней зерен.

Нагрузка важна для срока службы буров. Сила давления зависит от контакта алмазов с материалом. Слишком большое давление ведет к износу бура, ухудшает обработку и делает инструмент непригодным.

Недостаточное давление приводит к изменению формы граней алмазных зёрен, что влияет на скорость резания.

Существует четыре типа изменений, которые применяют к режущим алмазным инструментам:

1. Поверхностный износ на режущих гранях в результате повышения температуры.

2. Из-за хрупкого разрушения режущих граней образуются новые острые кромки.

4. Разрушение алмазных зёрен на мельчайшие части.

5. Извлечение целых алмазных зёрен или их блоков из связки.

При изнашивании алмазных зерен играет важную роль хрупкое разрушение, вызванное трещинами и порами в их структуре. В порошке искусственных алмазов часто присутствуют дефекты, вызванные особенностями строения кристаллов.

Алмазные зерна имеют разные характеристики, такие как твёрдость, прочность, форма, развитость поверхности и способность к самозатачиванию.

Важную роль в работе режущего инструмента играет его твердость. Для эффективной работы необходимо, чтобы твердость абразивного материала была не менее чем 1.5 раза выше твердости обрабатываемого материала. Например, твердость алмаза составляет 100 ГПа, тогда как твердость карбида кремния - 24 ГПа, а электрокорунда - 22 ГПа.

Роль связки в поддержании износостойкости стоматологических боров.

Связка – материал для закрепления алмазных зерен на инструменте. Для улучшения свойств инструмента добавляют различные наполнители и модифицирующие добавки.

Наполнители должны отличаться:

- температура размягчения должна быть равна или выше температуры, которая образуется во время резки.

- прочность материала выше, чем у связки и абразива.

- отличная прилипчивость к материалам инструмента.

- необходимо использовать материалы с соответствующим коэффициентом термического расширения и с низкой себестоимостью для изготовления инструмента.

Связка алмазного инструмента должна быть прочной, чтобы удерживать зерна, но в то же время изнашиваться с разной интенсивностью в зависимости от марки алмаза. Это позволит обеспечить надежное фиксирование алмазных зерен и образование новых режущих граней для восстановления режущей способности инструмента.

Алмазоносный слой имеет определенную структуру. Существует *три вида связок*: *органические, металлические и гальванические*, которые придают им разнообразные свойства.

- Органическая связка имеет низкую твердость, плохую теплопроводность и не очень высокую термостойкость. При работе она нагревается, становится мягкой, что может вызвать деформацию инструмента. Добавление в связку заполнителя позволяет создать опору для алмазных зерен, что улучшает их режущие свойства.

- Металлическая связка обладает высокой твёрдостью и производительностью съёма, уменьшая время обработки поверхности. Тем не менее, излишнее тепло может вызвать проблемы со структурой и качеством обработки.

- Гальваническая связка обеспечивает высокую режущую способность инструмента за счет хорошей теплопроводности и относительно низкой стоимости. Алмазные инструменты на такой связке имеют покрытие из алмазов, связанных никелевым слоем для надежной фиксации и облегчения вывода стружки.

Изготовление алмазного инструмента с использованием способа прессования алмазосодержащих материалов на металлических связках имеет ряд преимуществ, таких как высокая производительность, точность изготовления и стабильность свойств. При этом возможно регулировать физико-механические свойства алмазного слоя.

Из-за разнообразия алмазных порошков и технологий изготовления инструментов нет универсального подхода к выбору состава связки. Цель – самозатачивание. Требования к

связкам зависят от обрабатываемого материала. Необходим оптимальный износ для постоянного обновления режущих кромок алмазных зерен.

Если связка не содержит химически активный элемент, который увеличивает износостойкость, алмазы могут выпадать преждевременно, что приводит к неэффективному использованию и снижению износостойкости инструмента.

Если металлическая связка слишком изношена, алмазные зерна затупляются, требуя больших усилий для обработки материала и увеличивая коэффициент трения.

Необходимо найти баланс.

Со временем связка изнашивается, что приводит к потере алмазных зерен из слоя. Износ можно описать как результат изнашивания металлического каркаса и выпадения алмазов из него.

Слабая прочность связки и износ зерен влияют на работу алмазного инструмента.

Износостойкость алмазного инструмента зависит от формы, размеров, способа нанесения алмазных зерен и рельефа поверхности, а также от свойств используемой связки.

Алмазное зерно эффективно удаляет твердые ткани зуба, цемент, керамику и другие материалы.

Для изготовления стоматологических боров используется натуральный алмаз, который обладает высокой твердостью и долгим сроком службы. Кристаллическая решетка дает алмазу особую твердость, что позволяет ему самозатачиваться в процессе работы.

Для увеличения износостойкости необходимо соблюдать определенную последовательность этапов технологического процесса.

Стальную заготовку покрывают крупными алмазными зернами, закрепленными никелем, заполняя не более 70% площади рабочей поверхности.

Для удаления крупных алмазных зерен и создания межалмазного пространства проводят электрохимическое протравливание в электролите с серной кислотой. Наносят мелкие алмазные зерна на заготовку глубиной 0,2 размера.

Алмазный порошок смешивается с никелем, причем крупные зерна выступают над слоем связки. Рельеф поверхности проверяется на каждом этапе процесса

Высокая концентрация алмазных частиц мелкой фракции является ключевым фактором, гарантирующим требуемое увеличение износостойкости ротационных инструментов с грубой и сверхгрубой зернистостью.

Виды изнашивания.

Сейчас особое внимание уделяется уменьшению износа рабочих поверхностей алмазных инструментов, так как это важно для повышения эффективности инструмента в целом. Различают несколько видов износа, каждый из которых имеет свои механизмы и влияет на долговечность инструмента.

Износ бора происходит из-за сдвига материала и царапин от частиц алмазной крошки, которые образуют абразивную среду во время трения.

В результате действия сил трения, частицы материалов расплавляются, слипаются или схватываются на выступающих гребнях и вершинах микронеровностей, образуя плёнку, которая затем отрывается или срезается, перенося фрагменты материала на другую поверхность и создавая новые неровности.

Диффузионное изнашивание способствует росту скорости и температуры резания за счет взаимодействия материала и связки. Инородные включения могут вызвать напряжения и трещины. При повышении температуры увеличивается роль диффузного растворения в изнашивании режущего инструмента.

Окислительное изнашивание инструмента происходит при контакте с обрабатываемой поверхностью и удаляется при следующем контакте. Этот процесс особенно важен при использовании охлаждающих жидкостей во время резки. Влияние активного газонасыщения и охлаждения на изнашивание взаимосвязано и происходит одновременно.

Подходы к повышению износостойкости стоматологических боров.

Существуют три способа увеличения износостойкости инструмента.

Конструктивный подход включает в себя создание новых размеров вращающегося инструмента для удерживания и вращения его конструкций.

Технологическая цель проекта – создание материалов для изготовления вращающегося инструмента и стоматологических реконструкций.

Эксплуатационный процесс включает соблюдение и изменение принципов резания, шлифования, полировки и антисептической обработки. Сложная текстура рабочей части бура помогает удерживать опилки и биологические объекты на поверхности, что может ухудшить резание и привести к распространению инфекции.

Проведенные исследования показали, что эффективность алмазных боров снижается после стерилизации из-за коррозии металлической связки, что приводит к вырыванию алмазных зерен.

Ультразвуковая обработка снижает износостойкость инструментов, вызывая изменения в их структуре. Это приводит к потере режущей способности алмазных инструментов из-за разрушения режущих граней и засаливания поверхности. Однако процесс засаливания может быть обратимым при использовании охлаждения и механической очистки.

Существуют два основных объяснения причин засаливания.

Засаливание происходит из-за заполнения пространств между зернами абразива и связующими частицами, образуя слой, закрывающий зерна. Процесс начинается с контакта нагретого и деформированного материала с зернами абразива во время обработки поверхности.

Так же есть мнение, что в процессе обработки образуется граница контакта, которая одновременно принадлежит инструменту и обрабатываемому материалу. Засаливание начинается с образования наростов на алмазных зернах. При этом образование соединения происходит в три стадии:

- сближение соединяемых объектов (образование физического контакта);
- активация контактирующих поверхностей (образование активных центров);
- объемное взаимодействие.

Приведённый обзор литературы показывает, что изнашиваемость алмазных стоматологических боров сложный динамический процесс. Для повышения эффективности работы отечественных инструментов необходимо повышать износостойкость.

Выводы

В результате выполненной работы изучена технология изготовления стоматологических боров и определены основные пути повышения их эффективности. Установлено, что ключевым фактором, определяющим работоспособность инструмента, является его износостойкость, которая зависит от характеристик алмазного зерна, свойств металлической связки и метода нанесения покрытия. Сравнительный анализ показал, что гальванический метод обеспечивает более высокую режущую способность за счет плотной укладки зерен, тогда как метод спекания дает большую толщину рабочего слоя. Выявлено, что основными причинами потери эффективности являются хрупкое разрушение алмазных зерен и засаливание рабочей поверхности. Доказано, что повышение износостойкости возможно путем оптимизации технологических параметров производства, в частности двухстадийного нанесения алмазных зерен разной фракции, а также соблюдения правильных режимов эксплуатации и очистки инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Амиров, А.Р. Сравнение рабочих характеристик алмазных боров с различными методами нанесения абразива / А.Р. Амиров // Современная стоматология. – 2022. – № 3. – С. 32-36. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48059827 (дата обращения: 15.02.2025).

2) Базикян, Э.А. Стоматологический инструментарий: атлас: учебное пособие по специальности «Стоматология» / Э.А. Базикян. – 3-е изд., стер. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2017. – 168 с.

3) Иванов, С.Ю. Сравнительный анализ износостойкости алмазных боров, полученных методами гальванопластики и вакуумного спекания / С.Ю. Иванов, Д.А. Кузнецов // Российский стоматологический журнал. — 2023. — Т. 27, № 2. — С. 112-118.

4) Копытов, А.А. К вопросу износостойкости алмазных стоматологических боров (часть 1) / А.А. Копытов, А.В. Цимбалистов, Р.И. Асадов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Медицина. – 2016. – № 26 (247). – С. 78-85. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-iznosostoykosti-almaznyh-stomatologicheskih-borov-chast-1 (дата обращения: 23.02.2025).

5) Копытов, А.А. К вопросу износостойкости алмазных стоматологических боров (часть 2) / А.А. Копытов, А.В. Цимбалистов, Р.И. Асадов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Медицина. – 2016. – № 33 (254). – С. 92-98. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-iznosostoykosti-almaznyh-stomatologicheskih-borov-chast-2 (дата обращения: 04.04.2025).

6) Пути повышения износостойкости алмазных инструментов и перспективы его достижения / А.М. Мартиросян, А.С. Агбалян, А.Н. Казарян, Н.А. Ордян, П.М. Есаян // Вестник Национального политехнического университета Армении. – 2015. – № 1. – С. 33-40. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35139432 (дата обращения: 02.05.2025).

7) Пархоменко, А.Н. Практическая значимость износа алмазных стоматологических боров / А.Н. Пархоменко, В.И. Шемонаев, Т.В. Моторкина // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. — 2010. — № 4. — С. 254-259.

8) Половнева, Л.В. Модификация металлической связки для увеличения времени износа алмазных боров. Сравнительная оценка износостойкости стандартных и гибридных стоматологических боров / Л.В. Половнева, В.П. Чуев // Институт стоматологии. – 2020. – № 4 (89). – С. 126-139. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44678945 (дата обращения: 06.05.2025).

9) Половнева, Л.В. Контроль качества эксплуатационных характеристик боров при обработке стоматологических керамических изделий / Л.В. Половнева, Д.В. Журбенко, В.П. Чуев // Стоматология славянских государств: сборник трудов XVI международной научно-практической конференции, Белгород, 2023 г. / под ред. А. В. Цимбалистова, В. В. Капрановой. – Белгород : НИУ БелГУ, 2023. — С. 297-298.

10) Чуев, В.П. Основные этапы производства гибридных алмазных боров / В.П. Чуев, Л.В. Половнева, А.А. Копытов // Стоматология славянских государств: сборник трудов XI международной научно-практической конференции, Белгород, 2018 г. / под ред. А.В. Цимбалистова, А.А. Копытова. – Белгород: НИУ БелГУ, 2018. – С. 271-272.

УДК 678.7

ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА РЕЗИНЫ НА ОСНОВЕ СИЛОКСАНОВОГО КАУЧУКА

А.Б. Яковлева, Н.А. Семенова, А.В. Смирнов, А.А. Терентьев, Н.И. Кольцов

Научный руководитель – **Н.И. Кольцов,** д-р хим. наук, профессор

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

Исследовано влияние диоксида титана и титаната бария на реометрические, физико-механические и электрофизические свойства резины на основе силоксанового каучука, используемой в качестве межобкладочного материала гибких переменных ёмкостей.

***Ключевые слова**: силоксановый каучук, диоксид титана и титанат бария, реометрические свойства резиновой смеси, физико-механические и электрофизические свойства резины*

THE EFFECT OF DIELECTRIC ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF VULCANISED RUBBER BASED ON SILOXANE RUBBER

A.B. Yakovleva, N.A. Semenova, A.V. Smirnov, A.A. Terent'yev, N.I. Kol'tsov

Scientific Supervisor – **N.I. Kol`tsov,** Doctor of Chemical Sciences, Professor

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov

The effect of titanium dioxide and barium titanate on the rheometric, physicomechanical, and electrophysical properties of siloxane rubber used as an interlining material for flexible variable capacitances was studied.

***Keywords**: siloxane rubber, titanium dioxide and barium titanate, rheometric properties of rubber compound, physicomechanical and electrophysical properties of vulcanised rubber.*

Силоксановые каучуки представляют собой высокомолекулярные кремнийорганические соединения с двумя органическими радикалами, присоединенными к атому кремния. Высокая энергия полярных связей –Si–O– в основной цепи определяет высокую термическую стойкость силоксановых полимеров [1-5]. Вулканизаты на основе таких каучуков обладают отличной стойкостью к атмосферным воздействиям, кислороду, озону, повышенной влажности, а также радиации. Каучук марки СКТВ-1, используемый в данной работе, предназначен для изготовления изделий, сохраняющих высокие эластичные и диэлектрические свойства в широком интервале температур (от -50 до +250 °С). Наряду с хорошей диэлектрической прочностью и высоким объемным сопротивлением, кремнийорганические каучуки обладают высокой стойкостью к действию электрической дуги и пробою. Помимо изоляции для кабелей, резины из данных каучуков используются для изготовления нагревательных элементов, формовых деталей для ряда электротехнических изделий. Например, в качестве межобкаладочного материала гибких переменных емкостей [6]. Для улучшения свойств резиновых изделий используют следующие методы модификации: введение наполнителей, стабилизаторов и технологических добавок [6, 7]. В связи с этим, целью данной работы является изучение влияния диэлектрических добавок (TiO_2, $BaTiO_3$) на реометрические, физико-механические и электрофизические свойства резины на основе силоксанового каучука, используемой в качестве межобкладочного материала гибких переменных ёмкостей.

Исследуемая резиновая смесь состояла из следующих компонентов: диметилметилвинилсилоксанового каучука СКТВ-1, вулканизирующего агента – перекиси дикумила, наполнителя – аэросил А-300. В качестве диэлектрических добавок использовали

диоксид титана (варианты 2-4) и титанат бария (варианты 5-7) в количестве 5, 10, 15 мас.ч. на 100 мас. ч. каучука соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Варианты резиновой смеси

Диэлектрическая добавка	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
TiO_2, мас.ч.	-	5,0	10,0	15,0	-	-	-
$BaTiO_3$, мас.ч.	-	-	-	-	5,0	10,0	15,0

Процесс приготовления резиновой смеси проводился путем смешивания каучуков и компонентов на лабораторных вальцах ЛБ 320 160/160 в течение 25 минут при температуре валков от 60 до 70°С. Затем смесь охлаждали на металлическом столе не менее 24 часов. Кинетику вулканизации резиновой смеси исследовали с помощью безроторного реометра MDR 3000 Basic фирмы MonTech при температуре 150°С в течение 30 минут. Результаты представлены в виде кривых вулканизации на рис. 1.

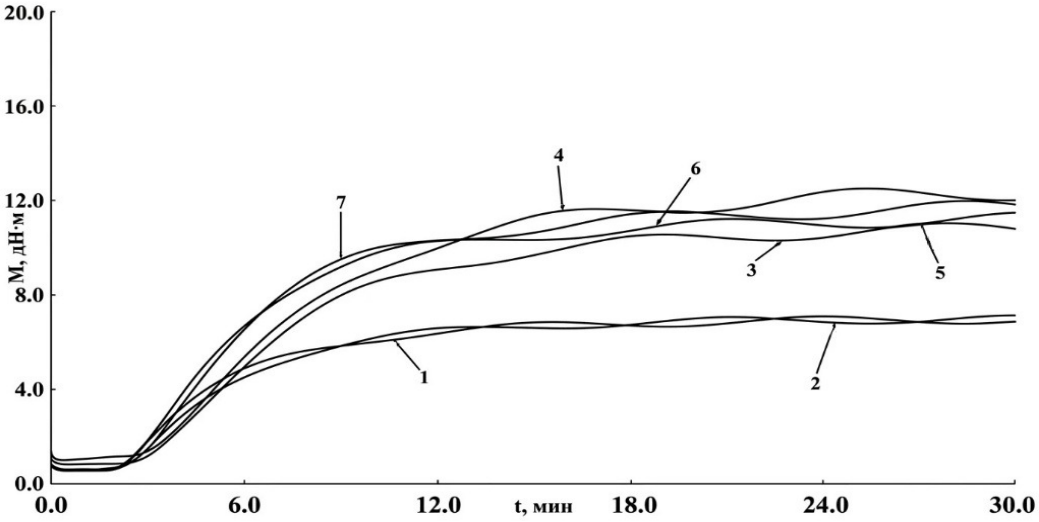


Рис. 1. Кривые вулканизации резиновой смеси (номера кривых соответствуют номерам вариантов)

На основании кривых вулканизации были определены реометрические параметры резиновой смеси, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2. Реометрические свойства различных вариантов резиновой смеси

Показатели	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
M, дН·м	0,84	0,89	1,19	1,41	0,79	0,97	1,20
M_{max}, дН·м	7,20	7,26	11,22	12,69	11,00	11,66	12,16
ΔM, дН·м	6,36	6,37	10,03	11,28	10,21	10,69	10,96
t_s, мин	2,68	2,91	3,73	3,86	2,83	3,04	3,37
t_{90}, мин	12,35	11,32	16,19	15,05	11,82	16,31	15,90
Δt, мин	9,67	8,41	12,46	11,19	8,99	13,27	12,53
v, мин$^{-1}$	10,34	11,89	8,02	8,94	11,12	7,54	7,98

Примечание: M_{max} – максимальный крутящий момент; M_{min} – минимальный крутящий момент; ΔM – разница между значениями максимального и минимального крутящих моментов; t_s – время начала вулканизации; t_{90} – оптимальное время вулканизации; Δt – время, прошедшее от начала вулканизации до конца вулканизации, v – скорость вулканизации.

Согласно литературным данным [8], резиновая смесь должна одновременно иметь: минимальную продолжительность процесса вулканизации при заданной температуре – это напрямую связано с производительностью используемого технологического оборудования; максимальную продолжительность индукционного периода – данный параметр характеризует склонность смеси к подвулканизации при хранении до момента ее переработки. Из табл. 2 видно, что наибольшую продолжительность индукционного периода имеет четвертый вариант резиновой смеси. Наибольшей скоростью вулканизации обладает второй вариант резиновой смеси. Максимальное разница между значениями максимального и минимального крутящих моментов наблюдается при вулканизации четвертого варианта резиновой смеси. Таким образом, исходя из вулканизационных характеристик, оптимальными технологическими своствами характеризуется резиновая смесь, содержащая диоксид титана в количестве 15,00 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука.

В дальнейшем резиновую смесь вулканизовали в вулканизационном прессе P-V-100-3RT-2-PCD при температуре 150 ^{o}C в течение 30 минут. Для полученных вулканизатов определяли физико-механические свойства: условную прочность при растяжении; относительное удлинение при разрыве; твёрдость по Шору А; сопротивление раздиру и эластичность по отскоку. В качестве электрофизических показателей вулканизатов были выбраны диэлектрическая проницаемость и электическая емкость, значения которых приведены в табл. 3.

Таблица 3. Физико-механические и электрофизические свойства вулканизатов

Показатели	Варианты						
	1	2	3	4	5	**6**	**7**
Физико-механические и электрофизические показатели							
$f_р$, МПа	2,9	3,6	7,6	7,1	3,9	4,1	5,4
$\varepsilon_р$, %	320	330	550	450	270	270	410
H, ед. Шор А	39	36	59	64	53	55	60
B, кН/м	9	12	24	30	21	25	38
S, %	52	51	26	24	45	35	26
ε	1,71	1,75	1,77	1,87	1,77	1,79	1,88
C, пФ	70	73	75	79	75	76	80
Примечание: $f_р$ – условная прочность при растяжении; $\varepsilon_р$ – относительное удлинение при разрыве; *H* – твердость по Шору А; *B* – сопротивление раздиру, *S* – эластичность по отскоку; ε – диэлектрическая проницаемость; С – электрическая ёмкость.							

Из полученных данных следует, что увеличение количества диэлектрических добавок в резиновой смеси приводит к повышению условной прочности при растяжении, твердости и сопротивления раздиру полученных вулканизатов. При этом происходит уменьшение их эластичности по отскоку. С увеличением содержания диоксида титана и титаната бария наблюдается практически одинаковый рост диэлектрической проницаемости и электрической емкости вулканизатов. С учетом улучшенных физико-механических свойств вулканизатов, содержащих диоксид титана и его значительно меньшую стоимость, чем стоимость титаната бария, для изготовления межобкладочного материала гибких переменных ёмкостей рекомендуется использовать резиновую смесь, содержащую диоксид титана в количестве 15,00 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Гадельшин, Р.Н. Высоконаполненные резины на основе силоксанового каучука / Р.Н. Гадельшин, А.Д. Хусаинов, Ю.Н. Хакимуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №14. – С. 163-168.

2) Резниченко, С.В. Большой справочник резинщика Ч.1 Каучуки и ингредиенты / С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова. – М.: Техинформ, 2012. – 744 с.

3) Пенн, В.С. Технология переработки синтетических каучуков: Принципы составления смесей, технология переработки и области применения синтетических каучуков стандартных типов / В.С. Пенн. – М.: Химия, 1964. – 404 с.

4) Венедиктова, М.А. Современные тенденции в области фторсилоксановых и силоксановых каучуков и резин на их основе / М.А. Венедиктова, И.С. Наумов, А.М. Чайкун, О.А. Елисеев // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S3. – С. 17-24.

5) Гадельшин, Р.Н. Модифицированные силоксановые резины высокого наполнения: дис. … канд. техн. наук: 05.17.06 / Гадельшин Раиль Наилевич; Место защиты: Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань, 2013. – 120 с.

6) Исследование электрофизических свойств резины на основе бутадиен-нитрильного каучука и технического углерода, как межобкладочного материала / А.В. Смирнов, А.А. Терентьев, С.А. Баласанян, Е.Н. Егоров, Н.И. Кольцов, С.А. Васильев // Известия высших учебных заведений. Серия. Химия и химическая технология. – 2025. – Т. 68, № 9. – С. 99-105.

7) Nayak, S. Facile preparation of uniform barium titanate (BaTiO3) multipods with high permittivity: impedance and temperature dependent dielectric behavior / S. Nayak // RSC Adv. – 2014. – Vol. 4, no. 3. – P. 1212-1224.

8) Догадкин, Б.А. Химия эластомеров. – 2-е изд., перераб. и доп. / Б.А. Догадкин, А.А. Донцов, В.А. Шершнев – М.: Химия, 1981. – 376 с.

Направление 4. СРЕДСТВА ПРОИЗВОДСТВА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Секция 1. Материаловедение, техническое регулирование и метрологическое обеспечение в промышленности

УДК 620.178

ПРОБЛЕМЫ МЕТОДИК ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Д.И. Дербенев, А.П. Чирков

Научный руководитель **- А.П. Чирков,** д-р техн. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Рассматриваются особенности применения неопределенности измерений при выполнении вибрационных испытаний на современном оборудовании Показана важность учета неопределенности измерений для принятия решений, исключающих ошибки при оценке соответствия продукции.

Ключевые слова: *методика испытаний, вибрация, неопределенность измерений, теплозащитный экран*

PROBLEMS OF VIBRATION TESTING METHODS

D.I. Derbenev, A.P. Chirkov

Scientific Supervisor - **A.P. Chirkov** Doctor of Technical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The article examines the specifics of using measurement uncertainty when performing vibration tests on modern equipment. It shows the importance of taking measurement uncertainty into account for making decisions that eliminate errors in assessing product conformity.

Keywords: *testing methodology, vibration, measurement uncertainty, heat shield*

Введение

Вибрационные испытания являются одним из их видов, которые получают всё более широкое распространение.

В данной статье рассмотрены особенности вибрационных испытаний и отдельные проблемы в практике их выполнения.

1. Основные проблемы вибрационных испытаний

Как отмечено в [1] в связи с потребностью в работе на высоких скоростях и применением легких конструкций в современном оборудовании статические испытания на сжатие/растяжение не являются достаточными. Необходимы динамические измерения, что и послужило предпосылкой к широкому применению вибрационных испытаний.

В лабораторных условиях вибрационные испытания проводятся, как часть программы контроля качества компании, наряду с такими испытаниями, как температурные и испытания на влагостойкость. Испытуемый объект подвергается воздействию вибрации определенного уровня, в соответствии с процедурой, определенной национальными и международными стандартами

На практике возникают проблемы при выполнении вибрационных испытаний.

Так в [2] качестве одной из главных проблем назван подбор оборудование под задачи исследования. По мнению авторов, не менее острой проблемой отработка или устранение резонансов, которые мешают проведению испытания, приводят к аварийным остановам и лишним перегрузкам на объекте испытания.

2. Потребность в вибрационных испытаниях при производстве теплозащитных экранов

Теплозащитные экраны выполняют функции защиты окружающих конструкций и обслуживающего персонала от высоких температур, а также снижают тепловые потери и

повышают долговечность элементов выхлопной системы. Однако в процессе эксплуатации они подвергаются значительным вибрационным нагрузкам, что приводит к разрушению креплений, появлению трещин и снижению эффективности теплозащиты.

Сегодня учёные и инженеры хорошо понимают, как вибрации влияют на разные детали выхлопной системы, включая теплозащитные экраны. Для этого используют специальные математические модели и программы, которые показывают, где экран может прогибаться, трескаться или ломаться. Такие расчёты помогают находить "слабые места" конструкции ещё до испытаний.

На практике экраны и глушители проверяют на специальных вибрационных стендах. Создавая разные виды колебаний - плавные, резкие или случайные - чтобы имитировать реальные условия работы двигателя и дороги. Благодаря этому можно увидеть, как крепления и материал экрана ведут себя под нагрузкой.

В АО "Фритекс" вибрационные испытания производятся на вибростенде электродинамическом модели ETS Solutions M544A. На рис. 1 приведена общая схема вибрационных испытаний на таком оборудовании.

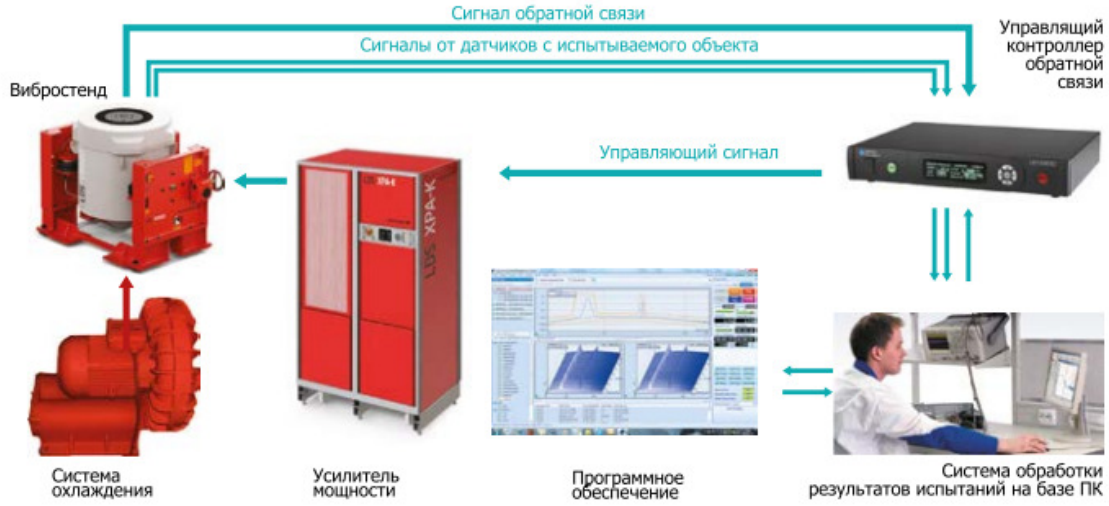


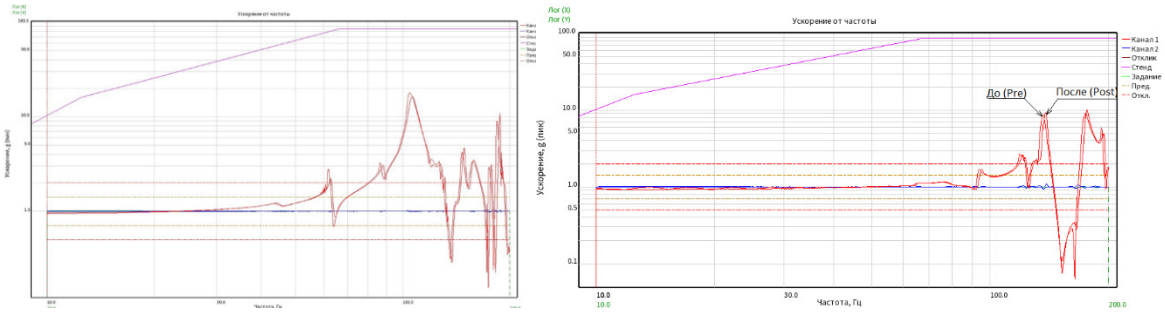
Рис. 1. Общая схема вибрационных испытаний [3]

3. Проблема оценки неопределенности измерений при вибрационных испытаниях

Одним из требований, предъявляемых к испытательным лабораториям согласно ГОСТ Р ИСО 17025-2019 [4], является необходимость оценки неопределенности результатов измерений. Оценка неопределенности измерений необходима для количественного определения качества, надежности и точности результатов, что позволяет сравнивать данные между собой, оценивать их соответствие стандартам) и принимать обоснованные решения. В частности она помогает выявить влияние случайных и систематических факторов, обеспечивая достоверность принимаемых решений при исследованиях.

Испытания теплозащитных экранов проводятся с целью оценки соответствия продукции требованиям технического регламента ТР ТС 018/2011 [5]. В соответствии с ним Теплообменники и термостаты (к которым относятся и теплозащитные экраны) должны обеспечивать сохранение герметичности и работоспособности после проведения испытаний на стойкость к внешнему вибрационному воздействию. При этом количественных критериев не устанавливается и основным из них является отсутствие признаков разрушений.

Особенностью современного испытательного оборудования является автоматическая обработка результатов измерений с использованием компьютерной техники. На рис. 2 приведена диаграмма результатов испытаний теплозащитного экрана, на которой показаны результаты измерений при различных характеристиках частоты вибрации.



а *б*

Рис. 2. Синусоидальная развертка от 10 до 200 Гц до и после испытаний по оси X (*а*) и Z (*б*)

Как видно на диаграмме, установлены две зоны - предупреждения и отклонения - по нахождению в которых оцениваются риски для разрушения испытываемого образца. Числовые значения этих зон определяются параметрами вибрационного воздействия в заданных диапазонах частот - соотношением диапазон частот (Гц) и ускорений.

Как видно из рис. 2, превышение уровня отклонения зафиксировано при частоте более 60 Гц. При этом числовые значения измеренных параметров ускорения при конкретной частоте вибрации, оцененные в ходе испытаний, приводится без указания неопределенности измерений. Это может быть источником риска принятия ложноположительных или ложноотрицательных решений.

Для оценки неопределенности измерений при вибрационных испытаниях кроме информации для оценки по типу А (на основе обработки статистики результатов измерений) необходима информация об используемых в испытательном стенде средств измерений и других влияющих факторов, то есть для оценки неопределенности измерений по типу В. К сожалению, в описаниях большинства испытательных стендов таких сведений нет, а их конструкция не позволяет оценить точностные характеристики средств измерений.

Не предусматривает оценку неопределенности измерений и программное обеспечение испытательного стенда ETS Solutions M544A, что является ещё одной проблемой в использовании вибростендов.

Заключение

Выполненные исследования позволили показать важность решения проблемы вибрационных испытаний, связанной с оценкой неопределенности измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Вибрационные испытания Brüel&Kjær Sound &Vibration Measurements A/S.-ГКДЖ. – URL: https://asm-tm.ru/wp-content/uploads/2014/05/Vibration-Testing.pdf (дата обращения 01.03.2026)

2) Практические проблемы проведения виброиспытаний и методы их решения/16-й Московский международный инновационный форум и выставка "Точные измерения - основа качества и безопасности", 1-3 декабря 2020 г. - URL: https://metrol.expoprom.ru/archive/2016/?ysclid=msem19f7i7460354319

3) Каталог фирмы ДИПОЛЬ.pdf. - URL: https://dipaul.ru/electronic-catalogs/?ysclid=mselqkjfz5552360264 (дата обращения 01.03.2026)

4) ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М.: Стандартинформ, 2021. – 26 с.

5) Технический Регламент Таможенного Союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» / Утвержден решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 877. – URL: https://sertpt.ru/upload/tr-ts-018-2011.pdf?ysclid=mselx6xyim455770098

УДК 006.1

ЭВОЛЮЦИЯ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В РАЗРЕЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ

А.Э. Дратцева, У.А. Копылова, А.В. Синицына

Научный руководитель - **Е.М. Шастина**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена исследованию развития инструментов управления качеством в условиях смены технологических укладов. Показано, что современные инструменты качества становятся интегрированной частью производственных систем и ключевым фактором повышения эффективности и конкурентоспособности экономики.

Ключевые слова: *технологические уклады, управление качеством, инструменты качества, цифровизация, инновационное развитие, промышленность, интеллектуальные системы, цифровая трансформация*

EVOLUTION OF QUALITY MANAGEMENT TOOLS IN THE CONTEXT OF TECHNOLOGICAL STRUCTURES

A.E. Dratseva, U.A. Kopylova, A.V. Sinitsyna

Scientific Supervisor - **E.M. Shastina**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article explores the development of quality management tools in the context of technological shifts. It demonstrates that modern quality tools have become an integral part of production systems and a key factor in enhancing the efficiency and competitiveness of the economy.

Keywords: *technological paradigms, quality management, quality tools, digitalization, innovative development, industry, intelligent systems, digital transformation*

Развитие промышленности и экономики происходит неравномерно, а в форме технологических волн, каждая из которых формирует новые производственные структуры, инфраструктуру и методы управления. Теория технологических укладов рассматривает экономическое развитие как последовательность сменяющих друг друга комплексов базовых технологий, формирующих технологическое ядро эпохи и определяющих характер производства [1].

Смена технологических укладов сопровождается трансформацией не только производственных технологий, но и систем стандартизации, метрологии и управления качеством. По мере усложнения производства возрастает необходимость в более сложных и формализованных инструментах контроля и управления качеством [2].

Для наглядного представления эволюции инструментов управления качеством в условиях смены технологических укладов целесообразно рассмотреть их развитие во временной последовательности. На рис. 1 представлена схема, отражающая развитие технологических укладов, периоды их формирования и соответствующие инструменты управления качеством, применяющиеся в рамках этих укладов.

Рис. 1. Схема развития технологических укладов и инструментов управления качеством

Эволюция инструментов управления качеством представляет собой закономерное отражение технологического развития промышленности. Каждый технологический уклад формирует специфический тип производства, уровень сложности продукции и характер производственных процессов, что непосредственно определяет требования к обеспечению качества. По мере усложнения технологических систем происходит трансформация самой логики управления качеством: от индивидуального контроля готового изделия – к управлению процессами, затем к системной интеграции качества в организацию и, наконец, к цифровому предиктивному управлению в рамках киберфизических производственных систем [3].

В условиях первого технологического уклада, сформировавшегося в конце XVIII - начале XIX века и основанного на механизации отдельных производственных операций с использованием водяной энергии, производство сохраняло ремесленно-мануфактурный характер. Основной производственной единицей являлась мастерская, а технологические процессы зависели от индивидуальных навыков работников. В этих условиях качество продукции не рассматривалось как объект системного управления. Оно обеспечивалось за счет профессионального мастерства, опыта и личной ответственности изготовителя. Контроль носил преимущественно визуальный характер и осуществлялся либо самим производителем, либо заказчиком. Использовались простейшие измерительные средства, однако стандартизированных процедур контроля не существовало. В России одним из характерных примеров является развитие текстильных мануфактур в Иваново-Вознесенске, которые стали центром отечественной текстильной промышленности. Качество продукции в этот период обеспечивалось главным образом за счет мастерства работников и контроля со стороны владельцев мануфактур. Формализованные методы контроля практически отсутствовали, а требования к качеству определялись опытом производства и потребностями рынка [4]. Таким образом, качество в рамках первого технологического уклада представляло собой индивидуальную характеристику изделия, а не параметр производственной системы.

Переход ко второму технологическому укладу (XIX век), связанному с распространением паровой энергии, развитием железнодорожного транспорта и машиностроения, привел к существенному росту масштабов производства и усложнению технических систем. Возникла необходимость обеспечения взаимозаменяемости деталей и стабильности параметров продукции. Это стало ключевым фактором формирования стандартизации и метрологии как институциональных основ управления качеством. Контроль постепенно отделяется от производства и становится самостоятельной функцией. Качество начинает трактоваться как соответствие установленным требованиям и нормативам. В условиях второго технологического уклада значительную роль в России сыграло развитие железнодорожного строительства и машиностроения во второй половине XIX века. Строительство железных дорог, включая Транссибирскую магистраль, потребовало внедрения стандартизации деталей, развития измерений и организации технического контроля продукции на машиностроительных заводах. В этот период начали формироваться основы отечественной системы технического контроля, а качество продукции стало определяться соответствием установленным техническим требованиям [5]. Таким образом, во втором технологическом укладе формируется нормативная модель качества, основанная на стандартах и измерениях.

В конце XIX - начале XX века, в третьем технологическом укладе, связанном с электрификацией, развитием тяжелого машиностроения и массовым производством сложной техники, требования к точности и стабильности параметров резко возросли. Увеличение объемов производства сделало сплошной инспекционный контроль экономически неэффективным, что стимулировало развитие научных методов анализа качества. В этот период формируются системы допусков и посадок, развиваются методы калибровки средств измерений, создаются специализированные службы технического контроля. Одновременно закладываются основы статистического анализа производственных процессов, позволившие учитывать вариацию параметров и управлять ею. Качество начинает рассматриваться как результат управляемости производственного процесса, а не только как характеристика готового изделия. В рамках третьего технологического уклада в России активно развивалась тяжелая промышленность и энергетика. Одним из ключевых примеров является реализация государственного плана развития электроэнергетики (ГОЭЛРО), которая сопровождалась масштабным строительством электростанций и промышленной инфраструктуры. Увеличение масштабов производства потребовало внедрения систем технического контроля, развития метрологических служб и использования научных методов измерения и анализа параметров продукции. В этот период начинают формироваться более организованные структуры контроля качества на предприятиях [6].

Кардинальные изменения происходят в четвертом технологическом укладе, сформировавшемся в середине XX века и основанном на массовом поточном производстве, развитии нефтехимии и автомобилестроения. Конвейерные технологии потребовали высокой стабильности процессов и минимизации вариаций параметров. Именно в этих условиях формируется статистическое управление процессами как системный подход к обеспечению качества. Широкое распространение получают контрольные карты Шухарта, гистограммы, диаграмма разброса, стратификация данных, контрольные листки и другие статистические инструменты анализа вариаций. Развитие системного анализа причин дефектов приводит к созданию диаграммы Исикавы, а применение принципа концентрации усилий - к распространению диаграммы Парето. Характерной особенностью данного этапа стало смещение акцента с контроля готовой продукции на управление процессами ее производства. Качество впервые начинает рассматриваться как системный результат функционирования производственной организации. В период четвертого технологического уклада в СССР активно развивалось массовое промышленное производство, особенно в автомобилестроении, авиационной промышленности и оборонном комплексе. Например, на предприятиях автомобильной промышленности, таких как АвтоВАЗ и ГАЗ, внедрялись методы статистического контроля процессов и системы технического контроля качества

продукции. Распространение получили контрольные карты, гистограммы и другие статистические методы анализа производственных процессов. Эти инструменты позволяли выявлять причины дефектов и повышать стабильность производства. Также из значимых примеров развития систем управления качеством в СССР стала система КАНАРСПИ (качество, надежность, ресурс с первых изделий), разработанная в 1950-1960-е годы на предприятиях авиационной промышленности. Основная идея данной системы заключалась в обеспечении высокого качества и надежности продукции уже на ранних этапах ее разработки и производства. В рамках системы большое внимание уделялось анализу причин дефектов, совершенствованию технологических процессов и повышению ответственности всех участников производства за конечный результат [7].

Однако дальнейшее развитие подобных систем в отечественной промышленности оказалось ограниченным. В конце XX века в связи с экономическими и институциональными изменениями, произошедшими после распада СССР, многие разработанные в советский период системы управления качеством, включая КАНАРСПИ, не получили дальнейшего развития. В условиях перехода к рыночной экономике предприятия начали ориентироваться на международные стандарты управления качеством, прежде всего стандарты ISO серии 9000. В результате часть отечественных разработок в области системного управления качеством была постепенно вытеснена или заменена зарубежными методиками и стандартами.

В пятом технологическом укладе (XX – XXI век), основанном на микроэлектронике, информационных технологиях и автоматизации, происходит дальнейшее усложнение производственных систем и усиление глобальной конкуренции. Это приводит к интеграции качества в стратегическое управление организации. Инструменты управления качеством выходят за пределы производственного процесса и охватывают все стадии жизненного цикла продукции - от проектирования до эксплуатации. Распространяются методы системного планирования и анализа в электронном формате: матричные диаграммы, диаграммы сродства, диаграммы связей, древовидные структуры целей, инструменты поддержки принятия решений. Развиваются методы инженерного анализа - функционально-стоимостной и функционально-физический анализ, анализ рисков, причинно-следственные модели сложных систем. Одновременно формируются инструменты проектирования качества, ориентированные на потребителя и инновации, включая развертывание функции качества (QFD), бенчмаркинг, теория решения изобретательских задач и эвристические методы разработки решений. Пятый технологический уклад в России связан с развитием информационных технологий, автоматизированных систем управления и внедрением международных стандартов качества. В 1990-е и 2000-е годы на многих предприятиях начали внедряться системы менеджмента качества в соответствии с требованиями стандартов ISO серии 9000. Однако на начальном этапе использование данных инструментов нередко носило формальный характер. В ряде случаев внедрение систем управления качеством осуществлялось преимущественно с целью получения сертификатов и соответствия требованиям внешних партнеров, а не как инструмент реального совершенствования производственных процессов. Это было связано как с недостаточным опытом применения современных методов управления качеством, так и с недостаточным пониманием их практической эффективности в условиях переходной экономики.

В последующие годы ситуация постепенно изменилась: предприятия начали более активно использовать инструменты управления качеством для повышения эффективности производства, оптимизации процессов и повышения конкурентоспособности продукции на международных рынках. Например, предприятия нефтегазовой отрасли, машиностроения и атомной промышленности внедряли методы анализа рисков, функционально-стоимостного анализа, бенчмаркинга и развертывания функции качества. Эти инструменты позволили интегрировать управление качеством в стратегию развития предприятий и повысить их конкурентоспособность на международных рынках. Качество становится стратегическим ресурсом организации и фактором ее конкурентоспособности [8].

В настоящее время формируется шестой технологический уклад, который связан с развитием цифровых технологий, искусственного интеллекта, промышленного интернета вещей и киберфизических производственных систем. В рамках данного уклада инструменты управления качеством переходят на новый уровень и начинают основываться на цифровых данных и интеллектуальном анализе процессов. К основным инструментам управления качеством в условиях шестого технологического уклада относятся системы мониторинга производственных процессов в режиме реального времени на основе промышленного интернета вещей (Industrial IoT), анализ больших данных (Big Data) для оценки и прогнозирования параметров качества продукции, цифровые двойники изделий и производственных процессов, позволяющие моделировать их поведение и выявлять возможные отклонения до начала реального производства.

Также широко используются системы автоматизированного контроля качества на основе технологий машинного зрения и искусственного интеллекта, которые позволяют автоматически выявлять дефекты продукции на производственных линиях. К современным инструментам относятся и системы предиктивной аналитики качества, позволяющие прогнозировать вероятность возникновения дефектов на основе анализа исторических данных и параметров технологических процессов. Дополнительно применяются цифровые системы управления жизненным циклом продукции (PLM-системы), системы производственного мониторинга (MES-системы), системы бережливого производства (LEAN-системы), а также интеллектуальные системы управления производством, интегрированные с ERP-платформами.

Следует отметить, что шестой технологический уклад находится на стадии формирования, и многие цифровые инструменты управления качеством только начинают внедряться в промышленность. В России данные технологии применяются пока преимущественно в отдельных высокотехнологичных отраслях, таких как атомная промышленность, авиастроение и энергетика. При этом значительная часть предприятий продолжает функционировать в рамках технологий четвертого и пятого технологических укладов, используя статистические методы контроля процессов, системы менеджмента качества и традиционные инструменты анализа.

В последние годы на ряде предприятий внедряется аналитика больших данных для управления качеством продукции и процессов. Например, на предприятиях государственной корпорации «Росатом» и в авиастроительной отрасли используются цифровые модели изделий и предиктивные методы анализа данных для прогнозирования дефектов и оптимизации технологических процессов. Это позволяет осуществлять мониторинг параметров производства в реальном времени и повышать эффективность управления качеством [9].

Проведенный анализ эволюции инструментов управления качеством в контексте смены технологических укладов позволяет выявить закономерную взаимосвязь между развитием промышленности и совершенствованием методов обеспечения качества продукции. Было установлено, что по мере усложнения технологических систем и расширения масштабов производства происходило постепенное развитие и усложнение инструментов управления качеством, а также расширение их функционального назначения.

На ранних этапах промышленного развития обеспечение качества продукции основывалось преимущественно на профессиональном опыте работников и простых методах контроля. По мере развития индустриального производства и увеличения объемов выпуска продукции начали формироваться системы технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений, которые стали институциональной основой управления качеством.

Дальнейшее развитие промышленности привело к внедрению статистических методов управления производственными процессами, позволяющих анализировать вариации параметров и выявлять причины возникновения дефектов. Использование данных методов

обеспечило переход от контроля готовой продукции к управлению качеством на уровне производственных процессов.

С развитием информационных технологий управление качеством стало неотъемлемой частью системы управления организацией. В этот период получили распространение системы менеджмента качества, международные стандарты, а также инструменты анализа, планирования и проектирования качества, позволяющие учитывать требования потребителей и повышать конкурентоспособность продукции.

Современный этап промышленного развития характеризуется формированием шестого технологического уклада, в рамках которого инструменты управления качеством приобретают цифровой и интеллектуальный характер. Активно развиваются такие инструменты, как системы промышленного интернета вещей, анализ больших данных, цифровые двойники и предиктивная аналитика качества, позволяющие осуществлять мониторинг производственных процессов в режиме реального времени и прогнозировать возможные отклонения на ранних стадиях производства.

Вместе с тем следует отметить, что в настоящее время Россия находится на этапе постепенного перехода к шестому технологическому укладу. Значительная часть отечественных предприятий продолжает функционировать в рамках технологий четвертого и пятого укладов, тогда как современные цифровые инструменты управления качеством внедряются ограниченно и требуют дальнейшего развития и распространения.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что развитие инструментов управления качеством напрямую связано с технологической эволюцией промышленности. В дальнейшем их совершенствование будет определяться процессами цифровизации производства, внедрением интеллектуальных систем анализа данных и формированием интегрированных систем управления качеством, ориентированных на повышение эффективности производственных процессов и устойчивое развитие промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Сухарев, О.С. Теория технологических укладов в структурном анализе роста российской экономики / О.С. Сухарев, Е.Н. Ворончихина // Российский экономический журнал. – 2021. – № 1. – С. 74–108.

2) Лифиц, И.М. Стандартизация, метрология и подтверждение соответствия: учебник и практикум для вузов / И.М. Лифиц. - 15-е изд., перераб. и доп. - Москва: Издательство Юрайт, 2026. – 462 с.

3) Басовский, Л.Е. Управление качеством: учебник / Л.Е. Басовский, В.Б. Протасьев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 231 с.

4) Бушуева, М.А. Ретроспективный анализ ивановского текстильно-промышленного кластера // Теория и практика общественного развития. – 2011. – №4. – С. 273-276.

5) Миронов, Б.Н. Экономическая история России. – СПб.: Питер, 2020. – С. 463-480.

6) Ханин, Г.И. Экономическая история России XX века. – М.: Дело, 2020. – 407 с.

7) Фейгенбаум, А. Контроль качества продукции: сокр. пер. с англ. / А. Фейгенбаум; авт. предисл. и науч. ред. А.В. Гличев. - Москва: Экономика, 1986. – 471 с.

8) Серяков, Г.Н. Содержание, структура и тенденции развития пятого и шестого технологических укладов как объектов исследования // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. – 2018. – № 5. – С. 46-51.

9) Дегтярева, В.В. Цифровизация как конкурентное преимущество госкорпорации «Росатом» / В.В. Дегтярева, Д.А. Мурзинцева // Вестник университета. – 2021. – № 12. – С. 34-39.

УДК 681.5

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ АСУ ТП КАК ОСНОВА ФОРМАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ И ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ

А.Е. Зуев, **И.В. Тюкин**

Научный руководитель – **И.В. Тюкин**, канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается подход к анализу нормативной документации, применимой при проектировании АСУ ТП. Показано, что иерархическая структура технических регламентов, документов по стандартизации, федеральных норм и правил, а также стандартов СПДС может служить основой формализации процедур оценки соответствия. Предложена трехмодульная архитектура СППР, ориентированная на извлечение требований, верификацию проектных решений и формирование рекомендаций.

Ключевые слова: *АСУ ТП, проектирование, техническое регулирование, оценка соответствия, нормативная документация, СППР, формализация требований*

TECHNICAL REGULATION IN APCS DESIGN AS A BASIS FOR REQUIREMENT FORMALIZATION AND CONFORMITY ASSESSMENT

A.E. Zuev, **I.V. Tyukin**

Scientific Supervisor – **I.V. Tyukin**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

This paper considers an approach to the analysis of regulatory documentation applicable to the design of automated process control systems (APCS). It is shown that the hierarchical structure of technical regulations, standardization documents, federal norms and rules, and SPDS standards can serve as a basis for formalizing conformity assessment procedures. A three-module decision support system architecture is proposed for requirement extraction, design verification, and recommendation generation.

Keywords: *APCS, design, technical regulation, conformity assessment, regulatory documentation, decision support system, requirement formalization*

Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) относится к видам инженерной деятельности, в которых техническое решение изначально связано с необходимостью соблюдения нормативных требований. Для проектной организации важны не только разработка функционально работоспособной системы, но и доказуемое соответствие решений требованиям технических регламентов, документам в области стандартизации, отраслевым нормам и правилам, а также требованиям к составу и оформлению проектной и рабочей документации [1-8]. Это особенно существенно при проектировании для опасных производственных объектов, где ошибки интерпретации нормативных требований приводят не только к замечаниям экспертизы, но и к рискам нарушения требований промышленной и пожарной безопасности [4, 7, 8].

Проблема заключается не столько в самом наличии нормативной базы, сколько в ее многослойности и неоднородности. Требования распределены между актами различной юридической силы, относятся к разным объектам регулирования, по-разному формулируют обязательность применения и требуют сопоставления с характеристиками конкретного объекта проектирования. В результате инженер-проектировщик вынужден одновременно решать содержательную техническую задачу и выполнять трудоемкую процедуру отбора применимых документов, интерпретации требований и проверки их выполнения в проектной документации. Наибольшая нагрузка возникает в повторяемых процедурах нормативного

контроля: проверке полноты документации, установлении наличия обязательных проектных решений и подтверждении их соответствия конкретным нормативным положениям.

Доступные публикации по проектированию АСУ ТП, по системам поддержки принятия решений в смежных технологических областях, а также нормативные и научные работы, посвященные машиночитаемому и онтологическому представлению требований, в основном сосредоточены на вопросах управления процессами, организации интеллектуальной поддержки и цифрового представления стандартов [9-15]. При этом существенно слабее проработана тема использования нормативной базы как самостоятельного объекта формализации в задачах проектирования. Вследствие этого актуальной становится задача анализа нормативной документации именно как основы для алгоритмизации процедур оценки соответствия.

Целью настоящего исследования является разработка подхода к анализу нормативно-технической документации в области проектирования АСУ ТП и формирование на этой основе концепции системы поддержки принятия решений, ориентированной на процедуры оценки соответствия. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: выявление и классификация нормативных требований, значимых для проектирования систем автоматизации; выделение уровней нормативной базы и типов требований, подлежащих формализации; определение логики преобразования текстовых нормативных положений в проверяемые правила; построение архитектуры СППР, обеспечивающей извлечение требований, проверку проектных решений и формирование рекомендаций по устранению выявленных несоответствий.

Содержательный вклад работы состоит в рассмотрении нормативной базы проектирования не только как внешнего ограничения, но и как структурируемого объекта анализа, на основе которого могут быть построены машинно-обрабатываемые правила оценки соответствия. Практическая значимость исследования определяется тем, что такой подход создает основу для сокращения доли рутинных проверок, повышения воспроизводимости проектных процедур и снижения риска нормативных ошибок при разработке документации.

Исходным этапом такого подхода является анализ нормативной базы, применимой к проектированию АСУ ТП. Она имеет иерархическое строение и включает документы, различающиеся по правовому статусу, предмету регулирования и роли в процедурах оценки соответствия. Верхний уровень образуют федеральные законы и технические регламенты, задающие обязательную рамку проектирования и общие требования к безопасности объектов, процессов и инженерных систем [3-8]. На следующем уровне располагаются группы документов, через которые эти требования конкретизируются применительно к задачам проектирования систем автоматизации: технические регламенты Таможенного союза и Евразийского экономического союза (ТР ТС / ТР ЕАЭС), Федеральные нормы и правила Ростехнадзора (ФНиП), а также документы в области стандартизации. Укрупненно такая иерархия представлена на рис. 1. Именно эта структура определяет границы допустимых проектных решений и формирует нормативную основу для разработки рабочей документации, схем автоматизации, систем противоаварийной защиты и средств пожарной безопасности.

Для практики проектирования особенно значим блок документов в области стандартизации. Федеральные законы о техническом регулировании и стандартизации задают механизм применения стандартов и иных документов, посредством которых обеспечивается соблюдение обязательных требований [5, 6]. Формально применение части таких документов носит добровольный характер, однако в инженерной практике они выступают основным инструментом доказательства соответствия проектных решений требованиям технических регламентов. Именно поэтому для проектировщика важна не абстрактная классификация документов, а возможность установить, какой нормативный источник подлежит учету применительно к конкретному объекту, разделу проекта или типу технического решения [6, 16].

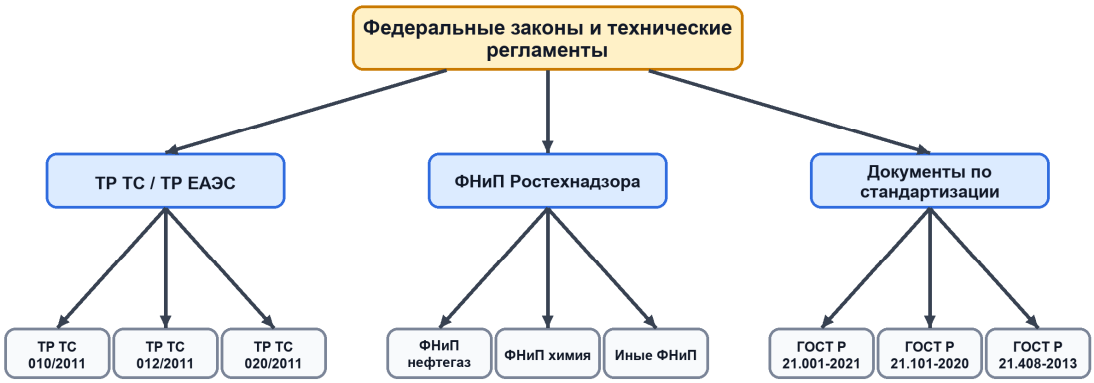


Рис. 1. Иерархическая структура нормативных документов, значимых для проектирования и оценки соответствия решений в АСУ ТП

Отдельную группу образуют отраслевые нормативные документы, в том числе Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности, а также документы, регулирующие пожарную безопасность и специальные условия эксплуатации опасных производственных объектов [4, 8]. Для систем автоматизации такие документы особенно важны, поскольку содержат требования к блокировкам, системам контроля параметров, защитным функциям, сигнализации и другим элементам, от которых зависят не только безопасность объекта, но и возможность однозначной проверки корректности принятых проектных решений. Эти требования, как правило, распределены по разным источникам, формулируются в неодинаковой терминологии и соотносятся с различными стадиями проектирования, что делает их прямое применение трудоемким и одновременно требует их последующего преобразования в формализуемые правила проверки.

Наряду с содержательными требованиями безопасности необходимо учитывать требования к составу и оформлению документации. Документы СПДС и смежные стандарты регламентируют структуру проектной и рабочей документации, состав листов, правила выполнения и оформления текстовых и графических материалов [1, 2]. Для автоматизации проектных процедур это означает, что объектом формализации должны быть не только собственно инженерные требования, но и требования к комплектности, оформлению, обозначениям, ссылкам и прослеживаемости решений. Иначе система будет поддерживать лишь отдельные технические проверки, но не сможет участвовать в процедурах внутреннего контроля и подготовки документации к экспертизе.

Сводное представление основных нормативных документов и систем стандартов, значимых для проектирования АСУ ТП, приведено в табл. 1.

Проведенный анализ показывает, что для задач автоматизации недостаточно хранить нормативные документы как неструктурированный массив текстов. Каждое нормативное положение, представляющее интерес для оценки соответствия, должно быть преобразовано в формализованное описание, включающее источник требования, условия применимости, объект проверки, вид контрольного действия и способ подтверждения в проектной документации [9-12]. Именно такая декомпозиция создает основу для перехода от чтения нормативных текстов к алгоритмам поддержки проектных решений.

Выявленная таким образом структура нормативной базы, представленная на Рис. 1, позволяет рассматривать процедуру оценки соответствия как последовательность взаимосвязанных этапов: от определения применимых нормативных требований до проверки проектных артефактов и подготовки рекомендаций по устранению несоответствий. Следовательно, специализированная система поддержки принятия решений (СППР) в рассматриваемой области должна быть ориентирована не на замену проектировщика, а на поддержку нормативно нагруженных процедур, в которых значительная часть операций поддается формализации [10-15].

Таблица 1. Нормативные документы для проектирования и оценки соответствия АСУ ТП

Обозначение / группа документов	Наименование	Значение для проектирования	Значение для оценки соответствия
ФЗ-190	Градостроительный кодекс Российской Федерации	Задает место решений по автоматизации в структуре проектной и рабочей документации	Проверка состава и содержания проектной документации
ФЗ-162	О стандартизации в Российской Федерации	Определяет статус стандартов и сводов правил, применяемых при проектировании	Использование стандартов как нормативной основы проверки решений
ФЗ-184	О техническом регулировании	Устанавливает общий механизм технического регулирования и связь требований со стандартами	Применение перечней документов по стандартизации
ФЗ-384	Технический регламент о безопасности зданий и сооружений	Задает обязательные требования к безопасности зданий, сооружений и инженерных систем	Проверка решений по перечню стандартов к техническому регламенту
ФЗ-123	Технический регламент о требованиях пожарной безопасности	Задает требования к пожарной безопасности, влияющие на функции автоматизации	Проверка по перечням стандартов и процедурам оценки соответствия
ФЗ-116 и ФНиП	О промышленной безопасности опасных производственных объектов; федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности	Устанавливают требования к системам контроля, ПАЗ, блокировкам и сигнализации на ОПО	Проверка обязательных решений по требованиям промбезопасности
ТР ТС/ТР ЕАЭС	Технические регламенты на машины и оборудование, оборудование для взрывоопасных сред, электромагнитную совместимость и смежные объекты регулирования	Задают требования к оборудованию и техническим средствам, связанным с АСУ ТП	Подтверждение соответствия оборудования конкретному регламенту
ПП РФ № 87	О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию	Определяет состав разделов проекта и требования к представлению решений	Контроль полноты разделов и наличия обязательных решений
СПДС и смежные стандарты	ГОСТ Р 21.001-2021, ГОСТ Р 21.101-2020, ГОСТ 21.408-2013 и другие стандарты по оформлению проектной и рабочей документации	Регламентируют комплектность, структуру и оформление документации на автоматизацию	Документарная проверка оформления, ссылок и прослеживаемости

Предлагаемый подход исходит из того, что процесс проектирования АСУ ТП определяется совокупностью требований нормативно-правовых и нормативно-технических документов, а также требованиями заказчика. При этом интеллектуальные методы должны использоваться не как автономный источник проектных решений, а как инструмент поддержки формализуемых процедур, встроенный в общий контур разработки, оформления и проверки проектной документации. Эта логика в укрупненном виде представлена на рис. 2.

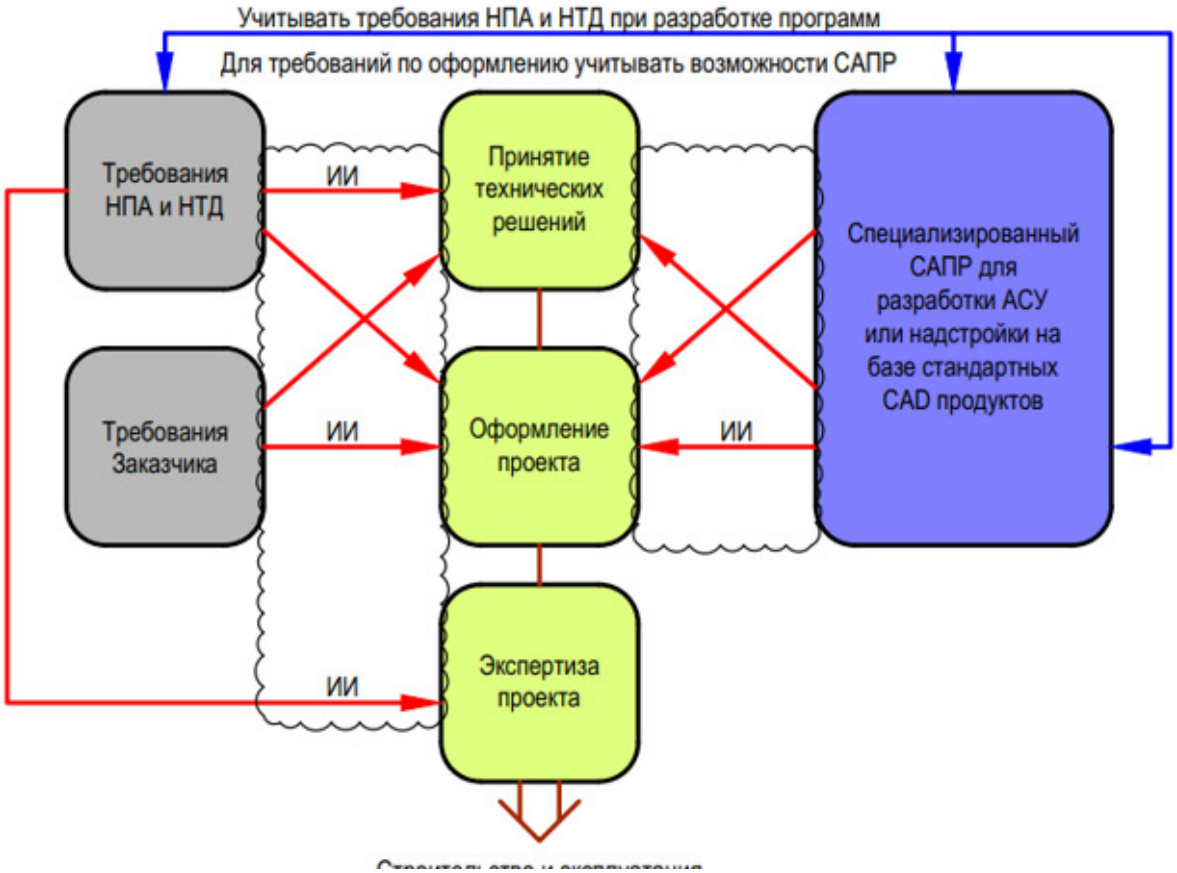


Рис. 2. Концептуальная схема взаимодействия нормативных требований, СППР и специализированного САПР в проектировании АСУ ТП

Представленная схема выделяет три ключевых контура: принятие технических решений, оформление проекта и проектную экспертизу. Специализированный САПР для разработки АСУ ТП или надстройка к стандартным CAD-продуктам выступает средой, в которой нормативные требования могут быть преобразованы в последовательность проектных действий и проверок с использованием интеллектуальных алгоритмов. Такое представление особенно важно для настоящей работы, поскольку связывает анализ нормативной базы с задачей последующей алгоритмизации процедур оценки соответствия.

С учетом этой логики предлагается трехмодульная архитектура СППР. Первый модуль ориентирован на извлечение и структурирование требований из нормативных документов. Его задачей является переход от текстового положения нормативного акта к формализованной записи, пригодной для дальнейшей обработки, включая определение источника, области действия, условий применимости и проверяемого признака. Второй модуль выполняет верификацию проектных решений и документации на соответствие выделенным требованиям. На этом этапе сопоставляются параметры объекта, состав проектных материалов, наличие обязательных защитных функций, а также корректность оформления документации. Третий модуль формирует рекомендации и отчет о результатах проверки, обеспечивая прослеживаемость от выявленного несоответствия к конкретному нормативному основанию и предлагая действия по корректировке проекта.

Взаимодействие модулей системы представлено на рис. 3.

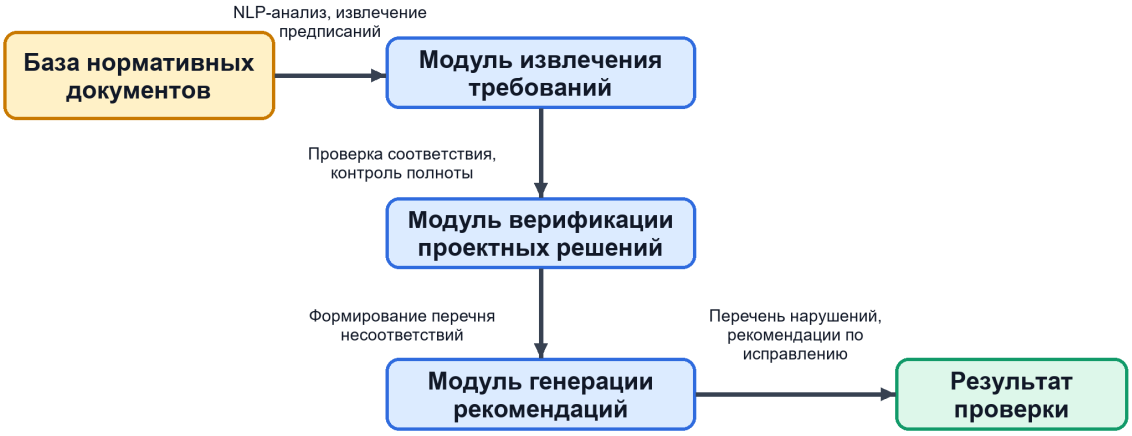


Рис. 3. Трехмодульная архитектура СППР для проектирования и оценки соответствия АСУ ТП

Принципиально важно, что в такой архитектуре интеллектуальная обработка нормативных документов не является самоцелью. Ее значение определяется тем, насколько она помогает выполнять процедуры проектной проверки: выявлять пропущенные требования, контролировать применимость документа, проверять комплектность документации и формировать воспроизводимое заключение о состоянии соответствия. Иными словами, центральным объектом автоматизации выступает не текст как таковой, а процедура оценки соответствия, выполняемая в нормативно заданной среде.

Еще одно существенное требование к архитектуре связано с необходимостью многослойного представления нормативной информации в базе знаний СППР. Это означает необходимость хранения не только текста требований, но и сведений о юридическом уровне документа, тематике регулирования, взаимосвязях между источниками и типах проверяемых характеристик. Без такой структуры невозможно обеспечить корректный выбор применимых требований и их дальнейшее использование в автоматизированных сценариях проектной проверки.

С практической точки зрения ценность предложенного подхода определяется прежде всего возможностью выделить те участки проектной деятельности, в которых процедуры оценки соответствия могут быть формализованы без потери инженерного смысла. К таким участкам относятся отбор применимых нормативных источников для конкретного объекта, контроль комплектности и оформления документации, проверка наличия обязательных проектных решений и формирование отчета о несоответствиях с указанием нормативных оснований. Наиболее перспективными для автоматизации являются повторяемые контрольные операции, не требующие каждый раз заново интерпретировать контекст проектного решения.

Вместе с тем анализ показывает, что не все процедуры проектирования одинаково поддаются алгоритмизации. Если контроль оформления, комплектности и прослеживаемости нормативных ссылок сравнительно хорошо формализуется, то проверка сложных технических решений требует сохранения экспертного участия. Это относится, например, к оценке достаточности выбранной архитектуры системы, интерпретации конфликтующих нормативных положений, а также к случаям, когда применимость документа зависит от особенностей технологического процесса или конкретных условий эксплуатации объекта. Следовательно, СППР должна рассматриваться как средство повышения качества и устойчивости проектных процедур, а не как механизм полного вытеснения инженерной экспертизы.

Основные направления практического применения предложенной архитектуры представлены в табл. 2.

Таблица 2. Процедуры оценки соответствия, поддерживаемые СППР

Процедура проектной проверки	Что поддается формализации	Практический эффект	Ограничения автоматизации
Определение применимых нормативных источников	Связь типа объекта и раздела проекта с нормативными документами	Снижение риска пропуска обязательных требований	Требуются корректное описание объекта и актуальная база знаний
Контроль состава и оформления документации	Проверка комплектности, структуры, обозначений и ссылок [1, 2]	Сокращение рутинных проверок перед контролем и экспертизой	Нужна адаптация к шаблонам организации и актуальным стандартам
Верификация формализуемых технических требований	Проверка обязательных функций, блокировок, сигналов и признаков соответствия [4, 7, 8]	Повышение воспроизводимости проверки типовых решений	Сложные случаи требуют экспертной интерпретации
Формирование рекомендаций и отчета о несоответствиях	Связь между замечанием, источником требования и корректирующим действием	Ускорение корректировки документации и повышение прозрачности проверки	Эффект зависит от полноты и точности формализованных правил

Таким образом, ключевым результатом исследования на данном этапе следует считать построение концептуальной модели, показывающей, какие элементы проектирования АСУ ТП могут быть переведены в алгоритмизируемые процедуры оценки соответствия. Для дальнейшего развития подхода принципиально важны актуализация базы нормативных требований, введение механизмов версионности документов, а также накопление корпуса проектных ситуаций, позволяющего уточнять формализованные правила и оценивать пределы их применимости.

В целом проведенный анализ нормативно-технической документации показал, что проектирование АСУ ТП должно рассматриваться как деятельность, в которой технические решения, требования к безопасности и требования к оформлению документации образуют единую нормативно обусловленную систему. Для задач проектирования систем автоматизации это означает необходимость формализации не только отдельных инженерных параметров, но и самих процедур оценки соответствия, включающих определение применимых требований, проверку проектных решений и подготовку обоснованных рекомендаций по устранению несоответствий.

На основе анализа предложена концептуальная модель СППР, ориентированная на поддержку нормативно нагруженных проектных процедур. В отличие от подходов, сосредоточенных главным образом на цифровизации проектирования как такового, предложенная архитектура связывает извлечение требований, верификацию решений и формирование рекомендаций с задачами технического регулирования, стандартизации и внутреннего контроля соответствия. Это позволяет рассматривать нормативную базу как ресурс для алгоритмизации повторяемых проектных действий.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием формальной модели нормативных требований, расширением онтологии предметной области, накоплением корпуса типовых проектных ситуаций и интеграцией СППР со средами подготовки проектной и рабочей документации. Практически значимым направлением является также разработка процедур актуализации базы знаний при изменении нормативных документов, поскольку именно устойчивость к изменениям нормативной среды определяет применимость подобных систем в реальной проектной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ Р 21.001-2021. Система проектной документации для строительства. Общие положения : электронный ресурс. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200182141 (дата обращения: 09.04.2026).

2) ГОСТ Р 21.101-2020. Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200173797 (дата обращения: 09.04.2026).

3) Градостроительный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 23.03.2026). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 09.04.2026).

4) О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 08.08.2024). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (дата обращения: 09.04.2026).

5) О стандартизации в Российской Федерации: Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ (ред. от 30.12.2020). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810/ (дата обращения: 09.04.2026).

6) О техническом регулировании: Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ (ред. от 23.07.2025). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (дата обращения: 09.04.2026).

7) Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. от 25.12.2023). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (дата обращения: 09.04.2026).

8) Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 31.07.2025). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения: 09.04.2026).

9) ПНСТ 864-2023. Умные (SMART) стандарты. Общие положения. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1303621735 (дата обращения: 09.04.2026).

10) Шалфеева, Е.А. Вопросы создания машинопонимаемых SMART-стандартов на основе графов знаний / Е.А. Шалфеева, В.В. Грибова // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 969-988. – DOI: 10.15622/ia.23.4.2. – URL: https://ia.spcras.ru/index.php/sp/article/view/16443 (дата обращения: 09.04.2026).

11) Кутузова, О.К. Автоматизация соблюдения требований нормативных документов при проектировании ИМ через коды Классификатора строительной информации (КСИ) / О.К. Кутузова, Ю.Ю. Дементьева // Информационное моделирование. – 2024. – Вып. 1 (3). – URL: https://im-journal.ru/articles/im_03_08.html (дата обращения: 09.04.2026).

12) Купцова, Д.В. Онтологические аспекты стандартизации / Д.В. Купцова, А.Я. Дмитриев, И.С. Новиков // Онтология проектирования. – 2025. – Т. 15, № 4. – С. 486-496. – DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-486-496. – URL: https://journals.rcsi.science/2223-9537/article/view/352632 (дата обращения: 09.04.2026).

13) Коростелёв, В.Ф. Системный подход к проектированию АСУ ТП / В.Ф. Коростелёв, В.А. Хайназарова // Наукосфера. – 2021. – № 7-2. – С. 221-226. – DOI: 10.5281/zenodo.5153039. – URL: https://zenodo.org/records/5153039 (дата обращения: 09.04.2026).

14) Петров, П.В. Разработка информационной системы поддержки принятия решений в ходе технологического процесса транспортировки газа: магистерская диссертация / П.В. Петров; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2018. – URL: https://earchive.tpu.ru/handle/11683/48080 (дата обращения: 09.04.2026).

15) Калинкин, Я.В. Разработка систем поддержки принятия решений для повышения эффективности управления процессами подготовки нефти и газа / Я.В. Калинкин, А.Г. Зебзеев // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XXI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 15-18 апреля 2024 г., Томск. – Томск: Изд-во ТПУ, 2024. – С. 705-709. – URL: https://www.earchive.tpu.ru/handle/11683/84779 (дата обращения: 09.04.2026).

16) Разъяснения к Перечню документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»: информация от 25 марта 2021 г. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400408201/ (дата обращения: 09.04.2026).

УДК 004.896

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ PLM-ПЛАТФОРМ IPS И ЛОЦМАН

В.В. Канин

Научный руководитель – **А.С. Ключников**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье представлен анализ программного комплекса IPS. Рассматриваются вопросы кастомизации интерфейса на базе .NET, архитектура ядра системы и расширенные возможности модуля технологической подготовки производства. Проводится сравнительный анализ с отечественной системой «Лоцман:PLM».

Ключевые слова: *IPS, Интермех, PLM, Лоцман:PLM, ядро, кастомизация, технологическое проектирование, импортозамещение*

COMPARATIVE ANALYSIS OF IPS AND LOTSIA PLM PLATFORMS

V.V. Kanin

Scientific Supervisor – **A.S. Klyuchnikov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article presents an in-depth analysis of the IPS software suite. It examines .NET-based interface customization, the system's core architecture, and the advanced capabilities of the manufacturing process planning (MPP) module. A comparative analysis with the Russian-made "Lotsman:PLM" system is also provided.

Keywords: *IPS, Intermech, PLM, Lotsman:PLM, core, customization, process planning, import substitution*

1. Архитектура системы, ядро и возможности кастомизации

Программный комплекс IPS базируется на ядре IPS Search, которое представляет собой объектно-ориентированную СУБД-независимую платформу. Система реализована на стеке .NET Framework/C#, что определяет её гибкость [1].

Архитектурные особенности:

- Ядро: в основе лежит мощный сервер приложений, который берет на себя всю бизнес-логику, освобождая клиентские места от избыточных вычислений. Поддержка СУБД PostgreSQL/Postgres Pro позволяет использовать систему в контуре импортозамещения [4].
- Кастомизация интерфейса: IPS предоставляет разработчикам и администраторам инструменты глубокой модификации:
  - Open API: Позволяет писать собственные плагины и расширения на языках C# или VB.NET.
  - Редактор форм: интерфейс карточек объектов не жестко задан, а может быть полностью пересобран под нужды предприятия (добавление вкладок, условий видимости полей, динамических списков).
  - Скриптовые расширения: в систему встроен интерпретатор, позволяющий описывать логику поведения объектов (например, автозаполнение атрибутов при создании) без перекомпиляции ядра[3].

2. Сравнительный анализ: IPS и «Лоцман:PLM» (АСКОН)

Обе системы являются лидерами рынка СНГ, однако имеют разные концептуальные подходы (табл. 1) [2].

Таблица 1. Сравнение IPS и «Лоцман:PLM» (АСКОН)

Критерий	IPS (Интермех)	Лоцман:PLM (АСКОН)
Интеграция с CAD	Исторически лучшая поддержка зарубежных CAD (SolidWorks, Inventor, NX).	Максимально тесная связь с Компас-3D.
Технологический блок	Модуль Techcard интегрирован в единое ядро, данные общие.	Используется связка с отдельным решением ВЕРТИКАЛЬ.
Гибкость настроек	Высокая доля визуальных редакторов для администрирования.	Требует более сложного программирования на Delphi/C++ для глубоких правок.
Архитектура	Изначально трехзвенная, ориентация на работу в глобальных сетях.	Традиционно сильна в локальных сетях крупных КБ.

Главное отличие IPS – в монолитности данных. Если «Лоцман» часто выступает интегратором для разных продуктов АСКОН, то IPS – это единая среда, где конструктор и технолог работают в одной базе без процедур «передачи» данных [2].

3. Расширенные функциональные возможности

IPS охватывает полный цикл КТПП:

- Expert-система: встроенный модуль экспертных оценок позволяет автоматизировать подбор материалов и стандартных изделий на основе заданных условий.
- Управление изменениями: реализован механизм «Извещений об изменениях» с автоматическим контролем версионности и оповещением всех участников жизненного цикла.
- MDM-система: ведение эталонных справочников (материалы, инструменты, оборудование) с защитой от дублирования [1].

4. Технологическое проектирование (IPS Techcard)

Раздел технологической подготовки в IPS является одним из самых развитых на рынке благодаря модулю Techcard:

1. Автоматизированное проектирование ТП: система позволяет создавать техпроцессы на основе прототипов (ТП-аналогов) или через генеративное проектирование.
2. Материальное и трудовое нормирование: встроены алгоритмы автоматического расчета масс, норм расхода материалов и времени выполнения операций по нормативам (МНС).
3. Формирование комплекта ТД: генерация карт (МК, ОК, КЭ, ведомостей) происходит строго по ГОСТ 3.1105-2011 и другим стандартам ЕСТД.
4. Связь с производством: технологический состав изделия в IPS автоматически трансформируется в производственные спецификации для передачи в ERP-системы (1С:ERP, SAP) [5].

Заключение

IPS выделяется на фоне конкурентов своей «всеядностью» по отношению к CAD-системам и беспрецедентной глубиной интеграции технологического модуля. Открытость системы для кастомизации на базе .NET делает её платформой, способной адаптироваться под специфику любого машиностроительного предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Интермех: официальный портал. – URL: https://intermech.ru/?ysclid=mr3fxqxuko605500111 (дата обращения: 08.04.2026).

2) Фертман, И. Система IPS — современное средство создания электронных архивов, систем документооборота, PDM и PLM / И. Фертман, А. Тучков, А. Рындин // САПР и графика. – 2016. — URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18497

3) IPS: Руководство пользователя IPS Techcard LT Certified / ИНТЕРМЕХ. – URL: https://intermech.by/docs/IPS_Techcard_LT_Certified.pdf (дата обращения: 08.04.2026)

1) Единый реестр отечественного ПО. Свидетельство о регистрации IPS №1456 // Минцифры РФ: [сайт]. – URL: https://www.it-lex.ru/reestr-rossijskogo-po?ysclid=mr3g5qw8e6961027797

2) IPS Techcard: функциональные возможности // ИНТЕРМЕХ: [сайт]. - URL: https://intermech.ru/ips_techcard2.html (дата обращения: 08.04.2026)

УДК 621.914.1

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

И.В. Каныгин

Научный руководитель – **А.С. Ключников**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В данной статье представлен обзор текущего состояния и современных тенденций в сфере механообработки, использование прогрессивных методов, рассмотрены способы повышения эффективности и производительности фрезерования.

Ключевые слова: *фрезерования, высокопроизводительное фрезерование, высокоподачное фрезерование*

METHODS FOR MILLING EFFICIENCY IMPROVING

I.V. Kanygin

Scientific Supervisor – **A.S. Klyuchnikov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This paper presents a review of the current state and contemporary trends in machining, highlighting advanced methods and examining approaches to enhancing the efficiency and productivity of milling.

Keywords: *milling, high-performance milling, high-feed milling*

Введение

В современных условиях механической обработки одной из ключевых задач является оптимизация технологических процессов. Рентабельность машинного производства, рост производительности труда и качество продукции находятся в прямой зависимости от станков, инструментов и технологии обработки металлов резанием. Современное оборудование, программное обеспечение и режущий инструмент позволяют внедрить прогрессивные способы фрезерования. Их использование дает возможность значительно улучшить технико-экономические показатели и работоспособность технологического оборудования, за счёт наиболее полного использования машинного времени, то есть работы с максимальной производительностью, когда выпуск деталей в единицу времени максимален [2].

Фрезерование является широко применимым и наиболее универсальным способом механической обработки для придания заготовке необходимой формы и размеров, его можно классифицировать по различным признакам и способам обработки. Существует классический метод послойной обработки с большим съемом за проход и небольшими подачами, недостаток такой работы, это небольшая скорость обработки и необходимость больших крутящих моментов. Современные тенденции можно охарактеризовать как необходимость ухода от тяжелой обработки к более легкой, с небольшой глубиной и небольшими диаметрами фрез, но в тоже время с большими подачами. В применении таких методов нет необходимости в передаче больших крутящих моментов, что позволяет использовать более компактное и дешевое оборудование. В связи с этим изменился подход к способам фрезерования.

Повышение производительности станков с ЧПУ в значительной мере зависит от технического уровня оборудования, режущего и вспомогательного инструмента, которые обеспечивающего возможность сокращения штучно-калькуляционного времени. Оно сокращается благодаря большой концентрации переходов за одну операцию, интенсификации режимов резания и применения прогрессивных методов обработки [1].

Смысл повышения эффективности фрезерования заключается в максимальном количестве удаленного материала за единицу времени. Производительность, определяемая во фрезеровании величиной удельного объема снимаемого материала, может быть увеличена или оптимизирована разными способами. В первую очередь это оптимизация трех параметров: глубины резания, ширины резания и подачи [4]. Все прогрессивные методы обработки направлены на оптимизацию этих параметров, с учетом стойкости инструмента. Правильный выбор инструмента играет при этом важную роль. Но не менее значимым является и выбор оптимального метода фрезерования.

В последнее время существует тенденция внедрения высокопроизводительной (High Productivity Machining) обработки, в основе которой лежит процесс резания, при котором значения подач выше в несколько раз, чем при обычной обработке. К таким прогрессивным методам высокопроизводительного фрезерования можно отнести плунжерное фрезерование, высокоподачное фрезерование, и динамическое трохоидальное фрезерование.

Плунжерное фрезерование

При плунжерном фрезеровании (рис. 1) обработка осуществляется не периферийной, а торцевой частью инструмента, при этом преобладают осевые, а не радиальные силы резания. Плунжерное фрезерование применяется тогда, когда использование традиционных методов невозможно, например, при необходимости использования инструмента с большим вылетом. Такой способ фрезерования не является первым выбором, так как потребуется последующая черновая доработка [4].

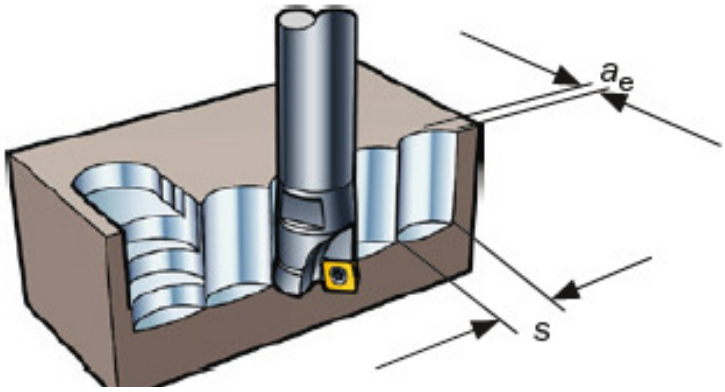


Рис. 1. Плунжерное фрезерование [4]

Динамическое трохоидальное фрезерование

Динамическое трохоидальное фрезерование – это технология высокопроизводительной обработки, при котором инструмент перемещается по сложной траектории (рис. 2), одновременно совершая круговые и прямолинейные движения, в зависимости от условий резания изменяются подачи.

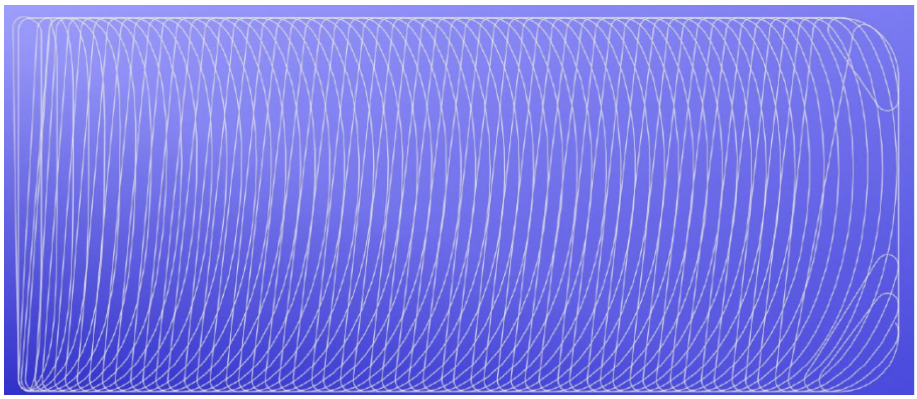


Рис. 2. Траектория трохоидального фрезерования

К этому методу обработки можно отнести технологию iMachining, это интеллектуальное высокопроизводительное фрезерование, стратегия которого основана на вводных данных (рис. 3), а именно характеристики станка и обрабатываемого материала (рис. 4).

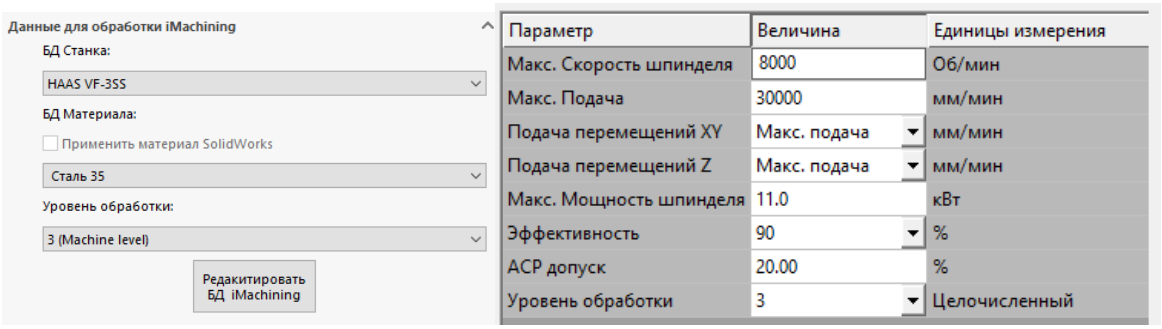


Рис. 3. База данных станка для обработки iMachining

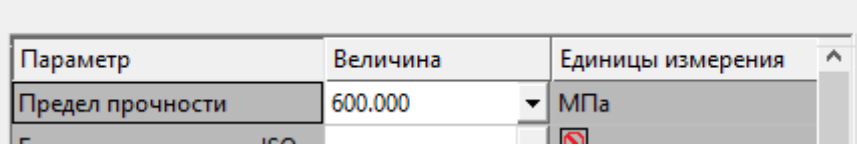


Рис. 4. База данных материала для обработки iMachining

Запатентованный мастер технологии iMachining автоматически рассчитывает и оптимизирует подачи, скорости резания, и толщину стружки для каждой точки траектории, основываясь на свойствах материала заготовки и технических ограничений станка. Обеспечивая постоянную силу резания и оптимальные подачи, стратегия обработки заметно продлевает срок службы инструмента. Фреза загружена постоянно, но ширина резания варьируется, чтобы поддерживать постоянную силу резания [6]. Волнообразная траектория позволяет плавно врезаться и сглаживать изменения траектории (рис. 5). Данная стратегия позволяет использовать инструмент на всю глубину.

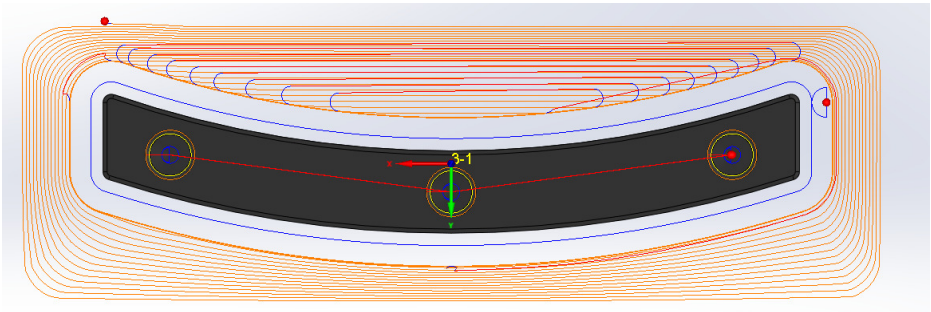


Рис. 5. Стратегия обработки по технологии iMachining

Работа с модулем iMachining позволяет писать управляющую программу практически в автоматическом режиме. Слайдер iMachining (рис. 6) позволяет выбрать один из 8 уровней, чтобы автоматически адаптировать режимы резания к реальным условиям системы СПИД (Станок, приспособление, инструмент, деталь). Изменяя уровень обработки, будут изменяться параметры резания, такие как обороты, подача и боковой шаг. Это решение помогает справляться с проблемами, которые могут быть связанны с жёсткостью станка, оснастки и режущего инструмента. Выбор более низкого уровня может обеспечить оптимальную обработку даже при недостаточной жёсткости системы СПИД.

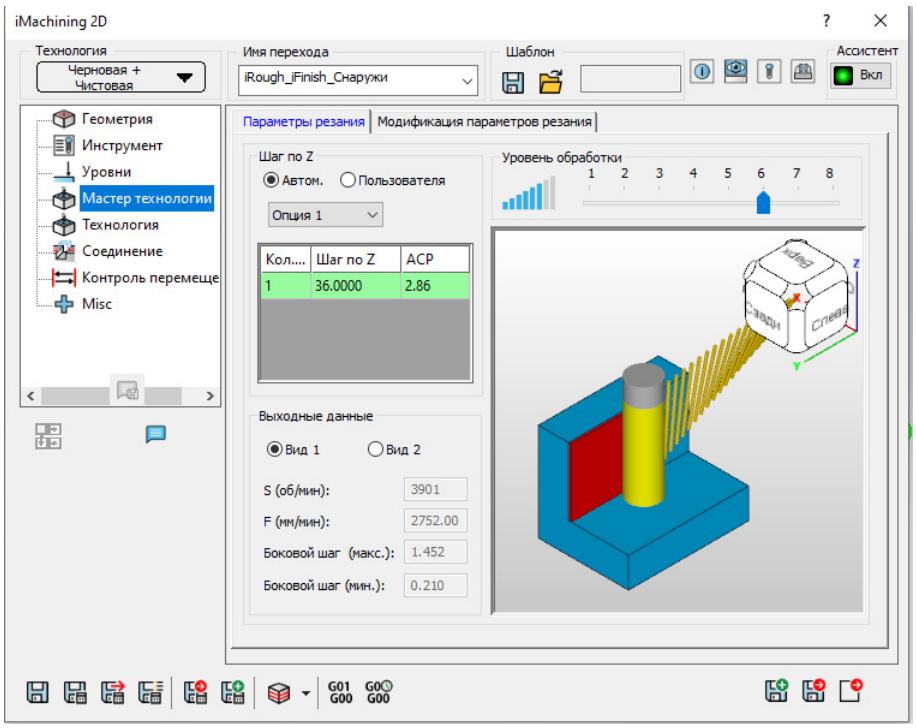


Рис. 6. Мастер технологии 2D iMachining

Использование технологии iMachining значительно упрощает процесс определения геометрии (рис. 7). В режиме распознавания элементов модуль iMachining 2D находит и определяет обрабатываемые элементы изделия на основе указанных элементов детали, например, достаточно в режиме распознания щёлкнуть по необходимой поверхности, и технология «Смарт поверхность» создаст цепочки на основе простого выбора поверхностей. Элементы карманов и их уровни, которые могут располагаться на разной глубине, определяются автоматически.

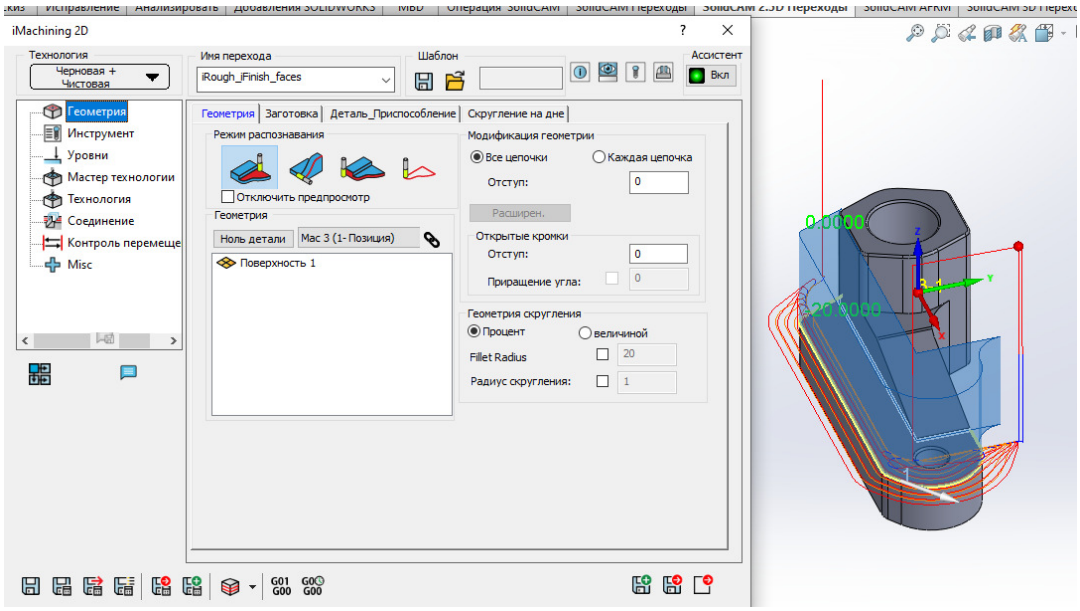


Рис. 7. Определение геометрии

Несмотря на рост производительности при использовании этой технологии, она требует значительных вложений в CAM систему, инструмент и опции предпросмотра кадров

для некоторых станков. При износе концевой фрезы, её необходимо заменить, что требует дополнительные временные затратами на установку и настройку инструмента.

В связи с этим, использование этого метода будет оправдано при высокой цене готовой продукции, для штучных деталей сложной геометрической формы. Высокая цена детали компенсирует затраты на инструмент и программное обеспечение.

Высокоподачное фрезерование

Фрезерование на высоких подачах является одним из наиболее производительных методов черновой обработки. Данный метод основан на относительно небольшой глубине резания, высоких значениях подачи и небольшом угле в плане.

Главный угол в плане — это угол, измеряемый между главной режущей кромкой и обрабатываемой поверхностью, он определяет толщину срезаемого слоя, оказывает влияние на направление сил резания и стойкость инструмента (рис. 8) [4].

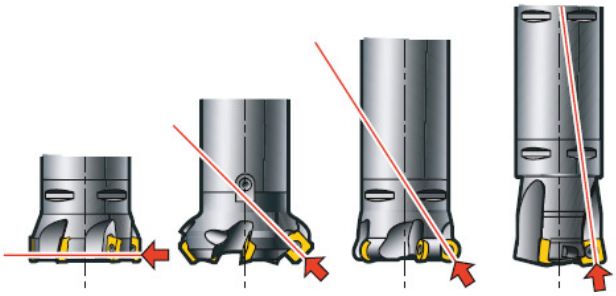


Рис. 8. Распределение нагрузки в зависимости от угла [4]

Для фрезерования с высокими подачами, в основном используются фрезы с главным углом в плане около 10° (рис. 9). Снижение угла в плане, ведет к образованию более тонкой стружки. Уменьшение толщины стружки происходит из-за распределения одного и того же объёма снимаемого металла на большей длине режущей кромки. Неблагоприятным последствием небольшого угла в плане является увеличение осевой составляющей силы резания, что вызывает ухудшение качества поверхности, поэтому в большинстве случаев потребуется дополнительная чистовая обработка для ответственных поверхностей [4].

Рис. 9. Фрезы с углом в плане 10° [3]

Высокопроизводительные фрезы для работы с высокими подачами подходят для большинства операций фрезерования, таких как обработка плоскостей, карманов, пазов. Могут использоваться при различных типах врезания – по винтовой интерполяции, под углом. Низкие силы резания уменьшают энергопотребление и, соответственно, позволяют использовать малогабаритные станки.

Для программирования обработки подойдет любая CAM система или встроенные циклы для написания программ со стойки станка. Стратегия обработки определяется программистом или наладчиком. Подача на зуб (*fz*, мм/зуб) используется для расчета минутной подачи при фрезеровании. Скорость подачи (*vf*, мм/мин) или минутная подача — это скорость движения инструмента относительно заготовки, измеряемая в пройденном пути

за единицу времени. Зависит от подачи на зуб и числа зубьев фрезы [5]. Подбор режимов резания происходит опытным путем, отталкиваясь от режимов, рекомендованных производителем, учитывая жесткость системы СПИД. При износе режущего инструмента необходимо заменить только твердосплавные пластины.

Вывод

В результате анализа современных методов повышения эффективности фрезерования, можно сделать вывод, что выбор оптимального метода обработки определяется совокупностью технологических и экономических факторов.

При плунжерном фрезеровании обеспечивается высокая производительность за счет осевого врезания инструмента. Однако данный метод требует черновой доработки, что увеличивает общее время обработки.

Высокопроизводительный метод трохоидального фрезерования, в том числе реализованный в технологии iMachining имеет ряд ограничений для широкого применения. Это высокая стоимость концевых фрез, и необходимость замены при износе. Необходимость использования дорогостоящих CAM систем, и дополнительных опции для оборудования. Этот метод будет оправдан для штучных деталей при высокой цене готовой продукции.

С точки зрения сочетания выгод и затрат для повышения эффективности фрезерования стоит рассматривать высокоподаточное фрезерование. Управляющая программа может быть написана в любой CAM системе, использование сменных многогранных пластин значительно дешевле монолитных твердосплавных фрез и требует меньше времени на замену изношенных пластин. Фрезерование с высокими подачами позволяет достаточно быстро и эффективно производить обработку заготовок, что позволит более эффективно использовать оборудование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Григорьев, С.Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: Справочник / С.Н. Григорьев, М.В. Кохомский, А.Р. Маслов; под общ. ред. А.Р. Маслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с. – (Б-ка инструментальщика).

2) Павлов, Е.В. Анализ основных тенденций развития технологий механической обработки материалов / Е.В. Павлов // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование : сборник научных трудов Международной молодежной научно-практической конференции: в 2 т., Курск, 17–18 ноября 2015 года / Отв. ред. Е.В. Павлов. Том 2. – Курск, 2015. – С. 133-135.

3) Kyocera. Каталог MFH Series. High Efficiency and high feed cutter. – URL: https://asia.kyocera.com/products/cuttingtools/wp-content/uploads/2017/01/4-20170130_3_KYOCERA_MFH_catalog_EN.pdf/ (дата обращение 09.03.2026).

4) SandvikCoromant. Технология обработки металлов резанием. – URL: https://sandvikcoromant.ru/cert/catalogs/sandvikcoromant.pdf (дата обращение 08.03.2026).

5) Высокопроизводительная обработка металлов резанием. – М.: Издательство «Полиграфия», 2003. – 301 с.

6) SolidCam: [сайт]. - URL: https://solidcam.com/ru/imachining/imachining-2d/ (дата обращение 07.03.2026).

УДК 658.56

НОВЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И РИСКОВ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

А.А. Кириченко, Е.М. Смолинова

Научные руководители – **А.П. Чирков,** д-р техн. наук, профессор;
С.А. Соловьева, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье приведены результаты исследований используемой в международной практике методологии оценки уровня зрелости управления проектами (модель зрелости возможностей, CMM) и возможность ее использования для оценки процессов систем менеджмента качества. На конкретном примере проверена целесообразность и результативность применения методологии одной из моделей CMM - стандартов серии ГОСТ Р ИСО МЭК 15504, для оценки зрелости (уровня рисков и возможностей) процессов системы менеджмента качества вуза.

***Ключевые слова**: возможности, риски, система менеджмента качества, вуз*

A NEW APPROACH TO ASSESSING THE CAPABILITIES AND RISKS OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEM PROCESSE

A.A.Kirichenko, E.M.Smolinova

Scientific Supervisor – **A.P. Chirkov,** Doctor of Technical Sciences, Professor;
S.A. Solovyeva Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This article presents the results of research into a project management maturity assessment methodology used internationally (the CMM capability maturity model) and its applicability to quality management system processes. A specific example examines the feasibility and effectiveness of applying the methodology of one of the CMM models—the GOST R ISO IEC 15504 series of standards—to assess the maturity (risk and opportunity levels) of a university's quality management system processes.

***Keywords:** opportunities, risks, quality management system, university*

Введение

Оценка рисков и возможностей процессов систем менеджмента качества (СМК) является одним из критериев их соответствия современным требованиям. Однако имеющиеся официальные методические документы не предлагают конкретных, эффективных методов оценки возможностей процессов.

Для разработки доступных для применения и эффективных методов оценки рисков и возможностей процессов, на конкретном примере оценена возможность применения методологии стандартов серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504. Результаты выполненных исследований могут быть использованы в практике оценки процессов СМК различных отраслей.

1. Особенности метода CMM (модель зрелости возможностей) и перспективы их применения в совершенствовании СМК.

Модель зрелости возможностей (Capability Maturity Model, CMM) была разработана в 1987 г. в рамках проекта Института программной инженерии (Software Engineering Institute) исследовательского центра университета Carnegie-Mellon, США. [1]

Обзор методологии CMM, выполненный в [2] и других публикациях [1, 3-5], позволил представить общую характеристику разновидностей моделей CMM (рис. 1).

<table>
<tr><td colspan="9">CMM</td></tr>
<tr><td colspan="9">Модель зрелости способностей (Capability Maturity Model, CMM)</td></tr>
<tr><td colspan="9">была разработана в 1987 г.</td></tr>
<tr><td colspan="9">Название модели зрелости проектного управления</td></tr>
<tr><td>CMMI</td><td>IPMA DELTA</td><td>P3M3</td><td colspan="3">SPICE</td><td>PMMM</td><td>ProMMM</td><td>PMMMsm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Модель зрелости способностей (Capability Maturity Model, CMM)</td><td rowspan="2">Модель оценки зрелости организаций в области управления проектами</td><td rowspan="2">Модель зрелости организационного управления проектами (The Organizational Project Management</td><td colspan="3" rowspan="2">Модели по оценке и улучшению управленческой зрелости</td><td rowspan="2">Модель зрелости управления проектами (The Kerzner Project Management</td><td rowspan="2">Модель зрелости проектного управления (The Project Management Maturity</td><td rowspan="2">Модель зрелости управления проектами (PM Solutions Project Management</td></tr>
<tr></tr>
<tr><td colspan="9">область использования</td></tr>
<tr><td>ИТ</td><td>для всех отраслей</td><td>для всех отраслей</td><td colspan="3">ИТ, авто, космос, медицина</td><td>для всех отраслей</td><td>для всех отраслей</td><td>для всех отраслей</td></tr>
<tr><td colspan="9">год разработки (внедрения)</td></tr>
<tr><td>2000</td><td>2009</td><td>2003</td><td>1998</td><td>2008</td><td>2009</td><td>2001</td><td>2003</td><td>2007</td></tr>
</table>

Рис. 1. Сравнительный анализ наиболее популярных в мире моделей зрелостей

Как показал анализ, в основном принято ранжирование зрелости процессов по пяти уровням. Исключение составили CMMI и ProMMM, где были приняты 4 уровня, и SPICE (ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504), где приняты 6 уровней.

Основные критерии отнесения к уровням (на примере SPICE):

- Уровень 0. Неполный, на нём процесс не реализован или не смог достичь своего назначения.

- уровень 1. Осуществленный, на котором процесс каким-то образом достиг своего назначения.

- уровень 2. Управляемый, на котором процесс выполняется управляемым образом (планируется, регулируется, проводится его мониторинг), а его рабочие продукты соответствующим образом установлены, контролируются и поддерживаются.

- уровень 3. Установленный, на нем процесс осуществляется с использованием определенных методов и инфраструктуры, которые позволяют достичь нужных выходов.

- уровень 4. Предсказуемый, на нем установлены количественные цели осуществления процесса, собраны и проанализированы результаты измерений степени достижения целей.

Уровень 5. Оптимизирующий, на нем процесс непрерывно улучшается для достижения соответствующих текущих и планируемых бизнес-целей. В публикациях подчеркивается универсальность методологии, то есть она может быть использована для всех отраслей.

1.1. Основные инструменты стандартов серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504

Стандарты серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504 [6-10] представили широкой набор инструментов для улучшения и определения возможностей процесса. В их числе следующие:

- шкала ранжирования процессов по уровням зрелости;

- шкалы рейтинговой оценки уровней возможностей процессов;

- шкала расхождений между уровнями возможностей процесса;

- критерии мер достижения процессом своих назначений (40 конкретных характеристик);

- критерий достижения процессом уровня возможностей;

- характеристики потенциальных последствий расхождения рейтингов уровней возможностей процессов;

- прогноз потенциальных последствий расхождения рейтингов целевых и фактических уровней возможностей процессов;

- классификация рисков, связанных с последствиями расхождений уровня возможностей;

- критерии уровней рисков, связанных со степенью расхождения уровней возможностей процесса;

- оценка последствий возникновения проблем, связанным с расхождениями уровня возможностей процессов;

- графическое представление результатов оценки набора профилей процессов (рис. 2).

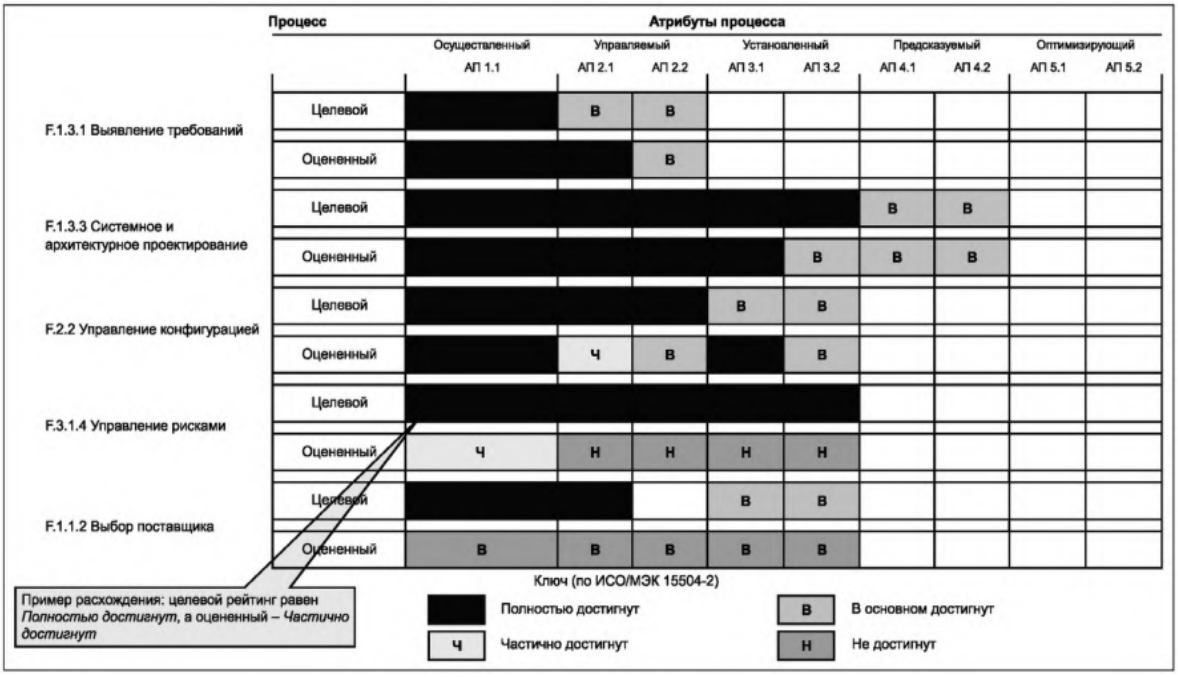


Рис. 2. Целевые и оцененные уровни процессов [9]

Для практического использования основное значение имеют критерии мер достижения процессом своих назначений. Например: процесс соответствует 2 уровню, если:

- идентифицированы цели осуществления процесса;

- осуществление процесса планируется, и проводится его мониторинг;

- осуществление процесса регулируется для соответствия планам:

- определены, распределены и доведены до сведения ответственность и полномочия по осуществлению процесса;

- идентифицированы, доступны, выделены и используются ресурсы и информация, необходимые для осуществления процесса;

- интерфейсы между участвующими сторонами управляются с целью обеспечить как эффективное взаимодействие, так и четкое распределение ответственности;

- определены требования к рабочим продуктам процесса;

- определены требования к документации и контролю за рабочими продуктами:

- рабочие продукты надлежащим образом идентифицированы, документированы и контролируются;

- проводится надзор за рабочими продуктами в соответствии с запланированным порядком и, при необходимости, регулирование для удовлетворения требованиям.

Аналогично конкретные критерии сформулированы и для остальных уровней возможности процессов.

1.2. Перспективы применения стандартов серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504 для оценки возможностей и рисков процессов СМК

Наличие конкретных характеристики уровня зрелости процессов, их возможностей, а также конкретных критериев оценки уровня возможностей процессов и потенциальных последствий расхождения целевого и оцененного профилей позволяют использовать эти инструменты и в отношении процессов СМК.

Актуальность данного исследования подтверждается еще и тем, что введение в действие новой версии ISO 9001:2025 требует от организаций делать еще больший акцент на управлении рисками на всех уровнях системы менеджмента, определяя риски и возможности, по которым должны быть предприняты действия, позволяющие организации постоянно поставлять соответствующие продукты и услуги и повышать удовлетворенность потребителей.

2. Оценка возможностей процессов СМК ВУЗа с применением методологии стандартов серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504

2.1. Характеристики процессов систем менеджмента качества и методы их оценки

Процессы составляют основу системы менеджмента качества (СМК), обеспечивая переход от функционального управления к непрерывному управлению взаимосвязанными видами деятельности.

Процесс в СМК по ГОСТ Р ИСО 9001-2015 - это совокупность взаимосвязанных видов деятельности, преобразующая входы (материалы, информация) в выходы (продукция, услуги) для получения добавленной ценности. Это управляемая система действий, направленная на достижение целей по качеству, часто следующая циклу PDCA (планируй-делай-проверяй-действуй).

Основные характеристики процесса включают: целевую ориентацию (процесс всегда направлен на достижение определенного результата), управляемость (процесс имеет владельца или ответственного, а также показатели качества, определяющие эффективность его реализации), ресурсную обеспеченность (использование персонала, оборудования, информации и времени для выполнения задач) и другие.

Оценка характеристик процессов системы менеджмента качества (СМК) основана на сравнении реальных показателей с установленными эталонами для определения результативности и эффективности. Ключевые методы оценки характеристик процессов включают: анализ отклонений, мониторинг КПЭ (KPI), бенчмаркинг, статистические методы, самооценку и внутренние аудиты.

Основные методы оценки возможностей процессов СМК включают: статистические методы (используются для оценки стабильности и воспроизводимости), анализ результативности (сравнение реальных показателей процесса с установленными целями или нормативами), внутренний и внешний аудит (проверка соответствия процесса требованиям стандартов (например, ISO 9001, и внутренним регламентам)), анализ отклонений (мониторинг несоответствий, внутренних и внешних дефектов), метод SERVQUAL (оценка качества услуг, основанная на разнице между ожиданиями клиентов и их восприятием полученного результата).

Ещё одним методом оценки возможностей процессов СМК является методология, изложенная в стандартах серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504.

2.2. Применение инструментов оценки возможностей и рисков в отношении процесса СМК ВУЗа

В ходе выполненного исследования в качестве объекта проверки применимости методологии стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504 был выбран процесс выполнения выпускной квалификационной работы в ЯГТУ [11].

Этот процесс является документированным, и относится к процессам системы менеджмента качества университета.

На первом этапе был подготовлен чек-лист, в котором для каждого уровня и атрибута процесса приведены требования, по которым оценивается процесс. Фрагмент чек-листа приведен на рис. 3.

Чек-лист
для оценки уровня возможности и риска процесса системы менеджмента качества

Выполнение выпускной квалификационной работы

Код атрибута	Является мерой той степени, до которой:	Полное достижение этого атрибута характеризуется следующим:	Целевой	Фактический	Примечание
АП1.1	процесс достигает своих определённых выходов.	процесс достиг своих определённых выходов	1		
АП2.1	может быть достигнуто управление осуществлением процесса.	идентифицированы цели осуществления процесса	1		
		осуществление процесса планируется, и проводится его мониторинг	1		
		осуществление процесса регулируется для соответствия планам	1		
		определены, распределены и доведены до сведения ответственность и полномочия по осуществлению процесса	1		
		идентифицированы, доступны, выделены и используются ресурсы и информация, необходимые для осуществления процесса	1		
		интерфейсы между участвующими сторонами управляются с целью обеспечить как эффективное взаимодействие, так и четкое распределение ответственности	1		
АП2.2	должно быть достигнуто управление результатом процесса.	определены требования к рабочим продуктам процесса	1		
		определены требования к документации и контролю за рабочими продуктами	1		
		рабочие продукты надлежащим образом идентифицированы, документированы и контролируются	1		
		проводится надзор за рабочими продуктами в соответствии с запланированным порядком и, при необходимости, регулирование для удовлетворения требованиям	1		

Рис. 3. Фрагмент чек-листа оценки возможностей процесса

В качестве целевого уровня был принят уровень соответствия всех атрибутов процесса, то есть наличия в документированном процессе признаков полного достижения соответствия этого атрибута.

На втором этапе мы оценили наличие в документе процесса свидетельства соответствия требованиям атрибутов (заполнили чек-лист). Это позволило выявить позиции, по которым в настоящее время не используются возможности, характеризующие качество зрелого процесса.

Обработка данных из заполненного чек-листа была выполнена с применением специально разработанной нами программы в Microsoft EXCEL. На рис. 4 приведены результаты анализа процесса.

Профиль, расхождение, риск	Уровень 1	Уровень 2		Уровень 3		Уровень 4		Уровень 5	
	АП1.1	АП2.1	АП2.2	АП3.1	АП3.2	АП4.1	АП4.2	АП5.1	АП5.2
Целевой профиль	П	П	П	П	П	П	П	П	П
Оцененный профиль	П	П	П	П	П	П	В	Н	Н
Расхождение атрибутов процесса	–	–	–	–	–	–	Небольшое	Большое	Большое
Расхождение уровня возможностей		-		-		слабое		значительное	
Риск уровня возможностей	-			-		Низкий риск		Низкий риск	
Связанный с процессом риск	Низкий риск								

Рис. 4. Результаты анализа возможностей и рисков процесса выполнения ВКР:
П – атрибут процесса полностью достигнут,
В – атрибут процесса в основном достигнут,
Н – атрибут процесса не достигнут

Используя методологию стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504, были оценены уровень зрелости процесса и риски от неполного развертывания процесса.

В частности, для ситуации, которая отражена на рис. 5, общий риск оценен как низкий, а в качестве последствий его наличия отмечены невозможность количественного

измерения осуществления или раннего обнаружения проблем и невозможность достижения или оценки улучшения процесса.

Учитывая, что у атрибута АП4.2 уровень «в основном достигнут», а по обоим атрибутам уровня 5 рейтинг оценки – «не достигнут», процесс оценен как процесс четвертого уровня.

Используя набор критериев оценки уровня возможностей процессов, предложенных в ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504-2, по результатам оценки уровня возможностей процесса подготовки ВКР подготовлена основа для составления Плана мероприятий по развертыванию возможностей процесса (табл. 1).

Таблица 1. Основа для составления Плана мероприятий по развертыванию возможностей процесса «Выполнение выпускной квалификационной работы»

Недостатки	Мероприятие	Срок исполнения	Ответственный
после корректирующих действий не переустанавливаются (при необходимости) контролируемые пределы.			
не определены цели улучшения процесса, которые обеспечивают соответствующие бизнес-цели.			
не проанализированы соответствующие данные для идентификации общих причин вариаций при осуществлении процесса.			
не проанализированы соответствующие данные для идентификации возможностей применения в хорошей практике и инновациях.			
не идентифицированы возможности улучшений, вытекающих из новых технологий и концепций процесса.			
не оценено влияние всех предложенных изменений относительно целей определенного и стандартного процессов.			
реализация всех согласованных изменений не управляется с целью обеспечить, что любое вмешательство в осуществление процесса понято и проведено.			
эффективность изменений процесса на основании фактического выполнения не оценена относительно установленных требований к продукту и целей процесса для определения того, являются ли полученные результаты общими или частным случаем.			

Заключение

Выполненный анализ методологии оценки зрелости управления проектами и процессов с применением инструментов, предлагаемых стандартами серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504 для оценки процессов СМК ВУЗа, позволил обосновать возможность и целесообразность применения методологии, предлагаемой стандартами серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 15504, для оценки рисков и возможностей процессов СМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Мирошников, В.В. Методика совместной оценки возможностей и рисков процессов системы менеджмента качества/Мирошников, Н.М. Борбаць, Г.В. Ефимов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 4 (57). – С.155-165

2) Николаенко, В.С. Модели зрелости управления проектами: критический обзор // В.С. Николаенко, Е.А. Мирошниченко, Р.Т. Грицаев // Государственное управление. Электронный вестник. – 2019. – № 73. - С. 71-111. – URL: https://www.spajournal.ru/index/index

3) Романычева, К.С. Типовые риски и возможности процесса поверки средств измерений / К.С. Романычева, Д.М. Спиридонов Д.М. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/91855/1/fti_2020_029.pdf?ysclid=ltguy2pv2e314391721 (дата обращения 01.03.2026)

4) Ткачева, А.Е. Методика управления рисками и возможностями в испытательной лаборатории / А.Е. Ткачева, А.Е. Жирнова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2021. Т. 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-upravleniya-riskami-i-vozmozhnostyami-v-ispytatelnoy-laboratorii (дата обращения 01.03.2026)

5) "Шкала зрелости" и совершенствование процессов компании. – URL: https://quality.eup.ru/DOCUM/shkala.htm (дата обращения 17.03.2026)

6) ГОСТ Р ИСО/МЭК. 15504-1-2009. Информационная технология. Оценка процесса. Ч. 1. Концепция и словарь. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

7) ГОСТ Р ИСО/МЭК. 15504-2-2009. Информационная технология. Оценка процесса. Ч. 2. Проведение оценки. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 15 с.

8) ГОСТ Р ИСО/МЭК. 15504-3-2009. Информационная технология. Оценка процесса. Часть 3. Руководство по проведению оценки. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 42 с.

9) ГОСТ Р ИСО/МЭК. 15504-4-2012. Информационная технология. Оценка процесса. Часть 4. Руководство по применению для улучшения и оценки возможностей процесса. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 32 с.

10) ГОСТ Р ИСО/МЭК. 15504-5-2016. Информационные технологии. Оценка процессов. Часть 5. Образец модели оценки процессов жизненного цикла программного обеспечения. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 158 с.

11) П ЯГТУ 05.02.02 - 2016. Положение о выполнении выпускной квалификационной работы бакалавра. - Ярославль, 2016. - 16 с.

УДК 656.2

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБЛАСТИ РЕМОНТА КОЛЕСНЫХ ПАР ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Т.А. Крюкова

Научный руководитель – **К.И. Порсев,** канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

Проводится комплексный анализ современных проблем в области ремонта колесных пар тягового подвижного состава, и кратко обозреваются перспективные пути решения выявленных проблем.

Ключевые слова: *колесная пара, тяговый подвижной состав, износ, ремонт*

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF TRACTION ROLLING STOCK WHEELSET REPAIR

T.A. Kryukova

Scientific Advisor – **K.I. Porsev**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

The article provides a comprehensive analysis of current issues in the field of traction rolling stock wheelset repair and briefly reviews promising ways to address the identified problems.

Keywords*: wheelset, traction rolling stock, wear, repair*

Железнодорожный транспорт является одной из самых крупнейших отраслей государственной промышленности, на которую приходится около 83% грузооборота и 41% пассажирооборота [5]. Четкая и бесперебойная работа подвижного состава возможна только при его технически исправном состоянии, которое является одним из важных условий полной безопасности движения поездов.

В процессе эксплуатации подвижной состав, его детали и узлы подвергаются различным воздействиям от ударных до атмосферных. Для поддержания удовлетворительного состояния подвижного состава производится его обслуживание, обеспечивающееся деятельностью специальных предприятий. В настоящее время на железнодорожном транспорте принята планово-предупредительная система ремонта. Она заключается в том, что электроподвижной состав через определенные промежутки времени или после выполнения определенного пробега подвергается ремонту.

Действующая система состоит из двух основных видов ремонта заводского и деповского (табл. 1).

Таблица 1. Действующая система ремонта локомотива [2]

Критерии	Заводской ремонт	Деповской ремонт
Объем работ	Восстановление электровозов с заменой износившихся частей и доведения их до первоначального состояния	Поддержание работоспособности электроподвижного состава в период эксплуатации его между заводскими ремонтами
Периодичность	Каждые 10-15 лет или после определенного пробега	Ежегодно или чаще, в зависимости от пробега и состояния локомотива
Цели ремонта	Полное восстановление ресурса локомотива, продление срока службы, модернизация конструкции	Поддержание работоспособности, предотвращение отказов, обеспечение безопасной эксплуатации до следующего ремонта
Результат	Локомотив как новый, с продленным сроком службы и улучшенными характеристиками	Локомотив готов к эксплуатации в штатном режиме, но без кардинального обновления

АО «Желдорреммаш» является ведущей отечественной компанией по проведению среднего и капитального ремонта тягового подвижного состава. В состав компании входят 8 локомотиворемонтных заводов, Новосибирское литейное производство и дивизионы.

Ярославский электровозоремонтный завод имени Б.П. Бещева является одним из предприятий АО «Желдорреммаш», находящимся на территории города Ярославль, проводящим ремонт локомотивов серий 2ТЭ, ТЭП70, ВЛ, ТЭМ, ЧС, ЭП1 и ЭП2К.

Одним из основных видов оборудования подвижного состава являются колесные пары. Отличительной особенностью завода является ремонт расширенной номенклатуры колесных пар в сравнении с другими филиалами АО «Желдорреммаш». Основными заказчиками на ремонт колесных пар являются ОАО «РЖД», ООО «ЛокоТех-Сервис», ООО «СТМ-Сервис» и АО «Коломенский завод».

Колесная пара – сборочная единица, служащая для реализации силы тяги, развиваемой в зоне контакта колесной пары и рельса, для восприятия силы тяжести от массы ходовой тележки и кузова и передачи ее на рельсовый путь, а также для направления движения железнодорожного подвижного состава по железнодорожному пути [1].

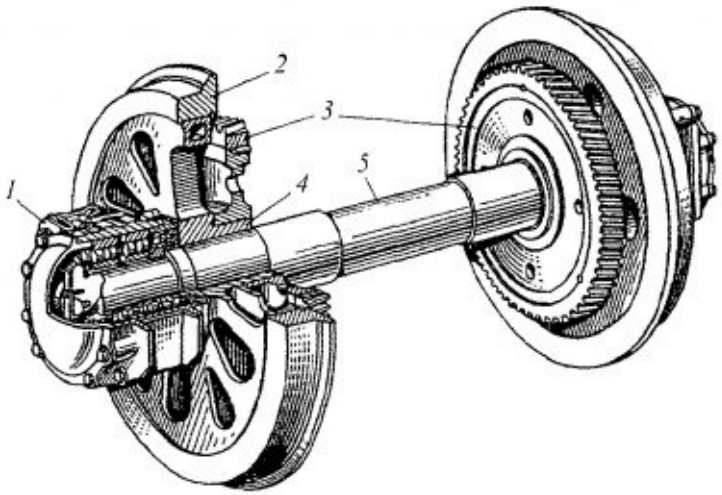


Рис. 1. Колесная пара электровоза:
1 – букса; 2 – бандаж; 3 – зубчатые колеса; 4 – колесный центр; 5 – ось

Колесные пары в эксплуатации подвергаются осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию. Для этих целей на предприятиях создают колесные цеха.

Колесный цех Ярославского ЭРЗ специализируется на ремонте колесных пар со сменой элементов (полное освидетельствование) локомотивов серий ВЛ, ЭП1, ЧС, ЭП2К, 2ТЭ, ТЭП70, ТЭМ. Также завод является единственным, кто производит ремонт локомотивов серии ЧС в/и.

Для сравнения остальные заводы-филиалы АО «Желдорремаш» производят ремонт следующих серий колесных пар локомотивов (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение серий ремонта колесных пар на филиалах АО «Желдорреммаш»

№	Завод-филиал	Серии локомотивов
1	Астраханский ТРЗ	ТЭМ2, ТЭМ3, ТЭ10
2	Воронежский ТРЗ	ТЭП70, ТЭП70БС
3	Оренбургский ОРЗ	2ТЭ, в/и, 2ТЭ25
4	Ростовский-на-Дону ЭРЗ	ВЛ в/и
5	Уссурийский ЛРЗ	2ТЭ, 2ТЭ25А, ТЭМ2, ТЭМ3
6	Улан-Удэнский ЛВРЗ	2(3)ЭС5К, ВЛ, ЭП1 в/и
7	Челябинский ЭРЗ	2ЭМ6, 2(3)ЭС5К, ВЛ

На основе комплексного анализа теоретических и эмпирических данных, собранных на Ярославском ЭРЗ, появляется возможность систематизировать и выделить основные проблемные аспекты, возникающие в процессе ремонта колесных пар:

1. Трудности дефектоскопии и диагностики:

- скрытые усталостные трещины и сложность интерпретации дефектов;

2. Технологические ограничения восстановления профиля [6]:

- недостаточность стандартной обточки, потеря ресурса при ремонте;

3. Специфичные виды износа и повреждений [3]:

- нарушение натяга, термомеханические повреждения, подрез гребня.

В качестве путей решения данных проблем, можем предложить следующее:

1. Оснащение ремонтных предприятий автоматизированными системами контроля с функцией автоматической фиксации протоколирования результатов.

2. Внедрение прогрессивных методов обработки, модернизации оборудования и оптимизации технологических процессов.

3. Использование современных методов восстановления, таких как лазерная наплавка, плазменное напыление и т.д., и усиление контроля качества материалов и комплектующих, использованных при ремонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ Р 34056-2017. Транспорт железнодорожный. Состав подвижной. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 27 с.

2) ОАО «РЖД». Распоряжение от 30.12.2016 № 2796р (ред. от 10.10.2024) «О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО „РЖД“» (вместе с Положением). – М., 2016.

3) Файзибаев, Ш.С. Уменьшение износа поверхности катания бандажных колесных пар подвижного состава / Ш.С. Файзибаев, Р.П. Нигай, И.Ю. Соболева // Молодой ученый. – 2022. – № 6 (401). – С. 32-35.

4) Цихалевский, И.С. Оптимизация процесса ремонта колесных пар локомотивов со сменой элементов в условиях депо / И.С. Цихалевский, Д.Л. Худояров // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2007. – № 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-protsessa-remonta-kolesnyh-par-lokomotivov-so-smenoy-elementov-v-usloviyah-depo (дата обращения: 08.04.2026)

5) Чечнев, Ю.Н. Финансы железнодорожного транспорта в условиях его реформирования: дис. … канд. экон. наук: 08.00.10 – Финансы, денежное обращение и кредит / Ю.Н. Чечнев. – Саратов, 2004. - 188 с.

6) Шэнь, Ц. Исследование неразрушающего контроля осей колесных пар подвижного состава на основе модели / Ц. Шэнь, А.Е. Цаплин // БРНИ. – 2026. – Вып.1. – С. 67-80. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nerazrushayuschego-kontrolya-osey-kolesnyh-par-podvizhnogo-sostava-na-osnove-modeli (дата обращения: 08.04.2026).

УДК 004:651

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

К.С. Леон

Научный руководитель - **К.И. Порсев**, канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

В статье рассмотрена конструкторско-технологическая подготовка многономенклатурного мелкосерийного производства. На базе методологии IDEF0 разработана функциональная модель процесса конструкторско-технологической подготовки производства с учётом использования цифровых систем. Выявлены направления оптимизации и предложены мероприятия, апробированные на примере реального изделия, что позволило сократить сроки подготовки и повысить качество данных.

Ключевые слова: *информационные технологии,PLM, конструкторско-технологическая подготовка производства, цифровое производство, IDEF0*

FUNCTIONAL MODEL OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTION

K.S. Leon

Scientific Supervisor – **K.I. Porsev**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

The article examines the engineering and technological preparation of a multi-item, small-batch manufacturing environment. Based on the IDEF0 methodology, a functional model of the production engineering and technological preparation process is developed, taking into account the use of digital systems. Optimization directions are identified and measures are proposed and tested on a real product, which made it possible to reduce preparation time and improve data quality.

Keywords: *information technology, PLM, design and technological preparation of production, digital production, IDEF0*

Конструкторско-технологическая подготовка производств в условиях многономенклатурного машиностроения имеет решающее влияние на срок вывода продукции на рынок, себестоимость и качество выпускаемой продукции [1, 2]. В условиях мелкосерийного производства предприятия сталкиваются с частой сменой номенклатуры, с большим количеством единичных и малых заказов, а также необходимостью оперативного внесения изменений в конструкторскую и технологическую документацию [3]. При этом конструкторско-технологическая подготовка часто организована разрозненно: конструкторские и технологические подразделения работают в разрозненных информационных системах, данные и процессы согласования дублируются. В результате возрастает длительность подготовки производства, увеличивается количество ошибок и доработок [4, 5].

Цель данного исследования заключается в разработке и анализе функциональной модели конструкторско-технологической подготовки производства в нотации IDEF0 на примере существующих процессов на АО «Пролетарская свобода». Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: раскрыть сущность и структуру конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства на примере изделия АПШ 01.000 «Комплект штампа», выявить и проанализировать узкие места и проблемные зоны и разработать предложения по их оптимизации.

Эффективный процесс конструкторско-технологической подготовки производства должен минимизировать сроки подготовки, снижать количество ошибок и доработок в результате ошибок, обеспечивать единое информационное пространство и регламентированный обмен данными между подразделениями [6]. Для анализа данных процессов целесообразно использовать методологию функционального моделирования IDEF0, ориентированную на представление системы в виде иерархии функции, связанных входами, выходами, управляющими воздействиями и механизмами. Использование методологии IDEF0 позволяет выявить дублирование операций и информационных потоков, избыточные согласования и разрывы во взаимодействии между службами, участвующими в процессе конструкторско-технологической подготовки производства [7].

Рис. 1. Контекстная диаграмма A0

Анализ производился на предприятие АО «Пролетарская свобода», которое представляет собой многономенклатурное мелкосерийное производство, ориентированное на изготовление широкого спектра изделий малыми партиями и по индивидуальным заказам. Для такого типа производства характерно частое изменение в конструкторской и технологической документации, параллельное ведение большого количества проектов, а также высокая нагрузка на службы участвующие в конструкторско-технологической подготовке производства, вынужденные быстро адаптировать типовые решения к конкретным требованиям заказчика. Контекстная диаграмма A0 (рис. 1) в нотации IDEF0 описывает основную функцию «Разработка конструкторской и технологической документации для производства партии изделия». Входами данной функции являются технические задания заказчика, документация для базовых конструкции, ограничения по срокам, материалам, оборудованию и стоимости. Управляющими воздействиями выступают государственные и отраслевые стандарты (ЕСКД, ЕСТД и ЕСТД), стандарты предприятия, требованию по качеству, технологичности и взаимозаменяемости, план график освоения изделия. Механизмы включают цифровые системы, оборудование и персонал. Выходами контекстной функции являются утверждённые комплекты конструкторской и технологической документации, комплект оснастки, инструмента и средств контроля, а также решение о запуске партии изделия.

Декомпозиция функции A0 (рис. 2) позволяет представить КТПП как совокупность взаимосвязанных подсистем, каждая из которых отвечает за свой этап преобразования исходных данных в готовый комплект документов и производственных заданий. В рамках данной работы на уровне A0 выделены следующие укрупнённые шесть подсистем: анализ заказа и исходных данных, разработка и корректировка конструкторской документации,

разработка технологической документации, проектирование оснастки и методов контроля, нормирование и подготовка ресурсов, согласование и принятие решения о запуске партии изделий. Такое представление позволяет увязать процессы предприятия АО «Пролетарская свобода» с конкретными информационными системами предприятия и оценить, насколько последовательно и непрерывно организован поток данных от заявки заказчика до фактического запуска изделия в производство.

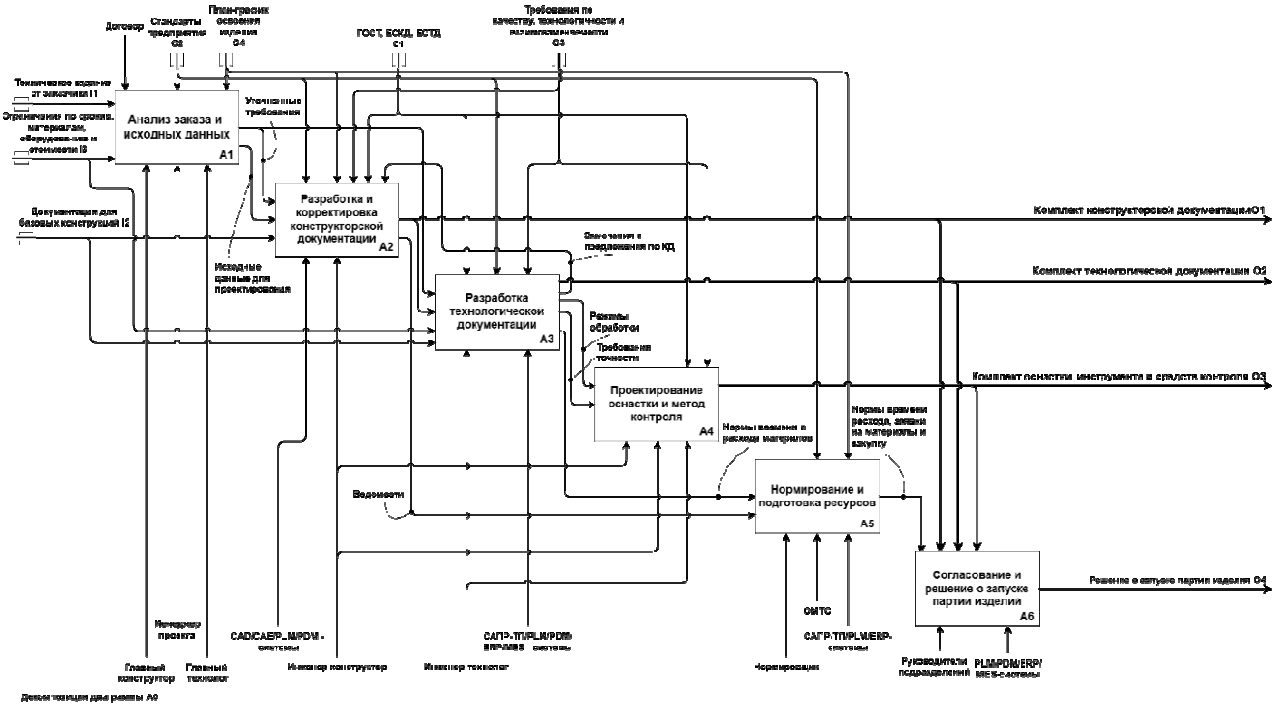


Рис. 2. Декомпозиция функции A0

Анализ полученной модели показал, что ряд ключевых управленческих и информационных решений, определяющих эффективность КТПП, связан с тем, на каком этапе и в какой среде фиксируются действия исполнителей. Так, в подсистеме, соответствующей анализу заказа и исходных данных, было установлено, что обработка заявки ведётся в разнородных и не связанных системах, что затрудняет прослеживаемость и воспроизводимость принятых решений. В связи с этим было сформулировано требование централизовать регистрацию заявки и все последующие действия по её уточнению и согласованию в среде PLM-системы – ЛОЦМАН: PLM. Такое изменение, будучи отражённым на уровне A0 как уточнение механизма и управляющих воздействий для соответствующей подсистемы, обеспечивает единый «вход» процесса и прозрачность статуса каждого заказа в рамках конструкторско-технологической подготовки производства.

Для подсистемы разработки технологической документации анализ потоков данных и механизмов показал, что формирование маршрута изготовления изделия в ERP-системе зачастую выполняется обособленно от фактических ограничений производственных мощностей и актуальных данных о загрузке. Чтобы устранить этот разрыв, на уровне модели сформулировано требование использовать ERP-систему уже на этапе выбора маршрута изготовления, а не только при последующем планировании и формировании производственной программы. Это отражается через усиление роли ERP-системы в качестве механизма и управляющего воздействия для подсистемы технологической подготовки, что позволяет увязать формирование технологических маршрутов с реальной структурой цехов и доступностью оборудования.

Подсистема проектирования оснастки, входящая в декомпозицию A0 и тесно связанная с технологической подготовкой, также продемонстрировала необходимость более

тесной интеграции с оперативным уровнем управления производством. В исходной организации процесса подготовка к изготовлению и закупке оснастки выполнялась в основном на основе локальных таблиц и документных согласований, что приводило к задержкам и несогласованности сроков. В качестве меры оптимизации было предложено использовать MES-систему на этапе подготовки к изготовлению и закупке оснастки. Такое решение обеспечивает взаимосвязь проектируемой оснастки с конкретными заказами и производственными партиями, что сокращает риск задержек при запуске из-за её отсутствия.

При анализе функциональной модели особое внимание было уделено подсистеме, отвечающей за согласование и принятие решения о запуске партии изделий. Ранее процесс согласования включал несколько последовательных стадий, часть которых повторяла друг друга или ранее выполненные процедуры, что увеличивало общие сроки конструкторско-технологической подготовки производства без добавления значимой ценности. По итогам анализа предложено сократить данный процесс до двух основных этапов: утверждение комплекта документации и передачи в производство с одновременной организацией сопровождения запуска. Такое упрощение структуры согласования уменьшает количество внутренних переходов документов между подразделениями и ускоряет принятие решения о запуске в производство.

Построенная и уточнённая с учётом предложенных изменений функциональная модель процесса конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства была разработана и проанализирована на примере реально функционирующих процессов АО «Пролетарская свобода». Привязка модели к конкретному предприятию позволила не ограничиваться абстрактным описанием КТПП, а отразить особенности многономенклатурного мелкосерийного производства, структуры подразделений и используемого программного обеспечения. На уровне декомпозиции A0 удалось согласовать представление основных подсистем КТПП с фактическими маршрутами движения документации и данных между конструкторскими, технологическими, плановыми и снабженческими службами, а также с ролями PLM/ERP/MES-систем в поддержке этих процессов.

Предложенные мероприятия по оптимизации, сформулированные на основе анализа модели, были проверены на конкретном примере КТПП для изделия АПШ 02.000 «Комплект штампа». Для данной номенклатуры были реализованы изменения, связанные со стандартизацией форматов документов, упрощением схем согласования, автоматизацией передачи данных между PLM, ERP и MES, а также ужесточением контроля входной информации на стадии регистрации и анализа заказа. Проведенная практическая апробация показала, что внедрения комплекса мероприятий, разработанных на основе построенной функциональной модели, позволило сократить время согласования документации на 30%, ускорить запуск изделий в производство на 20%, снизить затраты на время, затрачиваемое на формирование ведомостей потребностей в материалах на 40% и уменьшить количество ошибок при формировании этих потребностей на 50%.

Применение методологии функционального моделирования IDEF0 для анализа конструкторско-технологической подготовки производства позволило не только наглядно представить и систематизировать процесс подготовки производства в АО «Пролетарская свобода», но и обосновать ряд изменений, существенно повысив скорость, прозрачность и качество выполненных работ. Достигнутые результаты свидетельствуют о практической ценности методологии IDEF0 для реинжиниринга аналогичных процессов на машиностроительных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Леон, К.С. Анализ современного состояния в области управления качеством конструкторско-технологической подготовки цифровых производств / К.С. Леон, К.И. Порсев // Омский научный вестник. – 2025. – № 2(194). – С. 49-54.

2) Скоробогатов, А.С. Моделирование ИТ-архитектуры системы конструкторско-технологической подготовки производства на предприятиях машиностроения / А.С. Скоробогатов, В.В. Кобзев // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – № 4-1. – С. 119-126.

3) Колупаева, В.А. Организация конструкторско-технологической подготовки многономенклатурного производства // Юность и знания - гарантия успеха - 2023: Сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 19–20 сентября 2023 года. Том 2. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2023. – С. 379-383.

4) Пономаренко, М.В. Автоматизированные системы управления производством в разрезе управления жизненным циклом изделия // XII Конгресс молодых ученых: сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 03–06 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2023. – С. 151-155.

5) Игонин, В.А. Конструкторско-технологическая подготовка производства: от CAD до ERP // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 9. – С. 16-19.

6) Климова, Т.Ю. Автоматизация конструкторской технологической подготовки производства на основе диаграмм визуального моделирования / Т.Ю. Климова, В.А. Тарасов, В.А. Хаймович // Вестник Международного института рынка. – 2023. – № 2. – С. 156-162.

7) Лапина, М.А. Исследование функционального моделирования бизнес-процессов на основе нотаций IDEF0 и eepc / М.А. Лапина, Н.В. Ржевская, А.С. Медведева // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2023. – № 3(89). – С. 65-75.

УДК 004.925.83

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ СПЕЦИАЛЬНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА

Д.В. Мельничук

Научный руководитель – **А.В. Оборин,** канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Приводится информация об актуальных методах, применяемых в рамках обратного инжиниринга, а также о конкретном применении в целях разработки конструкторской документации на готовый инструмент и разработку аналогов такового.

***Ключевые слова**: обратный инжиниринг, реинжиниринг, 3D-сканирование, режущий инструмент, спектрометрия, рентгенография, координатно-измерительные машины (КИМ)*

INVESTIGATION OF THE GEOMETRY OF A SPECIAL CUTTING TOOL USING REVERSE ENGINEERING METHODS

D.V. Melnichuk

Scientific Supervisor - **A.V. Oborin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This article provides information about the current methods used in reverse engineering, as well as their specific application for developing design documentation for a ready-made tool and developing its analogues.

***Keywords**: reverse engineering, reengineering, 3D scanning, cutting tool, spectrometry, X-ray, coordinate measuring machines (CMMs)*

Одной из важнейших отраслей машиностроения является производство режущего инструмента, так как обработка материалов резанием занимает не менее 70% от общего числа технологических процессов производства деталей машин. Помимо всего прочего от качества изготовления металлорежущего инструмента как части системы СПИЗ (Станок-Приспособление-Инструмент-Заготовка) непосредственно зависит и качество изготовляемой продукции. Поэтому экономические санкции, не позволяющие вовремя производить замену, ремонт и модификацию зарубежного инструмента, серьезно тормозят развитие отечественного машиностроения. Поэтому в последние годы в стране заметен явный рост спроса на импортозамещение различной продукции машиностроительного производства.

Реинжиниринг, или обратный инжиниринг – это метод, позволяющий воспроизводить недоступную или утерянную конструкторскую документацию на готовый режущий инструмент с помощью различных методов. Реверс-инжиниринг можно понимать как обратный подход к решению проблемы, при котором, зная конечный результат, методом дедукции находятся исходные данные и путь решения проблемы [1]. Также ГОСТ Р 57306-2016 [2], определяет, что реинжиниринг – это, оптимизация хозяйственной системы, с целью использования более эффективных технологий с целью ликвидации закомплексованности в бизнесе. Основными задачами в рамках данной деятельности, касательно машиностроения, являются:

1) Определение геометрических параметров изделия с помощью как ручного измерительного инструмента в случае простых форм, так и координатно-измерительных машин (КИМ) в случае невозможности ручных измерений или их недостаточной точности;

2) Определение материала изделия с помощью современных методов рентгенофлуоресцентного анализа и спектрометрии, а также других методов неразрушающего контроля.

3) Получение трехмерной модели изделия с помощью 3D-сканеров различного типа как стационарных, так и ручных.

4) Обработка сканов моделей и преобразование облака точек в полигональные модели и полноценные модели для CAD-систем.

5) Оценить точность полученных геометрических данных

Целью работы было применение методов обратного инжиниринга для получения конструкторской документации на специнструмент. С предприятия АО «Газпром Трубинвест» (Волгореченский трубный завод) была получена заявка на модернизацию режущего инструмента (Расточного блока) с целью повышения производительности. В ходе работы было выявлено отсутствие конструкторской документации на инструмент за исключением эскиза инструмента в сборе (рис. 1). В виду отсутствия полноценной документации необходимо уточнить геометрические параметры, в частности, расположение режущих пластин, задаваемое линейными и угловыми параметрами, расположение каналов подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), а также отверстия элементов крепления.

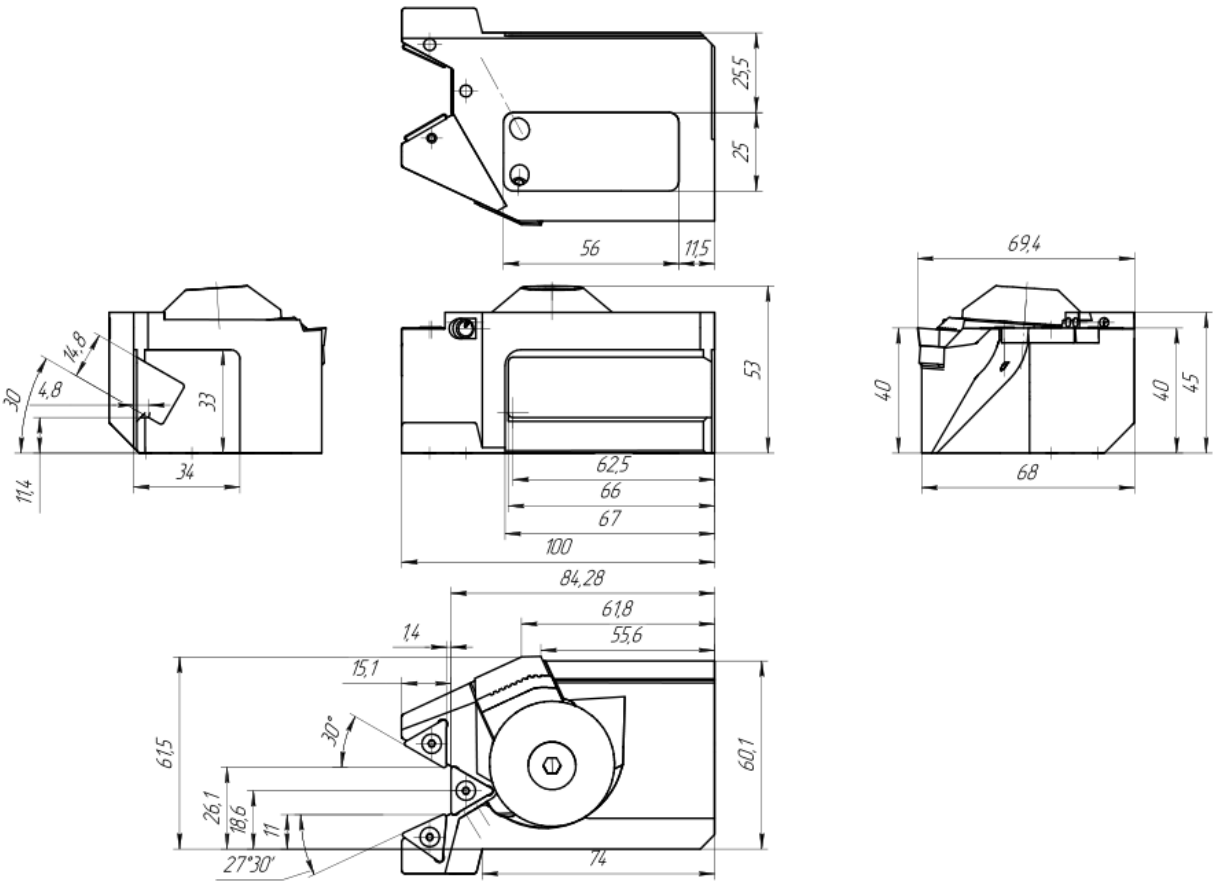


Рис. 1. Эскиз инструмента в сборе

Данный режущий инструмент предназначен для выполнения двух последовательных переходов, продольное точение с помощью боковой пластины неправильной формы и последующее фасонное точение с помощью системы треугольных пластин.

Для определения параметров необходимо воспользоваться либо универсальным измерительным инструментом, либо КИМ. Однако измерение с помощью универсального инструмента затруднено ввиду конструктивных особенностей, а КИМ отсутствует в наличии организации. Поэтому принято решение провести измерение параметров с помощью 3D-сканирования.

Первым этапом был проведен визуальный осмотр инструмента и последующее 3D-сканирование с помощью сканера CrealityCr-scanraptor [3] (рис. 2).

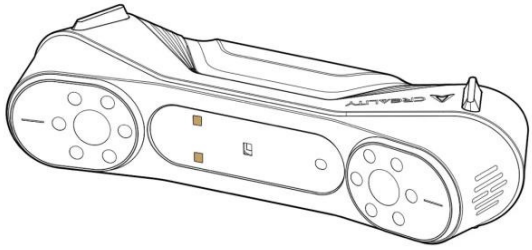


Рис. 2. Внешний вид ручного 3D-сканера

Данный сканер позволяет получать точность при сканировании до 0,02 мм на 100 мм, что вполне удовлетворит нашим требованиям. Сканирование производится в первую очередь для определения углового положения пластин и центров отверстий для подвода смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и крепежа.

Сканирование проводится несколько раз с целью получения изображений инструмента с разных сторон. Далее полученные изображения обрабатываются в специальном программном обеспечении Geomagic Design X (рис. 3).

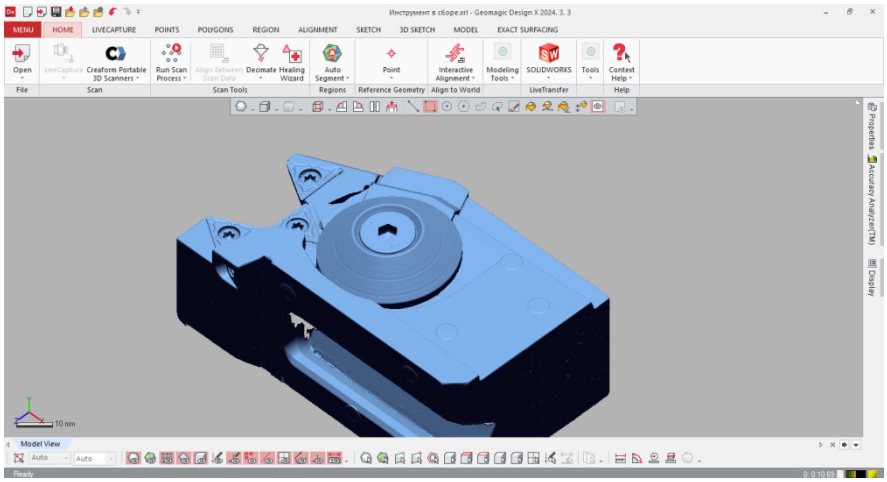


Рис. 3. Полигональная модель, полученная обработкой облака точек

Вначале были определены углы в плане треугольных пластин (рис. 4). Для этого используется функция эскиз по сетке. При этом в качестве плоскости для построения эскиза выберем основную плоскость инструмента, для определения сетки выберем диапазон в 1 мм, а также смещение до плоскости режущих кромок.

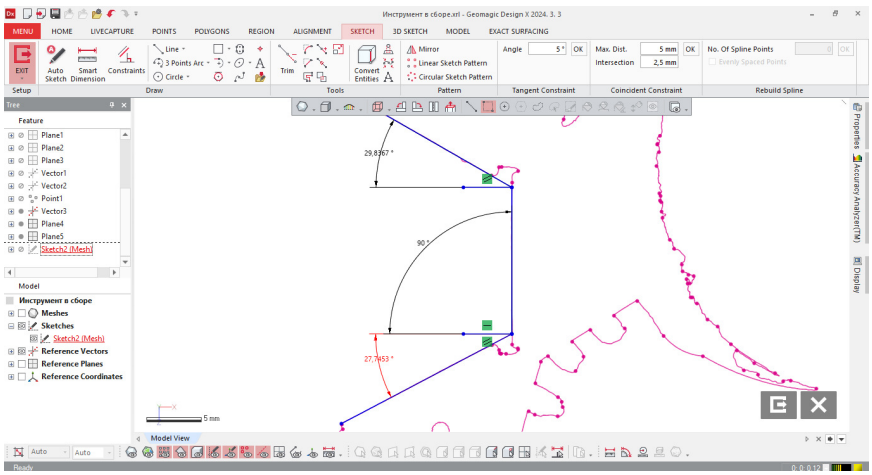


Рис. 4. Измерение углов в плане

В ходе измерений определены углы в плане для треугольных пластин: 27,7°, 90° и 29,8°, что расходится с данными эскиза в среднем на 0,2°.

Так как известно, что пластины одинаковые, однако обнаружено что пластина, работающая внутри трубы, дополнительно наклонена таким образом, что значение ее заднего угла увеличено до 11° (рис. 5).

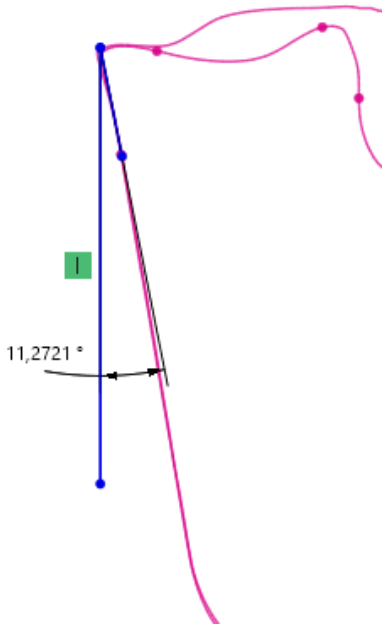


Рис. 5. Задний угол внутренней треугольной пластины

Далее необходимо определить положение крепежных отверстий и отверстий каналов СОЖ. Для этого воспользуемся отдельным сканом корпуса специнструмента (рис. 6).

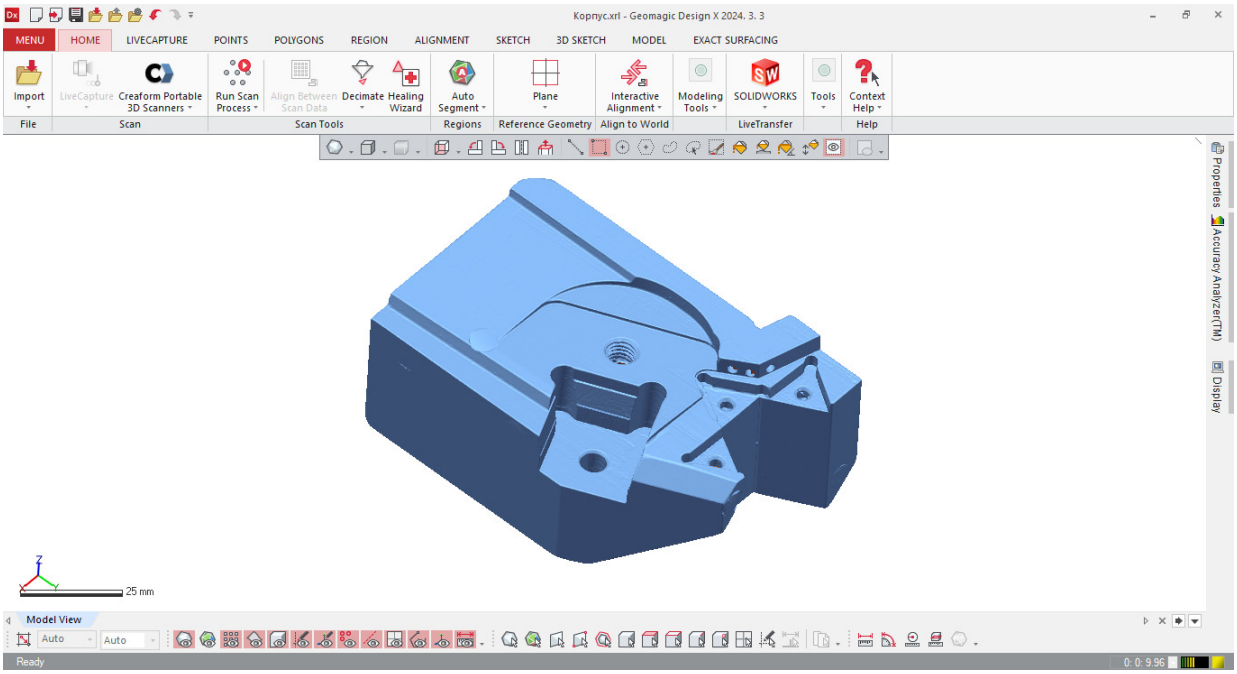


Рис. 6. Скан корпуса

В первую очередь проводится разбиение модели на поверхности для удобства работы (рис. 7).

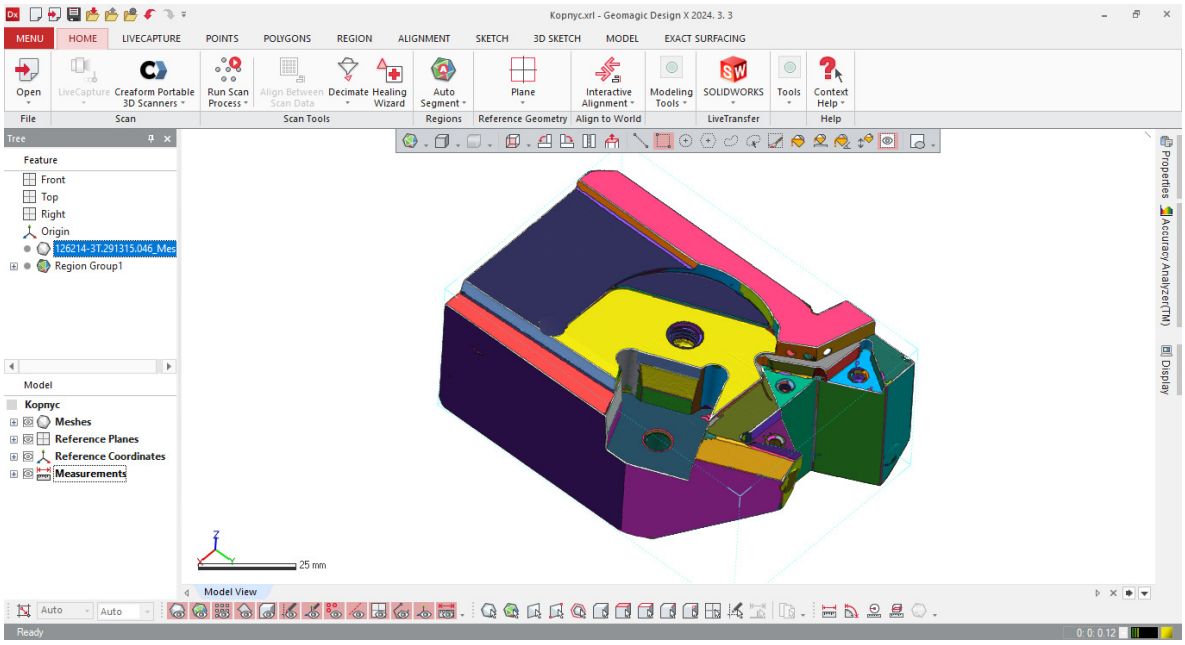


Рис. 7. Разбиение на поверхности

Далее создадим эскиз по сетке для определения расположения отверстия крепления и подачи СОЖ для проходной пластины. Эскиз будем создавать параллельно основной плоскости. При этом смещение плоскости для построения эскиза определим в 35 мм, диапазон зададим в 25 мм, в результате чего выделится область, в которой определяется геометрия сетки (рис. 8).

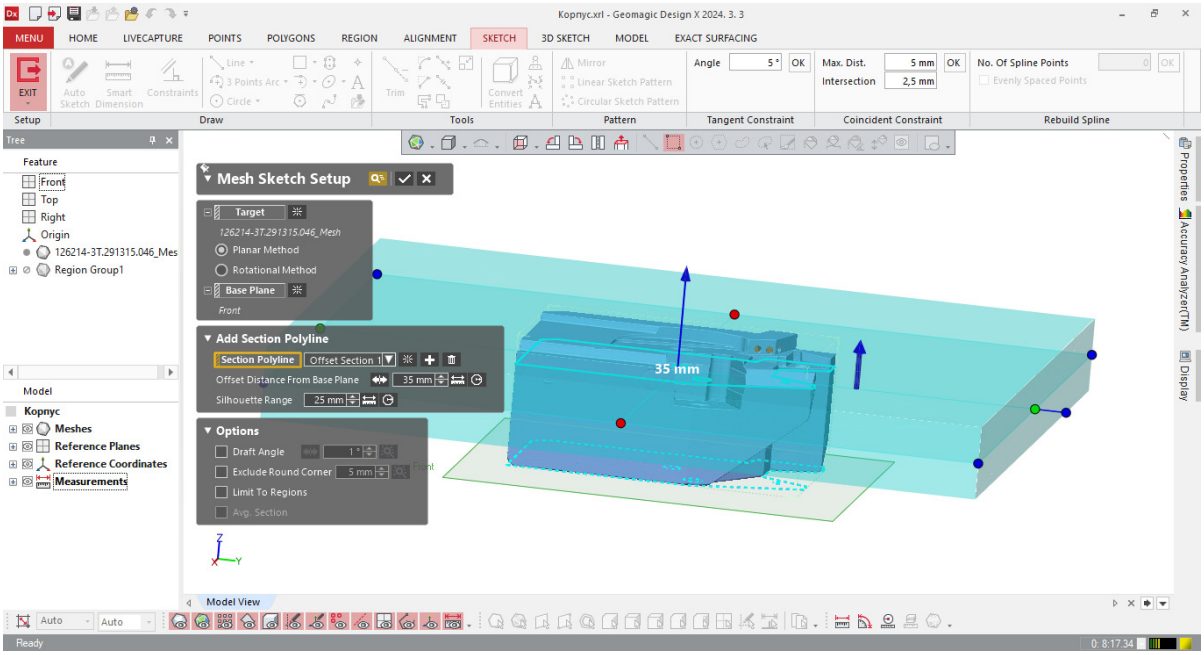


Рис. 8. Построение эскиза в основной плоскости

В полученном эскизе построим точки в центрах отверстий и определим их положение относительно начала координат (рис. 9).

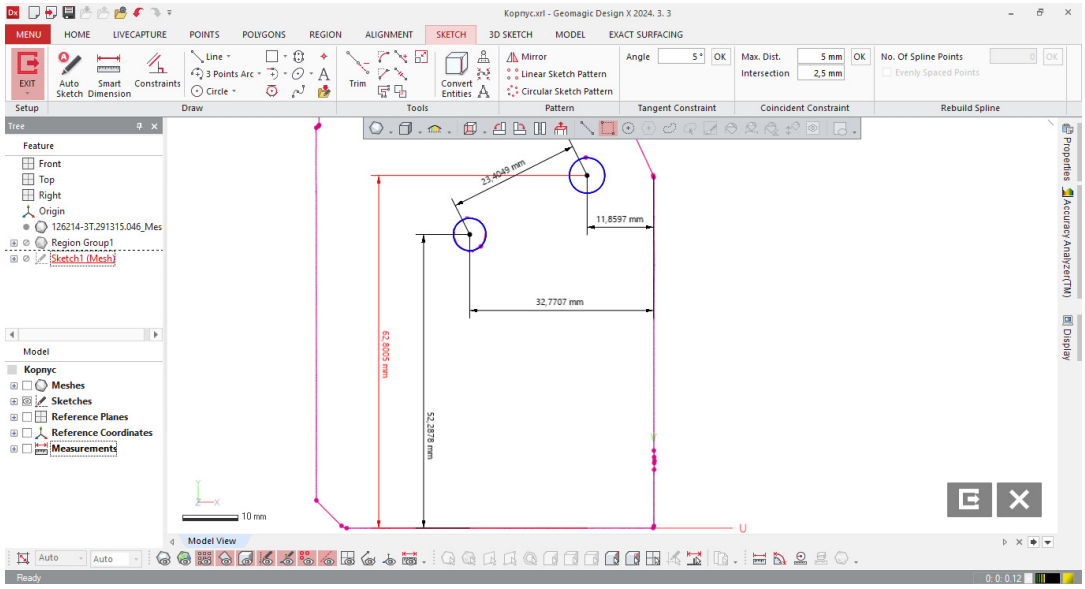


Рис. 9. Эскиз для определения положения отверстий

Таким образом определено положение отверстий для проходной пластины. Отверстия имеют межцентровое расстояние 23,4 мм, также получены размеры для крепежного отверстия 52,3 и 32,8 мм, и для отверстия подачи СОЖ и позиционирования пластин 62,8 и 11,9 мм.

Далее определим положение отверстий подачи СОЖ для треугольных пластин. Для этого воспользуемся ранее совершенным разбиением на поверхности. Выберем одну из поверхностей, где располагаются сразу два отверстия, и рассмотрим его расположение. Аналогично предыдущему случаю создадим эскиз с диапазоном в 1 мм (рис. 10).

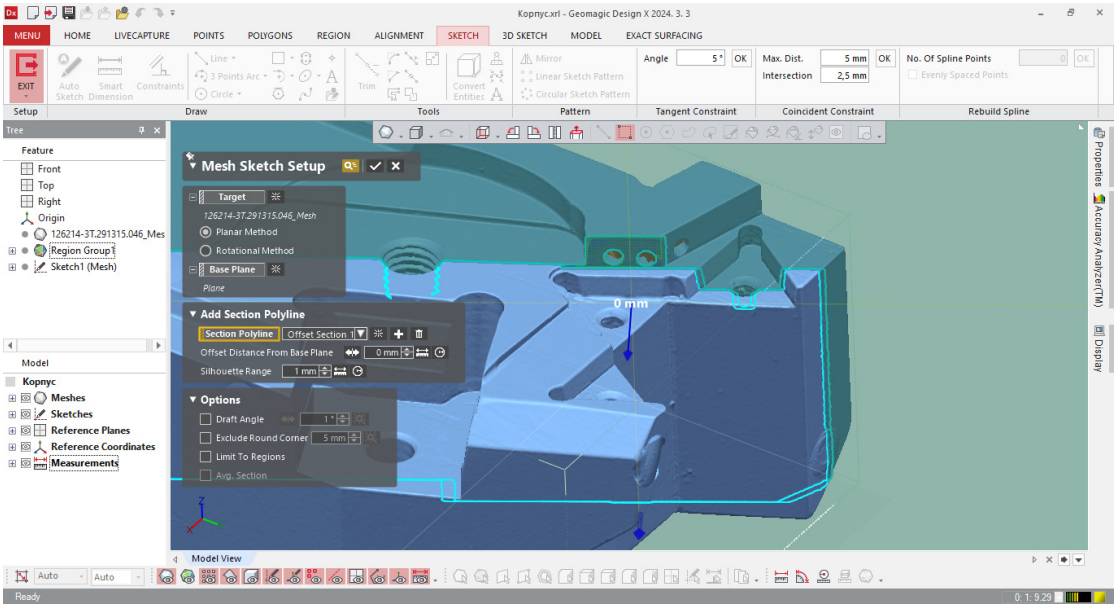


Рис. 10. Создание эскиза каналов СОЖ

Далее на эскизе определим положение центров отверстий относительно боковой и верхней грани поверхности. Получим следующие значения: 7,1 и 3,1мм для первого и 2,7 и 3,7 мм для второго. В виду небольших значений отклонениями пренебрежем, но уточним размеры до 0,1 мм (рис. 11). Аналогично определим положение отверстия канала СОЖ на другой грани и получим размеры 4,2 и 3,7 мм.

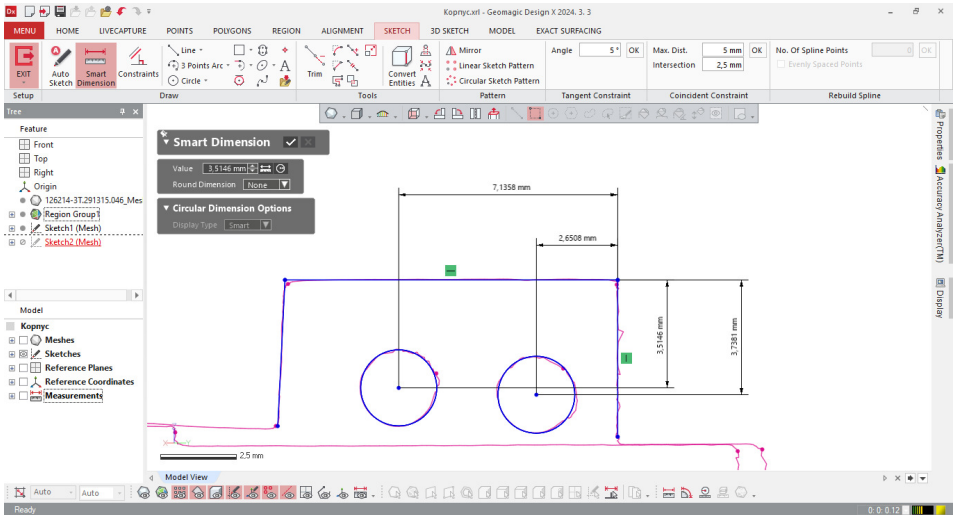


Рис. 11. Определение положения каналов СОЖ

На основе полученных измерений восстанавливается 3D-модель собранного режущего инструмента в системе автоматизированного проектирования (CAD) SOLIDWORKS (рис. 12).

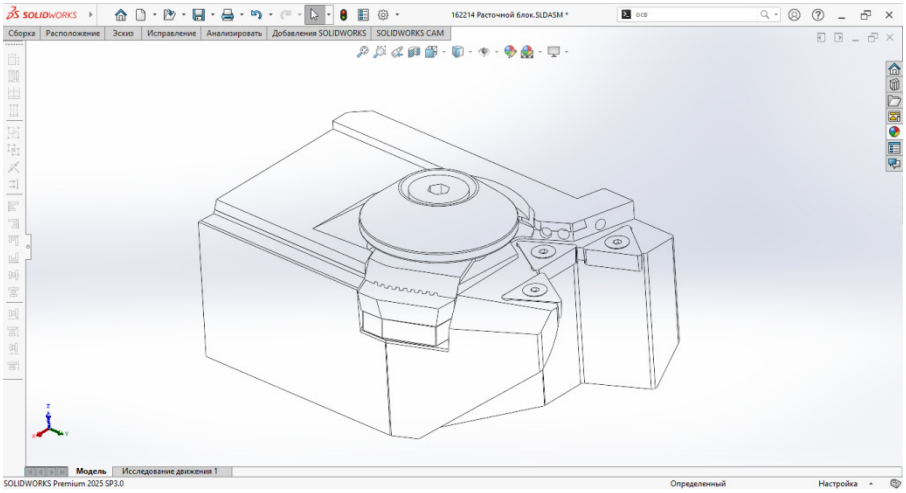


Рис. 12. Полученная 3D-модель сборного инструмента

В ходе работы была решена проблема определения геометрических параметров сменных многогранных пластин, с применением такого метода обратного инжиниринга как 3D-сканирование и работа с облаком точек. Данные, полученные в ходе работы, будут применены для построения 3D-модели и чертежа специнструмента. Например, межцентровое отверстие для проходной пластины равное $23{,}5h14$ мм. Также размеры отверстий для подачи СОЖ на треугольные пластины берутся с допусками по 14 квалитету: $7{,}1 \pm 0{,}18$ мм и $3{,}1 \pm 0{,}15$ мм, $2{,}7 \pm 0{,}13$ мм, $3{,}7 \pm 0{,}15$ мм, $4{,}2 \pm 0{,}15$ мм, $3{,}7 \pm 0{,}15$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Messler, R.W. Reverse Engineering: Mechanisms, Structures, Systems and Materials. – Бока-Ратон: CRC Press, 2014. – xvii, 547 p.

2) All Products. 3D Scanner. CR-Scan Raptor // Creality: [site]. – URL: https://www.creality.com/products/creality-cr-scan-raptor (дата обращения: 02.03.2026).

3) ГОСТ Р 57306-2016. Инжиниринг. Терминология и основные понятия в области нжиниринга. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 15 с.

УДК 621.9.02

МОДУЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАЛАДКИ В ЦИФРОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ. МОДУЛИ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Д.Н. Мизгирев

Научный руководитель - **К.И. Порсев**, канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

В статье представлен системный анализ современного состояния и тенденций развития модульных инструментальных наладок (МИН) как ключевого элемента комплексных модульных технологий в цифровом машиностроении. Особое внимание уделено анализу модулей для комбинированной обработки — наиболее наукоемкому классу МИН, обеспечивающему совмещение разнородных операций резания в едином технологическом переходе. Рассмотрена интеграция МИН в цифровое производство в контексте Индустрии 5.0. Цель исследования заключается в систематизации результатов обзора конструкций сборных инструментальных наладок и выявление корреляции между конструктивными параметрами модульных соединений и динамическими характеристиками технологической системы в целом.

Ключевые слова: *Модульные инструментальные наладки (МИН), комплексные модульные технологии, цифровое машиностроение, модули для комбинированной обработки, узлы соединений модулей, индустрия 5.0 / цифровое производство, сборные инструментальные системы, автоматизация инструментального обеспечения.*

MODULAR INSTRUMENTAL SETUP IN DIGITAL MACHINE BUILDING. MODULES FOR COMBINED PROCESSING

D.N. Mizgirev

Scientific Supervisor – **K.I. Porsev**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

The article presents a systematic analysis of the current state and development trends of modular tool assemblies (MTA) as a key element of integrated modular technologies in digital mechanical engineering. Special attention is paid to the analysis of modules for combined machining – the most knowledge-intensive class of MTA, which enables the combination of heterogeneous cutting operations in a single technological transition. The integration of MTA into digital manufacturing in the context of Industry 5.0 is considered. The aim of the study is to systematize the results of a review of assembled tooling structures and to identify the correlation between the design parameters of modular joints and the dynamic characteristics of the technological system as a whole.

Keywords*: Modular tool assemblies (MTA), integrated modular technologies, digital mechanical engineering, modules for combined machining, modular joint units, Industry 5.0 / digital manufacturing, assembled tool systems, automation of tooling support*

Трансформация современного машиностроительного производства в направлении цифровизации и автоматизации предъявляет принципиально новые требования к инструментальному обеспечению технологических процессов. Традиционные монолитные инструментальные системы, характеризующиеся высокой материалоемкостью, низкой универсальностью и значительными эксплуатационными расходами, перестают отвечать требованиям многономенклатурного производства [9, 10]. В ответ на эти вызовы сформировалась концепция модульных инструментальных наладок (МИН) — сборных конструкций, компонуемых из унифицированных, стандартизированных и взаимозаменяемых элементов, позволяющих собирать инструментальную наладку для решения конкретной технологической задачи по типу конструктора [1].

Модульная технология в целом представляет собой важный этап эволюционного развития единичной, типовой и групповой технологий, аккумулируя их преимущества [1]. В соответствии с Программой фундаментальных научных исследований на период 2021–2030 годов, утвержденной Правительством Российской Федерации, в разделе «Машиностроение» предусмотрена разработка научных основ специализации машиностроительного производства с использованием принципов модульной технологии [9]. Целью этих исследований является повышение эффективности производства, в том числе создание научно-технического задела, реализуемого в сфере оборонно-промышленного комплекса [10].

Основа модульной технологии

В настоящее время разработаны научные основы модульной технологии, включающие: классификацию видов модулей поверхностей; представление детали совокупностью модулей поверхностей; статистический анализ модулей поверхностей деталей различных машиностроительных изделий; описание конструкции детали в модульном исполнении; метод анализа конструкций изделий на модульном уровне, доказывающий возможность представления любой детали совокупностью модулей поверхностей в соответствии с указанной классификацией [1, 9].

На этой научной основе могут быть созданы модули средств технологического обеспечения изготовления деталей, к которым в первую очередь относятся МИН [13]. Среди главных направлений исследований в области МИН выделяются: разработка фундаментальных основ создания МИН под изготовление модулей поверхностей деталей; разработка интеллектуальных программно-аппаратных комплексов проектирования МИН для модульных технологических процессов; создание САПР МИН; формирование цифровой базы данных инструментального обеспечения [10, 15].

Классификация МИН

По структурно-функциональному признаку все существующие системы МИН включают пять основных типов модулей:

1. Резцовые вставки
2. Узлы соединений модулей в сборках МИН
3. Модули для комбинированной обработки
4. Модули осевой регулировки
5. Переходники

Ключевой особенностью, определяющей эффективность МИН, является унификация используемых технических решений. Производители режущего инструмента могли бы изготавливать его с узлами закрепления, унифицированными с модулями МИН, что позволило бы повысить интенсивность эксплуатации технологических систем за счет упрощения наладки оборудования и его обслуживания в автоматизированном режиме, а также снизить затраты на изготовление специальных модулей.

Подход к созданию инновационных конструкций МИН определяется рядом особенностей по сравнению с традиционными видами расточного инструмента:

- Близость собственных частот сборок МИН к собственным частотам элементов упругой системы станка.
- Полиморфность структуры МИН, представляющих собой последовательность нескольких механически соединенных модулей.
- Разнообразие структурно-компоновочных решений сборок МИН, создаваемых из набора модулей по типу универсальных сборно-разборных конструкций.

Узлы соединений модулей и контактная жесткость

Выбор типа соединения модулей является критическим фактором, определяющим эксплуатационные характеристики МИН, и должен основываться на объективных данных о жесткости и удобстве обслуживания [3, 5, 18].

1. Традиционные резьбовые соединения (рис. 1)

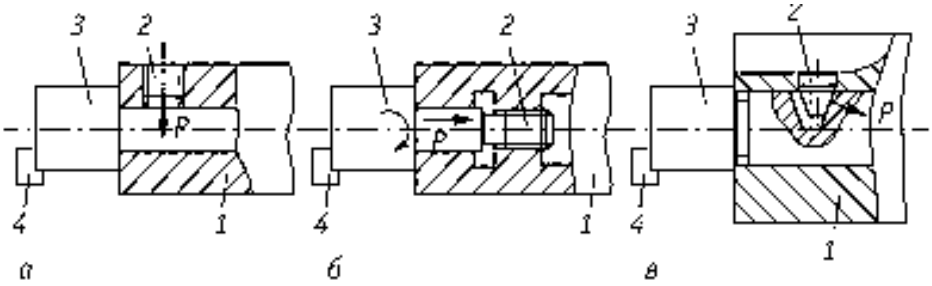


Рис. 1. Типы цилиндрических соединений модулей:
а – с односторонним прижимом винтом; *б* – с осевой затяжкой;
в – со смещенным крепежным винтом сбоку

Конструкция резьбового соединения модулей включает цилиндрические участки хвостовиков диаметром D и длиной L, служащие для направления и центрирования, а также резьбовые участки диаметром d_1 и длиной l_1 — для создания осевой силы P_o стягивания модулей по торцам. В кольцевых стыках рекомендуется обеспечивать давление Pст не менее 20 кг/см² (2 МПа), которое гарантирует нераскрытие стыка при внешней нагрузке [9].

2. Альтернативные конструкции соединений

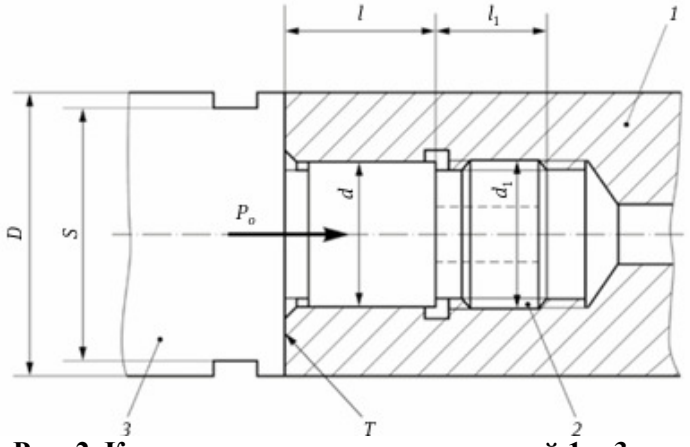


Рис. 2. Конструкция соединения модулей 1 и 3:
2 – хвостовик модуля 3; T – торцы соединяемых модулей;
S – размер лыски под ключ, мм; P_o – осевая сила затяжки, Н

Экспериментальные исследования, показали, что для установки модулей сборного расточного инструмента целесообразно использовать конструкцию соединения с радиальными смещенными крепежными винтами. Сравнительный анализ двух видов соединений отдельных модулей — свинчивания по осевой резьбе и применения эксцентрикового механизма — показал, что традиционное свинчивание по осевой резьбе имеет ряд существенных недостатков. На основании проведенных исследований рекомендовано использовать для соединения модулей МИН радиально и эксцентрично установленные винты (рис. 2).

Модули для комбинированной обработки

Модули для комбинированной обработки представляют собой функционально завершенный класс МИН, выделенный в структурно-функциональной классификации наряду с резцовыми вставками, узлами соединений, модулями осевой регулировки и переходниками. Их ключевая особенность — способность совмещать в одной конструкции несколько различных видов обработки, что позволяет выполнять за один установ или за один проход операции, традиционно требующие смены инструмента или нескольких проходов [2, 4].

Модули конструктивно характеризуются повышенной сложностью по сравнению с другими типами модулей. Их конструктивные особенности включают:

- сложную геометрию несущей части корпуса, адаптированную для размещения нескольких режущих элементов;

- интегрированные системы подвода СОЖ с внутренними каналами для подвода смазочно-охлаждающей жидкости непосредственно в зону резания при совмещенных операциях;

- специализированные узлы соединения, обеспечивающие высокую жесткость и точность позиционирования при разнонаправленных нагрузках.

Выделяются следующие технологические эффекты от применения модулей для комбинированной обработки:

- совмещение операций резания;
- интеграция различных методов обработки;
- создание много инструментальных блоков.

МИН в архитектуре цифрового машиностроения

Суть Индустрии 4.0, также известной как четвертая промышленная революция, — это цифровизация, автоматизация (в том числе принятия решений) и внедрение интеллектуальных систем. Ключевыми технологиями являются: большие объемы данных и аналитика, автономные роботы, симуляция и цифровые двойники, промышленный интернет вещей, облачные технологии, искусственный интеллект и дополненная реальность [8, 22].

Интеграция МИН в цифровое машиностроение предполагает решение задач:

1. Создание цифровых двойников инструментальных наладок для виртуальной верификации, оптимизации траекторий и симуляции процессов резания.

2. Разработка систем автоматического инструментального обеспечения цифрового производства, включающих алгоритмы выбора инструмента на основе аналогового метода.

3. Внедрение стандартизированных протоколов информационного обмена на базе международного стандарта ISO 13399 для обеспечения единого языка межсистемных коммуникаций.

В рамках Индустрии 4.0 цифровизация инструментального хозяйства осуществляется за счет технологий больших объемов данных и аналитики, промышленного интернета вещей и облачных решений. Эти технологии способствуют повышению эффективности обрабатывающего производства, улучшению прогнозирования спроса, диагностике технического обслуживания и созданию «умных» складов [22].

Опираясь на данные проведенного исследования, можно отметить следующие задачи в отрасли:

1. Разработка «умных» модульных инструментальных наладок со встроенными датчиками для мониторинга процесса резания в реальном времени, позволяющими осуществлять параметрический отказ при выходе параметра шероховатости за установленное предельное значение с использованием виброакустических сигналов в качестве диагностических косвенных признаков.

2. Создание систем автоматизированного проектирования МИН, интегрированных с цифровыми платформами управления производством, обеспечивающих сквозное проектирование от модуля поверхности детали до конфигурации инструментальной наладки.

3. Развитие методов аналитического расчета контактной жесткости стыков модульных систем с учетом реальных условий нагружения, зазоров, деформаций сопрягаемых деталей и погрешностей изготовления.

4. Расширение области применения модулей для комбинированной обработки на операции с труднообрабатываемыми материалами и прецизионную обработку.

5. Разработка методов оценки влияния полиморфности структуры МИН на динамические характеристики технологической системы и качество обработанной поверхности.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что модульные инструментальные наладки представляют собой одно из наиболее перспективных направлений развития инструментального обеспечения современного машиностроительного производства. Разработанные научные основы модульной технологии создают теоретическую базу для проектирования МИН, адаптированных к изготовлению конкретных модулей поверхностей

деталей. Ключевым элементом, определяющим эффективность МИН, является конструкция узлов соединения модулей. Экспериментальные исследования демонстрируют преимущества соединений с радиальными смещенными крепежными винтами и эксцентриковыми механизмами по сравнению с традиционным свинчиванием по осевой резьбе. Модули для комбинированной обработки представляют собой наиболее наукоемкий класс МИН, обеспечивающий значительное повышение производительности за счет совмещения разнородных операций в едином технологическом переходе. Интеграция МИН в цифровое машиностроение на основе технологий Индустрии 4.0 открывает новые возможности для создания «умных» инструментальных систем с функциями мониторинга, адаптивного управления и цифрового документооборота. Дальнейшее развитие данного направления сопряжено с решением фундаментальных и прикладных задач в области контактной жесткости стыков, динамики сборных инструментальных конструкций и цифрового моделирования процессов резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Базров, Б.М. Модульные технологии в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.

2) Хафизов, И.И. Гибкий автоматизированный модуль с координатами управления для комбинированной обработки / И.И. Хафизов // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 112–115.

3) Расчет контактной жесткости соединений инструментальных оправок с двойным базированием / А.В. Ривкин, А.Н. Соболев, А.Я. Некрасов, М.О. Арбузов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2018. – № 4 (47). – С. 58–63.

4) Технологическая система механической обработки блочно-модульным инструментом / Е.В. Мироненко, А.М. Бондаренко, В.В. Куценко, С.В. Лобов // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Технологии в машиностроении. – 2018. – № 26. – С. 81–86.

5) Ильиных, В.А. Оценка точности и прочности модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений / В.А. Ильиных, В.Е. Ярилов, Е.А. Рожкова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 451–462. – DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-451-462.

6) Прогнозная оценка эксплуатационных характеристик модульных инструментальных систем / В.В. Копылов, Н.С. Есаков, Я.И. Шуляк, А.Р. Маслов // Труды Белорусского национального технического университета. Серия «Машиностроение». – 2019. – № 2. – С. 34–41.

7) Модульные инструментальные системы для станков с ЧПУ // Энциклопедия технической информации. – М.: Техносфера, 2019. – С. 245–267.

8) Вилкина, М.В. Развитие инструментального хозяйства в рамках Индустрии 4.0 / М.В. Вилкина // RITM Magazine: технологии производства. – 2020. – № 3 (32). – С. 24–29.

9) Маслов ,А.Р. Модульные инструментальные наладки / А.Р. Маслов. – М.: Янус-К, 2021. – 66 с.

10) Маслов, А.Р. Модульные инструментальные наладки / А.Р. Маслов // Станкоинструмент. – 2021. – № 2 (023). – С. 86–92. – DOI: 10.22184/2499-9407.2021.23.2.86.92.

11) Маслов, А.Р. Модульные расточные инструментальные наладки / А.Р. Маслов, Е. Смолкин, Е. Тивирев // Станкоинструмент. – 2021. – № 4 (025). – С. 48–57. – DOI: 10.22184/2499-9407.2021.25.4.48.57.

12) Ткаченко, С.С. Инновационный подход к модульному станкостроению в условиях цифровой экономики / С.С. Ткаченко // Материалы Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2021». – Минск: БНТУ, 2021. – С. 312–314.

13) Кожин-Гребенщиков, П.П. Модульные инструментальные наладки / П.П. Кожин-Гребенщиков, А.Р. Маслов, Е.Г. Тивирев // Станкоинструмент. – 2021. – № 2 (023). – С. 86–92.

14) Маслов, А.Р. Модульные инструментальные наладки: библиографический список (23 назв.) / А.Р. Маслов. – М.: Янус-К, 2021. – С. 65–66.

15) Маслов, А.Р. Инструментальные системы машиностроительного производства: учебное пособие / А.Р. Маслов, Е.Г. Тивирев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. – 312 с.

16) Кравченко, В.А. Проектирование модульных инструментальных наладок с заданными точностью и жесткостью / В.А. Кравченко, А.Р. Маслов, Е.Г. Тивирев // Станкоинструмент. – 2022. – № 3 (028). – С. 54–60.

17) Маслов, А.Р. Модульные инструментальные наладки для микрообработки / А.Р. Маслов // Станкоинструмент: наука, проектирование, производство. – 2023. – № 1 (030). – С. 66–73. – DOI: 10.22184/2499-9407.2023.30.1.66.72.

18) Копылов, В.В. Исследование модульного расточного инструмента / В.В. Копылов, Н.С. Есаков, Я.И. Шуляк // Станкоинструмент. – 2024. – № 1 (034). – С. 72–74. – DOI: 10.22184/2499-9407.2024.34.1.72.74.

19) Есаков, Н.С. Расточные модульные инструментальные наладки / Н.С. Есаков // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии». – М.: ООО «КванторФорм», 2024. – С. 67–70.

20) Автоматическое управление производственно-техническими характеристиками блочно-модульных инструментов с элементами диагностики и контроля / И.И. Хафизов, А.Р. Маслов, Е.Г. Тивирев, В.В. Копылов // Сборник статей Уральского федерального университета. Серия «Технические науки». – Екатеринбург: УрФУ, 2024. – С. 122–129.

21) Маслов, А.Р. Системы автоматического инструментального обеспечения цифрового производства / А.Р. Маслов // Станкоинструмент. – 2025. – № 1 (038). – С. 70–78. – DOI: 10.22184/2499-9407.2025.38.1.70.78.

22) Вилкина, М.В. Цифровые инструменты управления качеством в машиностроении: от стандартов до искусственного интеллекта / М.В. Вилкина // Вестник Иркутского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 55–63.

23) Патент № 1821333 Российская Федерация**,** МПК B23B 1/00, B23Q 17/00. Устройство для управления процессом комбинированной обработки, режущим и деформирующим инструментами: опубл. 15.06.1993 / Артеменко К.И., Богданов Н.Э.

УДК 004.41:006.8

АДАПТАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕГЛАМЕНТОВ К ОБЪЕКТАМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С УЧЁТОМ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

А.В. Никонорова

Научный руководитель – **В.А. Иванова**, д-р техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается проблема применения требований технических регламентов к программному обеспечению с учётом особенностей его жизненного цикла. Предложен подход к дифференцированной адаптации требований стандартизации и оценки соответствия на каждой стадии жизненного цикла ПО в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2021.

Ключевые слова: *технические регламенты, программное обеспечение, жизненный цикл, стандартизация, оценка соответствия, менеджмент качества*

ADAPTATION OF TECHNICAL REGULATIONS REQUIREMENTS TO INFORMATION TECHNOLOGY OBJECTS CONSIDERING SOFTWARE LIFECYCLE STAGES

A.V. Nikonorova

Scientific Supervisor – **V.A. Ivanova**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article addresses the problem of applying technical regulations requirements to software, taking into account the specifics of its lifecycle. An approach to differentiated adaptation of standardization and conformity assessment requirements at each stage of the software lifecycle in accordance with GOST R ISO/IEC 12207-2021 is proposed.

Keywords: *technical regulations, software, lifecycle, standardization, conformity assessment, quality management*

Стремительное развитие цифровой экономики и курс на технологический суверенитет Российской Федерации актуализируют задачу создания эффективной системы технического регулирования в области информационных технологий [1] [2]. Программное обеспечение (ПО) как объект стандартизации и оценки соответствия обладает рядом принципиальных особенностей, отличающих его от традиционных промышленных изделий: нематериальная природа, непрерывная изменяемость, итеративный характер создания. Именно эти свойства обусловливают несоответствие между стандартными механизмами технического регулирования, ориентированными на дискретный производственный процесс, и реальным жизненным циклом ПО [1].

Действующая система технических регламентов Таможенного союза (ТР ТС) и ряд национальных технических регламентов Российской Федерации практически не содержат специальных требований к ПО как самостоятельному объекту технического регулирования. Отдельные требования к программным компонентам встречаются в регламентах для промышленного оборудования, медицинских изделий, технических средств защиты информации, однако они носят фрагментарный характер и не отражают полноту жизненного цикла ПО [2]. Разрыв между требованиями технического регулирования и жизненным циклом программных продуктов снижает эффективность контрольно-надзорных механизмов и создаёт риски при оценке соответствия отечественного ПО.

Цель настоящей работы – разработать подход к адаптации требований технических регламентов к объектам информационных технологий с учётом стадий жизненного цикла ПО, определённых ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2021.

Особенности программного обеспечения как объекта технического регулирования

Согласно Федеральному закону № 184-ФЗ «О техническом регулировании», объектами технического регулирования являются продукция, процессы проектирования, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации [1]. Программное обеспечение формально подпадает под это определение как продукция, однако на практике большинство положений технических регламентов разработаны без учёта специфики ПО.

Ключевые особенности ПО как объекта технического регулирования можно сформулировать следующим образом. Во-первых, ПО не имеет физического износа – деградация его качества связана исключительно с изменениями внешней среды (операционных систем, зависимостей, аппаратных платформ) или внутренних требований. Во-вторых, жизненный цикл ПО включает многократно повторяющиеся итерации разработки и верификации, что противоречит линейной логике производственного цикла, на которую рассчитаны большинство механизмов подтверждения соответствия. В-третьих, критерии качества ПО – функциональная пригодность, надёжность, защищённость, удобство сопровождения и др. – описаны в серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 25000 (SQuaRE) и носят вероятностный характер, что затрудняет формирование однозначных пороговых значений для оценки соответствия [3, 6].

Анализ стадий жизненного цикла ПО по ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2021

ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2021 «Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств» является основополагающим отечественным стандартом, устанавливающим состав и взаимосвязь процессов жизненного цикла ПО [4]. Стандарт выделяет три группы процессов: процессы соглашений, организационные процессы жизненного цикла и технические процессы. Для целей настоящего исследования ключевое значение имеют технические процессы, которые в совокупности образуют жизненный цикл конкретного программного продукта (табл. 1).

В рамках предлагаемого подхода жизненный цикл ПО рассматривается через призму пяти укрупнённых стадий, каждая из которых предъявляет различные требования к стандартизации и оценке соответствия: стадия концепции и требований; стадия проектирования и архитектуры; стадия разработки и кодирования; стадия верификации и валидации; стадия эксплуатации и сопровождения.

Таблица 1. Адаптация требований технического регулирования к стадиям ЖЦ ПО

Стадия ЖЦ ПО	Применяемые стандарты	Инструмент оценки соответствия	Требования технического регулирования
Концепция и требования	ГОСТ Р ИСО/МЭК 29148-2014; ГОСТ Р 57533-2017	Анализ документации требований	Полнота, однозначность, верифицируемость требований
Проектирование и архитектура	ГОСТ Р ИСО/МЭК/IEEE 42010-2017; ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015	Аудит архитектурных решений	Соответствие характеристик качества ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010
Разработка и кодирование	ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2021; ГОСТ Р 56939-2016	Инспекция кода, статический анализ	Безопасная разработка (ГОСТ Р 56939), документирование
Верификация и валидация	ГОСТ Р ИСО/МЭК 29119-1-2017; ГОСТ Р ИСО/МЭК 25040-2012	Испытания, сертификация	Соответствие нормам ФЗ № 184-ФЗ, Приказ ФСТЭК № 17 [7]
Эксплуатация и сопровождение	ГОСТ Р ИСО/МЭК 25040-2012; ГОСТ Р ИСО/МЭК 14764-2002	Периодический аудит, мониторинг	Актуальность сертификата соответствия, управление изменениями

Подход к адаптации требований технических регламентов

Анализ действующей нормативно-правовой базы показывает, что существующие технические регламенты не учитывают цикличность и итеративность жизненного цикла ПО. Предлагаемый подход основан на принципе дифференцированного применения требований: каждая стадия жизненного цикла ПО сопоставляется с конкретным набором применимых стандартов и инструментов подтверждения соответствия (табл. 1).

Первый элемент подхода – введение принципа стадийности в процедуры оценки соответствия. Вместо единовременной сертификации готового продукта предлагается проводить поэтапное подтверждение соответствия: сначала проверяется качество спецификаций требований, затем – архитектурных решений, далее – кода и, наконец, результатов испытаний. Такой подход согласуется с практикой DevSecOps и нормами ГОСТ Р 56939 в части обеспечения безопасности на этапе разработки [5].

Второй элемент – формирование матрицы соответствия «стадия ЖЦ ПО – требование технического регламента – стандарт – метод оценки соответствия». Данная матрица позволяет регулятору устанавливать дифференцированные требования для ПО различных категорий (критическая инфраструктура, медицинские информационные системы, бытовое ПО) с учётом рисков, связанных с применением конкретного программного продукта. Контроль соответствия ПО требованиям информационной безопасности осуществляется в соответствии с методическими документами ФСТЭК России [7].

Третий элемент – применение серии ГОСТ Р ИСО/МЭК 25000 (SQuaRE) в качестве технической основы для формирования измеримых критериев оценки соответствия на каждой стадии жизненного цикла. Характеристики качества ПО, определённые ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 (функциональная пригодность, надёжность, защищённость, сопровождаемость и др.), могут быть использованы как требования к продукции в рамках технического регулирования [3].

Заключение

Адаптация требований технических регламентов к программному обеспечению с учётом стадий жизненного цикла является необходимым условием построения эффективной системы технического регулирования в области информационных технологий. Предложенный подход, основанный на принципе стадийности, матрице соответствия требований и применении серии SQuaRE, позволяет создать методологическую основу для разработки специализированных технических регламентов в сфере ПО. Практическое применение данного подхода будет способствовать повышению качества отечественных программных продуктов и укреплению технологического суверенитета Российской Федерации [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ // Собрание законодательства РФ. — 2002. — № 52 (ч. I). — Ст. 5140. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (дата обращения: 20.03.2026).

2. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации»: утв. протоколом заседания президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию от 04.06.2019 № 7. — URL: https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/ (дата обращения: 20.03.2026).

3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 36 с.

4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2021. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 104 с.

5. ГОСТ Р 56939-2016. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 18 с.

6. Липаев, В.В. Методы обеспечения качества крупномасштабных программных средств / В.В. Липаев. – Москва: СИНТЕГ, 2003. – 520 с.

7. Федеральная служба по техническому и экспортному контролю России: офиц. сайт. – URL: https://fstec.ru/ (дата обращения: 20.03.2026).

УДК 006.87

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА В ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

К.В. Никулина, Д.И. Казюлина

Научный руководитель – **Д.И. Казюлина**, преподаватель

Ярославский государственный технический университет

Проведен анализ значение системы менеджмента качества (СМК) для испытательных лабораторий. Описана нормативно-правовая база, регламентирующая создание СМК для испытательных лабораторий. Выявлены проблемы при разработке СМК и последствия её отсутствия.

Ключевые слова: *система менеджмента качества, требования, испытательная лаборатория*

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN THE TESTING LABORATORY

K.V. Nikulina, D.I. Kazyulina

Scientific Supervisor - **D.I. Kazyulina**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The importance of a quality management system (QMS) for testing laboratories is analyzed. The regulatory framework governing the development of QMS for testing laboratories is described. Challenges in QMS development and the consequences of ignoring them are identified.

Keywords: *quality management system, requirements, testing laboratory*

Введение

В условиях ужесточения требований к точности измерений в промышленности, энергетике, здравоохранении и торговле особое значение приобретает достоверность результатов, получаемых при поверке средств измерений. Поверка – совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений установленным для них обязательным, в том числе метрологическим, требованиям [9]. Результаты поверки непосредственно влияют на качество выпускаемой продукции, безопасность технологических процессов и защиту прав потребителей.

Однако сама по себе поверка не гарантирует достоверности результатов. Необходима системная работа по управлению качеством на всех этапах – от приёма средства измерений в поверку до выдачи свидетельства о поверке. Именно для этой цели разрабатывается и внедряется система менеджмента качества (СМК). В статье на примере аккредитованной лаборатории по поверке средств измерений рассматривается нормативно-правовая основа СМК, её преимущества, а также последствия отсутствия эффективно функционирующей системы качества.

1. Поверка, как область лаборатории.

Поверка средств измерений относится к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В соответствии со статьёй 13 Федерального закона № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [1], средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования, до ввода в эксплуатацию подлежат первичной поверке, а в процессе эксплуатации, в том числе после ремонта, - периодической поверке. Поверка выполняется аккредитованными лицами в соответствии с методиками поверки, сведения о которых внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, с применением средств измерений утверждённого типа, прошедших поверку.

2. Для чего в лаборатории нужна СМК?

Внедрение и поддержание СМК преследует несколько взаимосвязанных целей. Первичной и главной целью является повышение степени удовлетворенности потребителей за счет выполнения их требований и постоянного улучшения процессов [5]. Вторичными, но не менее важными целями являются: повышение результативности и эффективности процессов, снижение операционных рисков и издержек, создание доверия со стороны потребителей и других заинтересованных сторон, что в совокупности формирует долгосрочное конкурентное преимущество организации [5].

Система менеджмента качества в лаборатории обеспечивает:

- достоверность результатов. СМК регламентирует порядок выполнения измерений, обработки данных, оформления протоколов и принятия решений о пригодности средства измерений.
- беспристрастность. Стандарт ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» [7] устанавливает требования к беспристрастности и независимости лаборатории от коммерческого, финансового или иного давления. СМК должна содержать механизмы выявления, анализа и устранения конфликтов интересов.
- прослеживаемость измерений. СМК обеспечивает документальное подтверждение связи рабочих эталонов и средств измерений с государственными первичными эталонами единиц величин. В соответствии с актуальной редакцией Федерального закона № 102-ФЗ [1] прослеживаемость теперь включает также передачу единиц величин эталонам единиц величин и аттестацию методик (методов) измерений.
- управление рисками и возможностями. В соответствии с критериями аккредитации в руководстве по качеству должны быть установлены правила управления рисками и возможностями [3].

Как отмечается в практике лабораторий, прошедших аккредитацию, основными преимуществами являются: улучшение качества предоставляемых услуг; наиболее полное удовлетворение требований потребителей (заказчиков); создание доверия основных заинтересованных сторон к результативности и эффективности; использование процессного и системного подходов; повышение производительности; снижение затрат и более рациональное использование всех ресурсов; расширение рынка сбыта услуг; повышение конкурентных преимуществ.

3. Нормативно-правовая основа для разработки СМК.

Построение и сертификация СМК в России осуществляются в рамках четко определенной нормативно-правовой базы, которая включает как адаптированные международные стандарты, так и национальное законодательство.

Основой разработки СМК являются национальные стандарты Российской Федерации, идентичные международным стандартам серии ISO 9000:

1. ГОСТ ISO 9000-2015 (ГОСТ Р ИСО 9000-2015) «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» [4] . Данный стандарт устанавливает фундаментальные понятия, принципы и терминологию, что обеспечивает единое понимание основ менеджмента качества всеми заинтересованными сторонами. Он служит концептуальной основой для всей серии стандартов.

2. ГОСТ ISO 9001-2015 (ГОСТ Р ИСО 9001-2015) «Системы менеджмента качества. Требования» [5]. Это ключевой нормативный документ, содержащий минимальный набор обязательных требований, соответствие которым может быть проверено в ходе аудита (внутреннего или внешнего). Сертификация организации по данному стандарту является публичным подтверждением того, что ее СМК соответствует международно-признанным критериям.

3. ГОСТ ISO 9004-2018 (ГОСТ Р ИСО 9004-2018) «Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации» [6]. В отличие от ГОСТ ISO 9001, данный стандарт не содержит требований для сертификации, а

предоставляет руководящие указания по постоянному совершенствованию деятельности организации для достижения долгосрочного устойчивого успеха. Он фокусируется на эффективности и результативности всей системы управления.

4. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» [7]. В стандарте содержатся требования к лабораториям, выполнение которых позволит им продемонстрировать компетентность и способность получать достоверные результаты

Правовой контекст для применения данных стандартов и процедуры подтверждения соответствия Федеральный закон от 28.12.2013 № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации». Данный закон регулирует деятельность по аккредитации органов по оценке соответствия, в том числе органов по сертификации систем менеджмента. Он гарантирует, что сертификаты, выданные аккредитованными органами, являются объективными и признаются на национальном и международном уровне.

Таким образом, требование стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [7] и ГОСТ ISO 9001:2015 [5] является основой для построения СМК испытательных лабораторий, а ФЗ № 412 формирует правовое поле для ее добровольной сертификации аккредитованными органами.

4. Проблемы разработки СМК и последствия их отсутствия.

Несмотря на очевидную необходимость СМК, при её разработке и поддержании лаборатории сталкиваются с рядом проблем.

Многие лаборатории разрабатывают руководство по качеству и процедуры лишь для формального соответствия критериям аккредитации, но не внедряют их в повседневную деятельность.

Также, частой проблемой является несвоевременная актуализация нормативной базы. Поскольку законодательство и стандарты в области обеспечения единства измерений активно обновляются, лаборатории часто не успевают оперативно вносить изменения в свою документацию.

Существуют и кадровые проблемы. В лабораториях малой численности возникает ситуация, когда один и тот же сотрудник выполняет функции, которые должны быть разделены. Кроме того, между сроками подтверждения компетенции происходит приём и увольнение сотрудников, а процедуры оценки персонала, обучения и допуска к работе, прописанные в СМК, соблюдаются не в полном объёме.

Одна из главных проблем при прохождении подтверждения компетенции – ведение записей (формы, полнота информации, внесение исправлений) и их хранение. В лабораториях часто отсутствуют акты уничтожения архива после окончания сроков хранения записей.

Отсутствует управление рисками. Требование о наличии правил управления рисками и возможностями в руководстве по качеству часто игнорируется или выполняется формально.

Анализ причин приостановки деятельности аккредитованных лабораторий, проведённый Росаккредитацией по итогам 2024 года, показал, что 41% нарушений, повлёкших приостановку аккредитации, относятся к системе менеджмента качества [10]. При этом речь идёт не о мелких формальных ошибках, а о системном несоблюдении ключевых требований: оформлении документов об оценке соответствия или проведении испытаний вне области аккредитации, использовании оборудования вне методики испытания, отсутствии архива, нарушении требования о проведении межлабораторных сличительных испытаний. Возможные последствия отсутствия функционирующей СМК представлены в табл. 1.

Таблица 1. Возможные последствия для испытательной лаборатории при игнорировании требований системы менеджмента качества

Санкции при игнорировании требований СМК	Влияние на работу лаборатории	Последствия для испытательной лаборатории
Приостановление действия аккредитации	Лишение права на поверку до устранения выявленных нарушений	Финансовые потери и утрата доверия со стороны заказчика
Предписания об устранении нарушений	Затраты времени на устранение нарушений	Замедление основного процесса лаборатории
Отказ в расширении области аккредитации или в подтверждении компетентности	Ограниченные действия в области поверки	Отсутствие развития для лаборатории
Административная ответственность	Наложение административного штрафа в соответствии с Кодексом Российской Федерации об административных правонарушениях	Финансовые потери
Юридическая недействительность результатов поверки	Аннулирование результатов поверки	Утрата доверия со стороны заказчика

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (ред. от 14.02.2024) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – Ст. 3021.

2) Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» (ред. от 08.08.2024) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2013. – Ст. 6977.

3) Приказ Минэкономразвития России от 24 октября 2020 г. № 704 «Об утверждении Положения о составе сведений о результатах деятельности аккредитованных лиц...» (с изменениями от 20 ноября 2024 г.) // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: http://publication.pravo.gov.ru (дата обращения: 06.04.2026). – Текст: электронный

4) ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 62 с.

5) ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 32 с.

6) ГОСТ Р ИСО 9004-2019. Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 41 с.

7) ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 31 с.

8) ГОСТ Р 8.885-2024. ГСИ. Эталоны. Основные положения. – Москва: Российский институт стандартизации, 2024. – 12 с.

9) ГОСТ Р 8.973-2019. Национальные стандарты на методики поверки. Общие требования к содержанию и оформлению. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 11с.

10) Федеральная служба по аккредитации (Росаккредитация). Системные нарушения в СМК – главная причина приостановки аккредитации лабораторий: сайт. – URL: https://fsa.gov.ru/press-center/news/23699/ (дата обращения: 06.04.2026).

УДК 621.86

НЕСООТВЕТСТВИЕ МОСТОВЫХ КРАНОВ НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ ДЕЙСТВУЮЩИМ НОРМАТИВНЫМ ТРЕБОВАНИЯМ

В.Д. Омельченко

Научный руководитель – **С.Д. Иванов,** канд. техн. наук

ООО «РАЭ»

Рассмотрена проблема несоответствия мостовых кранов на объектах использования атомной энергии действующим нормативным требованиям, обусловленного разрывом между датой изготовления оборудования и датой ввода объекта в эксплуатацию. На основе анализа более ста реализованных проектов модернизации систематизированы типовые конструктивные изменения, которые могут служить методической основой при разработке программ модернизации кранового оборудования на других аналогичных объектах.

Ключевые слова: *мостовой кран, атомная энергетика, модернизация, промышленная безопасность*

INCOMPATIBILITY OF OVERHEAD CRANES INSTALLED AT NUCLEAR ENERGY UTILIZATION FACILITIES WITH CURRENT NORMATIVE REQUIREMENTS

V.D. Omelchenko

Scientific Supervisor – **S.D. Ivanov**, Candidate of Technical Sciences

LLC «RAE»

This article examines the issue of non-compliance of overhead cranes at nuclear facilities with current regulatory requirements, caused by a gap between the equipment's manufacture date and the facility's commissioning date. Based on an analysis of over one hundred completed modernization projects, typical design changes have been systematized and can serve as a methodological basis for developing crane equipment modernization programs at other similar facilities.

Keywords: *overhead crane, nuclear energy, modernization, industrial safety*

Обеспечение безопасной эксплуатации мостовых кранов является актуальной задачей [1-3], особенно в атомной отрасли, поскольку риски, связанные с аварийными ситуациями на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ), недопустимо высоки [4]. Для снижения данных рисков применяется принцип глубокоэшелонированной защиты, предполагающий последовательное использование нескольких независимых барьеров безопасности [5].

Реализация проектов в области атомной энергетики, как правило, занимает многие годы. Вследствие этого оборудование, заказанное на начальном этапе строительства, к моменту ввода объекта в эксплуатацию нередко перестаёт соответствовать нормативно-технической документации (НТД), актуальной на дату сдачи объекта заказчику. Таким образом, часть установленного оборудования оказывается несоответствующей действующим требованиям как формально – по составу документации, так и функционально – вследствие отсутствия технических возможностей, предусмотренных актуальной НТД.

В связи с этим возникает необходимость модернизации существующего парка подъёмно-транспортного оборудования до уровня, соответствующего актуальной НТД. Объём такой модернизации может варьироваться: от незначительных конструктивных изменений (например, установки энкодеров на электродвигатели крановых приводов) до масштабной переработки отдельных узлов (в частности, замены иностранных комплектующих на отечественные аналоги).

Цель настоящей работы – систематизация типичных изменений, вносимых в конструкцию мостовых кранов на ОИАЭ вследствие введения новых нормативных документов.

Большинство кранов, изготовление которых было начато до вступления в силу НП-071-18, не соответствуют его обновлённым требованиям. По результатам анализа более ста реализованных проектов модернизации мостовых кранов на ОИАЭ составлена сводная таблица типовых изменений (табл. 1).

Таблица 1. Типовые изменения конструкций мостовых кранов при модернизации

Узел / функция	Домодернизации	Послемодернизации	НТД
Мотор-редуктор механизма передвижения крана и тележки	Импортные комплектующие без оформленного решения о применении	Замена на комплектующие, прошедшие оценку соответствия: отечественные/локализованные либо импортные с оформленным решением о применении	НП-071-18 (требования к импортной продукции)
Электродвигатель механизма подъёма	Отсутствие датчиков обратной связи (энкодер)	Замена на электродвигатель с возможностью установки энкодера	НП-043-18 (требования к контролю ускорения механизмов)
Тормоз механизма подъёма	Без функции компенсации износа тормозных колодок	С автоматической компенсацией износа тормозных колодок	НП-043-18 (требования к тормозам)
Крюковая подвеска	Масса менее 3% от номинальной грузоподъёмности	Масса не менее 3% от номинальной грузоподъёмности	Требование к функции контроля слабины каната в ограничители грузоподъем-ности
Ограничитель грузоподъёмности	Без функции контроля слабины каната и без регистратора параметров	Установлен ограничитель грузоподъёмности с функцией определения слабины каната и регистрацией параметров	НП-043-18 НП-071-18
Установка поддонов под редуктором	При поломке редукторов происходит утечка масла	Установлены поддоны для скапливания масла в случае утечки	НП-043-18

Проведённый анализ показывает, что несоответствие мостовых кранов действующим нормативным требованиям на ОИАЭ носит системный характер и обусловлено прежде всего разрывом между сроками проектирования и изготовления оборудования и датой его ввода в эксплуатацию. Выявленные типовые изменения затрагивают ключевые системы безопасности крана: приводы, тормозные системы, системы контроля и защиты, — что подтверждает их критическую значимость для обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Систематизированный перечень изменений, основанный на опыте более ста реализованных проектов, может служить методической основой при разработке программ модернизации кранового оборудования на других ОИАЭ, а также при проектировании новых кранов с учётом актуальных требований НТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Иванов, С.Д. Информация о характере работы ПТМ как основа метода поддержания работоспособности на этапе эксплуатации / С.Д. Иванов, А.Н. Назаров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2025. – № 4. – С. 27-44. – EDN KWPORZ.

2) Иванов, С.Д. Формирование информационной базы для уточнения расчета остаточного ресурса и улучшения методики планирования ремонтов подъемно-транспортного оборудования с использованием приборов безопасности - регистраторов параметров (на примере кранов) / С.Д. Иванов, Н.Ю. Иванова // Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал: Материалы Всероссийской научно-практической конференции: Сборник докладов в области экономики и менеджмента, а также производственных технологий, информационных технологий и технологического менеджмента, Москва, 28 мая 2019 года. – Москва: Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", 2019. – С. 236-241. – EDN OAZGZT.

3) Иванов, С.Д. Развитие направления «промышленная безопасность подъемных сооружений» на кафедре РК4 «Подъемно-транспортные системы» / С.Д. Иванов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2024. – № 4. – С. 11-24. – EDN GACZBH.

4) Назаров, А.Н. Разработка перспективного прибора безопасности кранов мостового типа / А.Н. Назаров, С.Д. Иванов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 6(100). – С. 826-843. – DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843. – EDN TYGGUV.

5) Липатов, А.С. Методические основы разработки документа по обоснованию надежности грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова, В.С. Обломей // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 3. – С. 22-28. – EDN RXRRYL.

УДК 620.179:621.7.029

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ВИДЫ КОНТРОЛЯ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.Д. Платонова, Е.Н. Фуртова

Научный руководитель – **Е.Н. Фуртова**, канд. пед. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Технология струйного нанесения связующего (BinderJetting) является одним из наиболее перспективных направлений аддитивного производства. В статье рассматриваются методы неразрушающего контроля для выявления дефектов у изделий, изготовленных из песчано-полимерных материалов по технологии BinderJetting. Представлены основные скрытые дефекты изделий (на примере литейных форм), позволяющие подобрать методы неразрушающего контроля.

Ключевые слова: *аддитивные технологии, BinderJetting, песчано-полимерные материалы, неразрушающие методы контроля*

NON-DESTRUCTIVE TYPES OF CONTROL IN ADDITIVE MANUFACTURING

A.D. Platonova, E.N. Furtova

Scientific Supervisor – **E.N. Furtova**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

Binder Jetting technology is one of the most promising areas of additive manufacturing. The article discusses non-destructive testing methods for detecting defects in products made of sand-polymer materials using Binder Jetting technology. The main hidden defects of products are presented (using the example of casting molds), which make it possible to select methods of non-destructive testing.

Keywords: *additive technologies, Binder Jetting, sand-polymer materials, non-destructive testing methods*

Аддитивные технологии кардинально изменили литейное производство, позволив создавать оснастку практически любой геометрической сложности. Однако это преимущество обернулось новой проблемой: как проверить качество скрытых внутренних полостей, если к ним нет физического доступа? Методы неразрушающего контроля (НК) стали тем самым «рентгеновским зрением», которое позволяет заглянуть внутрь формы, не разрушая её. Особенно остро этот вопрос стоит при использовании технологии струйного нанесения связующего – Binder Jetting (BJ), где форма выращивается послойно из песка и смолы. Внутренние каналы, решётчатые структуры и литниковые системы, которые ранее было невозможно изготовить, сегодня печатаются за несколько часов. Но вместе со свободой проектирования пришли риски: остатки непропечатанного песка, нарушения целостности слоёв и отклонения геометрии, невидимые снаружи. В данной статье рассматриваются современные подходы к диагностике песчано-полимерных форм. Основное внимание уделяется рентгеновской компьютерной томографии как «золотому стандарту» неразрушающего контроля, а также альтернативным методам (ультразвук, эндоскопия) и вопросам стандартизации. Показано, что без НК невозможно гарантировать чистоту полостей и соответствие формы CAD-модели, а с развитием литья метаматериалов роль цифровой верификации будет только возрастать.

Binder Jetting (струйное связывание) – метод аддитивного производства, при котором изделие формируется путём селективного нанесения связующего вещества («биндера») на слои порошкового материала. В отличие от лазерных технологий (SLS, SLM), здесь не используется тепловая энергия для спекания или плавления: вместо этого печатающая головка, аналогичная струйной, перемещается над ровным слоем порошка (толщиной 50–200 мкм) и распыляет жидкое связующее строго по контуру поперечного сечения модели.

Одной из разновидностей аддитивного производства Binder Jetting является печать песчано-полимерных форм. Технология кардинально меняет литейное производство. Вместо

того чтобы изготавливать оснастку неделями или месяцами, печать позволяет получить готовую форму за несколько часов или дней. Технология напоминает струйную печать, но вместо бумаги используется песок.

Процесс протекает при комнатной температуре и состоит из следующих шагов:

1. Нанесение песка: рабочая платформа заполняется тонким слоем формовочной смеси (кварцевый или керамический песок).

2. Нанесение связующего: печатающая головка, как в 2D-принтере, проезжает над слоем и выборочно наносит капли жидкого связующего (обычно фурановая или фенольная смола), скрепляя частицы песка по контуру будущей детали.

3. Цикл повторяется: платформа опускается вниз на толщину следующего слоя (обычно 0.2–0.5 мм), и процесс повторяется.

4. Финальная форма: после завершения печати деталь извлекают из «песочной ванны». Неиспользованный песок просто высыпается и может быть использован заново.

Промышленные предприятия переходят на эту технологию из-за её очевидных плюсов:

1. Сложность без ограничений: можно создавать формы с внутренними полостями и запутанными каналами, которые невозможно получить классическим методом

2. Скорость и экономия: время изготовления сложной оснастки сокращается с месяцев до 1–3 дней.

3. Никакой оснастки: форма печатается сразу по цифровой модели. Не нужно хранить или ремонтировать физические модельные шаблоны.

4. Экологичность: в отличие от классической «холодно-твердеющей» оснастки, технология точнее дозирует материалы и уменьшает отходы.

Чрезвычайно важно осуществлять контроль деталей, создаваемых с помощью аддитивных технологий, на наличие дефектов. Дефект – это каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

У песчано-полимерных форм (Binder Jetting) выделяют следующие основные дефекты:

1. Остатки несвязанного (рыхлого) песка

Самый частый и коварный дефект. После печати внутри сложных каналов и решёток остаётся песок, который не был скреплён связующим.

2. Несвязанность слоёв (дефекты спекания)

Нарушение целостности стенок формы между слоями. Возникает из-за сбоя печатающей головки, недостаточного нанесения связующего или загрязнения песка. В результате при заливке металл может прорвать стенку формы, что делает отливку непригодной.

3. Засорённость литниковой системы

Литниковые каналы, по которым расплав поступает в полость формы, могут быть частично или полностью заблокированы остатками песка или натёками связующего.

4. Отклонения геометрии от CAD-модели

3D-печать не абсолютно точна. Отклонения могут достигать сотен микрон, что особенно важно для решётчатых структур, где диаметр перемычек составляет доли миллиметра. Такие отклонения не видны снаружи, но влияют на гидравлическое сопротивление и газопроницаемость формы.

5. Неоднородность структуры пор

Из-за неравномерного распределения связующего или уплотнения песка внутри стенки формы могут возникать зоны с разной пористостью. Это меняет реальную газопроницаемость по сравнению с расчётной, что при заливке приводит к газовым раковинам в отливке.

Все эти дефекты объединяет одно: они скрыты внутри формы, и обнаружить их без неразрушающего контроля практически невозможно.

Когда форма напечатана, но внутри неё остаются скрытые полости и каналы, единственным способом заглянуть внутрь без разрушения становится рентгеновский контроль. В практике литейного производства это прежде всего промышленная компьютерная томография (КТ) – метод, позволяющий получить трёхмерную модель внутренней структуры изделия.

Компьютерная томография строит объёмную модель, по которой можно:

- измерить геометрию внутренних полостей;
- увидеть точное расположение остатков несвязанного песка;
- обнаружить несвязанность слоёв или трещины в стенках формы.

Для песчано-полимерных форм, напечатанных по технологии Binder Jetting, это критически важно, так как плотность связующего и песка различается незначительно, и только КТ с высоким разрешением способна надёжно разделить связанный и рыхлый материал.

Современный рентгеновский контроль – это не просто «посмотреть картинку». Полученные КТ-данные загружаются в ПО для обратного инжиниринга, где виртуальную модель сравнивают с исходной CAD-геометрией (метод «CAD- номинал»). Строится цветовая карта отклонений, которая особенно важна для верификации решётчатых и топологически оптимизированных форм. Более того, на основе реконструированной поровой структуры можно рассчитать реальную газопроницаемость формы, а не расчётную теоретическую. Это позволяет прогнозировать поведение формы при заливке ещё до подачи металла.

Хотя КТ является «золотым стандартом», у неё есть ограничения:

- высокая стоимость оборудования;
- большие объёмы данных;
- ограничения по размеру детали (зависит от камеры томографа).

Поэтому для оперативного контроля на производстве иногда применяют:

- ультразвуковой контроль — для измерения толщины стенок крупных форм;
- визуально-оптический контроль (эндоскопы, боровизоры) — для осмотра прямых каналов.

Внедрение технологии Binder Jetting в литейное производство позволило создавать песчано-полимерные формы с внутренней геометрией, недостижимой классическими методами. Однако это же преимущество породило проблему: отсутствие физического доступа к скрытым полостям для контроля их качества. Как показано в статье, традиционная продувка сжатым воздухом не гарантирует полного удаления несвязанного песка из труднодоступных зон (например, узлов решётки). Именно методы неразрушающего контроля, и прежде всего компьютерная томография, становятся инженерной необходимостью. КТ позволяет выявлять остаточный рыхлый песок, измерять отклонения геометрии и рассчитывать реальную газопроницаемость формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ 5467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 21 с.

2) ГОСТ Р 57586-2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования. – Введ. 2017-12-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 8 с.

3) Non-Destructive Inspection of Sacrificial 3D Sand-Printed Molds with Geometrically Complex Lattice Cavities / S.R. Sama, T. Badamo, P. Lynch, G. Manogharan // International Journal of Metalcasting. – 2022. – Vol. 16. – P. 1091–1100.

4) A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting / T. Sivarupan, N. Balasubramani, P. Saxena [et al.] // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 40. – 101889.

5) Thiel, J. Characteristics of Materials Required for High Speed Sand Printing / J. Thiel, N. Bryant, K. Woods // AFS Proceedings of the 124th Metalcasting Congress. – 2020. – URL: http://afsinc.s3.amazonaws.com/2020%20Proceedings/2020-056_lm.pdf

УДК 681.6.012

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПЕСЧАНО-ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ BINDER JETTING

А.Д. Платонова, Е.Н. Фуртова

Научный руководитель - **Е.Н. Фуртова,** канд. пед. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются дефекты в изделиях из песчано-полимерных материалов, изготовленных по технологии Binder Jetting. Определены основные причины, влияющие на возможность образования дефектов. Предложена классификация дефектов по четырем группам в изделиях из песчано-полимерных материалов, позволяющая систематизировать дефект и причину его появления.

Ключевые слова: *технология Binder Jetting, песчано-полимерные материалы, дефекты, причины образования дефектов, классификация*

CLASSIFICATION OF DEFECTS IN SAND-POLYMER PRODUCTS MADE USING BINDER JETTING TECHNOLOGY

A.D. Platonova, E.N. Furtova

Scientific Supervisor – **E.N. Furtova**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses defects in sand-polymer materials products made by Binder Jetting technology. The main causes affecting the possibility of defects formation are determined. Classification of defects by four groups in sand-polymer materials products is proposed, allowing to systematize the defect and the cause of its occurrence.

Keywords: *Binder Jetting technology, sand-polymer materials, defects, causes of defects, classification*

В современном производстве все более прочные позиции занимают аддитивные технологии. Особое место благодаря своей высокой производительности, экономичности, возможности работы с широким спектром материалов занимает технология Binder Jetting. Например, она позволяет создавать песчано-полимерные литейные формы путём послойного синтеза, то есть нанесением песка и склеиванием его связующим веществом, слой за слоем [4]. Процесс происходит следующим образом: на рабочую платформу наносится тонкий слой порошка; печатающая головка, точно дозирует и наносит жидкое связующее вещество в те области, где должен быть сформирован слой будущей детали, согласно цифровой модели; платформа опускается, наносится новый слой порошка, и процесс повторяется до полного построения изделия; готовое изделие извлекается из порошка и отправляется на постобработку (если необходимо).

Чрезвычайно важно осуществлять контроль деталей, формируемых с использованием аддитивных технологий, на наличие дефектов [3]. Дефект – это каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям [1].

Наличие дефектов оказывает прямое влияние на качество конечных изделий, затрагивая их механические свойства, внутреннее строение, геометрическую точность, эксплуатационные характеристики. Например, высокая пористость может снижать механическую прочность литейной формы, что повлияет на качество отливки. Низкая газопроницаемость форм может приводить к накоплению газов при заливке металла, что приведет к образованию пор. Неравномерное распределение связующего может повлиять на прочность, привести к осыпанию формы или снизить размерную точность.

Классификацию дефектов в аддитивном производстве можно представить в виде зависимости от следующих причин – технология изготовления, материал и ошибки в проектировании изделия. Существуют различные подходы к систематизации таких дефектов, включая их разделение по размеру, природе возникновения, типу материала, местоположению и другим критериям.

В результате анализа литературных источников мы не выявили систематизации дефектов изделий, получаемых по технологии Binder Jetting. В ГОСТ Р 58418-2019 установлена классификация, виды дефектов для металлических порошков, порошковых композиций и проволок для аддитивных технологических процессов [2].

В своей работе мы предлагаем выделить четыре группы дефектов:

1. Несоответствие по геометрии (дефекты, связанные с нарушением конфигурации, неточностью размеров и массы изделия);

2. Дефекты поверхности (дефекты, связанные с повреждением или отклонение формы поверхности изделия);

3. Несплошности в теле изделия (дефекты в виде пор, трещин и других дефектов внутри изделия);

4. Прочие дефекты.

В каждой группе мы определили дефекты, которые представлены в таблице 1 (вылом, линейное смещение слоя, грубая поверхность, поверхностное повреждение, трещина, пористость, расслоение, неоднородность структуры, хрупкость) и причины, влияющие на образование того или иного дефекта (материал, технология изготовления, ошибки при проектировании изделий).

В результате комплексной систематизации для каждого дефекта мы определили причину, влияющую на его возникновение.

Технология Binder Jetting открывает широкие возможности для производства изделий сложной геометрии из различных материалов. Однако качество конечных изделий напрямую зависит от множества факторов. Проведённый анализ позволил выявить ключевые причины, влияющие на возникновение дефектов при производстве изделий из песчано-полимерных материалов по этой технологии. Разработанная классификация дефектов по четырем группам позволила систематизировать дефекты и причины их появления.

Таблица 1. Дефекты изделий из песчано-полимерных материалов и причины их возникновения

№	Дефект	Причины, влияющие на возникновение дефекта		
		Материал	Технология изготовления	Ошибки при проектировании изделия
Несоответствие по геометрии				
1	Вылом	+	+	+
2	Линейное смещение слоя	+	+	
Дефекты поверхности				
1	Грубая поверхность	+	+	
2	Поверхностное повреждение	+		+
Несплошности в теле изделия				
1	Трещина	+	+	+
2	Пористость	+		
3	Расслоение	+	+	
Прочие дефекты				
1	Неоднородность структуры	+	+	
2	Хрупкость	+	+	

Такая структурированная классификация служит не только теоретической базой, но и практическим инструментом для быстрой диагностики и выбора корректирующих мероприятий. Она позволяет оперативно соотнести наблюдаемый дефект с наиболее

вероятной причиной его возникновения и выбрать эффективные корректирующие мероприятия, направленные на оптимизацию технологического процесса и повышение качества готовых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ 5467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 21 с.

2) ГОСТ Р 58418-2019. Аддитивные технологии. Металлические порошки и проволоки. Виды дефектов. Классификация, термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 8 с.

3) Иванов, А.Д. Неразрушающий контроль изделий, изготовленных с использованием аддитивного производства оптическими методами / А.Д. Иванов, В.Л. Минаев, Г.Н. Вишняков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85, № 10. – С. 76–82.

4) Карташев, Д.И. Современные технологии в литейном производстве / Д.И. Карташев // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». – 2020. – №11. – С. 225–229.

УДК 658.512.4.07

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.В. Родин, **Д.В. Наумов**

Научный руководитель – **Д.В. Наумов**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В работе рассматриваются теоретические и прикладные аспекты цифровой трансформации судостроительных предприятий как фактора повышения конкурентоспособности высокотехнологичного машиностроения. Обосновано, что ключевым ограничением развития отрасли является фрагментарный характер внедрения информационных технологий и отсутствие единого информационного пространства.

Ключевые слова: *цифровая трансформация; судостроение; высокотехнологичное машиностроение; информационные системы; PLM; MES; ERP; цифровое производство; конструкторско-технологическая подготовка производства; цифровые двойники; управление на основе данных; социально-экономические системы; цифровая зрелость*

DIGITAL TRANSFORMATION OF SHIPBUILDING ENTERPRISES AS A FACTOR IN INCREASING THE COMPETITIVENESS OF HIGH-TECH MACHINE-BUILDING

A.V. Rodin, D.V. Naumov

Scientific Supervisor – **D.V. Naumov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

Abstract: The paper examines theoretical and applied aspects of digital transformation of shipbuilding enterprises as a factor in enhancing the competitiveness of high-tech manufacturing. It is substantiated that the key limitation of industry development is the fragmented implementation of information technologies and the lack of an integrated information environment.

Keywords: *digital transformation; shipbuilding; high-tech manufacturing; information systems; PLM; MES; ERP; digital production; engineering and technological preparation of production; digital twins; data-driven decision-making; socio-economic systems; digital maturity*

Современный этап развития высокотехнологичного машиностроения характеризуется усилением глобальной конкуренции, ускорением технологических циклов и переходом к цифровым моделям организации производства. В данных условиях судостроительная промышленность, обладающая высокой капиталоёмкостью, длительными производственными циклами и значительной долей уникальных заказов, становится одной из наиболее чувствительных к уровню цифрового развития отраслей. Несмотря на наличие существенного научно-технического задела и компетенций в области создания сложной морской техники, отечественные судостроительные предприятия демонстрируют ограниченную конкурентоспособность в гражданском сегменте, что обусловлено как технологическими, так и организационно-экономическими факторами [1].

К числу ключевых проблем следует отнести высокую трудоёмкость производства, длительные сроки проектирования и строительства, низкую степень стандартизации процессов, а также фрагментарное внедрение информационных технологий. Особенностью текущего состояния является наличие разрозненных информационных систем, не объединённых в единое информационное пространство, что приводит к дублированию данных, снижению прозрачности процессов и росту транзакционных издержек. Дополнительным ограничением выступает сохранение гибридной модели документооборота, при которой цифровые решения сосуществуют с бумажными практиками, что нивелирует потенциальный эффект от внедрения информационных технологий [2].

В данном контексте цифровая трансформация должна рассматриваться не как внедрение отдельных программных продуктов, а как комплексная трансформация архитектуры предприятия, затрагивающая технологические, организационные и управленческие аспекты. Существенным является переход от автоматизации отдельных функций к построению сквозных цифровых процессов, обеспечивающих непрерывность информационных потоков на всех этапах жизненного цикла продукции.

С точки зрения теории социально-экономических систем цифровая трансформация судостроения выступает как механизм повышения эффективности взаимодействия элементов производственной системы, включая технологические подсистемы, управленческие структуры и человеческий капитал. Информационные технологии в данном случае приобретают свойства технологии общего назначения, эффект от которой проявляется только при их системной интеграции в бизнес-процессы предприятия. Частичное внедрение цифровых решений, не сопровождаемое изменением организационной структуры и процессов, приводит к эффекту «парадокса производительности», при котором инвестиции в ИТ не обеспечивают значимого роста эффективности [3].

Анализ практик функционирования судостроительных предприятий показывает, что наибольшие потери эффективности возникают на этапе конструкторско-технологической подготовки производства, где наблюдается разрыв между этапами проектирования, планирования и производства. Отсутствие единой среды управления данными об изделии приводит к тому, что информация многократно вводится вручную, что увеличивает вероятность ошибок и снижает скорость обработки данных. Кроме того, использование различных CAD-систем без унификации стандартов обмена данными затрудняет взаимодействие между подразделениями и снижает управляемость проектами.

Ключевым направлением повышения эффективности является формирование интегрированного цифрового контура предприятия, основанного на взаимодействии систем управления жизненным циклом продукции (PLM), управления производственными процессами (MES) и ресурсного планирования (ERP). Такая интеграция позволяет обеспечить сквозную прослеживаемость данных, повысить согласованность решений и сократить временные лаги между этапами производства. При этом важным условием является переход от документ-ориентированной модели к модели, основанной на управлении данными, где первичной становится информация, а не её представление в виде документа [4].

Важным элементом цифровой трансформации является внедрение технологий цифрового моделирования и виртуального прототипирования, позволяющих осуществлять предварительную оценку технических и экономических параметров продукции. Использование методов численного моделирования и цифровых двойников обеспечивает снижение затрат на испытания, уменьшение количества доработок и повышение качества конечной продукции. В условиях низкой серийности и высокой сложности изделий это становится критическим фактором повышения конкурентоспособности.

Особое значение приобретает развитие адаптивных производственных систем, способных оперативно реагировать на изменения внешней среды. Адаптивность в данном контексте понимается как способность предприятия не только изменять параметры функционирования, но и трансформировать внутренние процессы в ответ на внешние вызовы. Цифровые технологии обеспечивают основу для реализации таких систем за счёт накопления и анализа данных, а также использования интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решений.

Систематизация ключевых проблем и направлений цифровой трансформации судостроительных предприятий представлена в табл. 1.

Представленная систематизация демонстрирует, что цифровая трансформация носит комплексный характер и требует синхронного развития технологической, информационной и организационной составляющих. При этом ключевым фактором успеха является не столько внедрение конкретных технологий, сколько формирование целостной цифровой экосистемы предприятия.

Таблица 1. Систематизация проблем и направлений цифровой трансформации судостроительных предприятий

Проблемная область	Проявления	Причины	Направления цифровой трансформации	Ожидаемый эффект
Информационная разрозненность	Дублирование данных, отсутствие единой версии информации	Разрозненные ИС, отсутствие интеграции	Внедрение единого информационного пространства (PLM–MES–ERP)	Повышение прозрачности и согласованности данных
Низкая эффективность КТПП	Длительные сроки подготовки, ошибки в документации	Ручной ввод данных, отсутствие цифровых моделей	Автоматизация КТПП, внедрение цифровых двойников	Сокращение сроков и снижение ошибок
Гибридный документооборот	Бумажные и цифровые процессы сосуществуют	Отсутствие нормативной базы и цифровых стандартов	Переход к data-centric модели управления	Снижение транзакционных издержек
Низкая адаптивность производства	Задержки при изменении требований заказчика	Жёсткая структура процессов	Внедрение адаптивных ИС и аналитики данных	Повышение гибкости производства
Недостаточная интеграция CAD/CAE	Проблемы обмена данными между системами	Отсутствие унифицированных стандартов	Унификация цифровых платформ и форматов данных	Ускорение проектирования
Ограниченное использование аналитики	Решения принимаются интуитивно	Недостаток данных и инструментов анализа	Внедрение BI и DDD-подхода	Повышение качества управления

На уровне социально-экономических систем цифровая трансформация судостроения оказывает мультипликативный эффект, способствуя развитию смежных отраслей, повышению технологической независимости и формированию новых моделей кооперации. Интеграция цифровых решений в производственные процессы обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов, сокращение издержек и рост добавленной стоимости продукции.

Таким образом, цифровая трансформация судостроительных предприятий выступает не только инструментом повышения операционной эффективности, но и ключевым фактором структурной модернизации социально-экономических систем, обеспечивая формирование новых механизмов создания стоимости в промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Анализ состояния и развития судостроительной отрасли // Комитет по промышленности и торговле Государственной Думы РФ: [сайт]. – URL: http://komitet-promtorg.duma.gov.ru/novosti/ea68164d-43ed-4f92-8c18-390966e39a61 (дата обращения: 02.12.2025)

2) Правительство актуализировало Стратегию развития судостроительной промышленности. Распоряжение от 12 мая 2025 года №1181-р // Правительство России: [сайт]. – URL: http://government.ru/docs/54990/ (дата обращения: 26.11.2025).

3) Родин, А.В. Разработка формата обмена данными между проектантом и предприятием-изготовителем, обеспечивающего сокращение сроков технологической подготовки судостроительного производства / А.В. Родин, Т.Д. Кожина // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2019. – № 2(49). – С. 39-47.

4) Влияние цифровой трансформации на финансовые показатели компании / Е.И. Воеводина, Д.В. Наумов, Р.В. Колесов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2024. – № 12. – С. 17-21. – DOI: 10.17513/fr.43733.

УДК 006.87

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

М.А. Сапцов, С.А. Соловьева

Научный руководитель - **С.А. Соловьева**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Проведен анализ взаимосвязи стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и логистических процессов в организации. Выявлены требования пунктов ГОСТ Р ИСО 9001-2015, которые помогают повысить прозрачность логистической деятельности и минимизировать потери из-за неэффективных процессов или некачественной продукции.

Ключевые слова: *логистика, система менеджмента качества, требования*

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN LOGISTICS

M.A. Saptsov, S.A. Solovyeva

Scientific Supervisor - **S.A. Solovyeva**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

An analysis of the relationship between the GOST R ISO 9001-2015 standard and logistics processes in the organization was carried out. The requirements of clauses of GOST R ISO 9001-2015 have been identified, which help to increase the transparency of logistics activities and minimize losses due to ineffective processes or low-quality products.

Keywords: *logistics, quality management system, requirements*

Система менеджмента качества (СМК) представляет собой совокупность процессов, правил и документов, обеспечивающих стабильное качество продукции и услуг, эффективное управление ресурсами и удовлетворение требований заинтересованных сторон.

СМК позволяет организации:

- устанавливать цели и определять необходимые ресурсы;
- управлять взаимосвязанными процессами;
- снижать риски и издержки;
- повышать эффективность деятельности и качество результатов.

Основой СМК в Российской Федерации является стандарт ГОСТ Р ИСО 9001–2015, на базе которого создаются системы управления качеством в различных отраслях с учетом их специфики. В настоящий момент существует множество систем менеджмента, детализирующих требования ГОСТ Р ИСО 9001 применительно к конкретным отраслям. Фрагмент перечня систем менеджмента и объекты, на которые они распространяются, приведен в таблице 1.

Логистика представляет собой управление материальными и связанными с ними информационными потоками. Значимость логистики особенно велика в России из-за больших расстояний между производителями и потребителями, а также особенностей транспортной инфраструктуры. Основная цель логистики - обеспечение эффективной работы предприятия при минимальных затратах.

Логистическая деятельность – это организация взаимодействия различных подразделений предприятия и внешних организаций для эффективного продвижения ресурсов и готовой продукции по цепи «закупки – производство – распределение – продажа». Она охватывает весь процесс движения продукции, обеспечивающих управление материальными потоками на всех стадиях – от закупки до реализации, включая управление

потоками и координацию этапов. Сущность логистической деятельности заключается в обеспечении согласованного взаимодействия этих этапов.

Таблица 1. Перечень систем менеджмента и объекты, на которые они распространяются

Система менеджмента	Стандарты, описывающие систему	Объект
Система менеджмента качества	ГОСТ Р ИСО 9000-2015 ГОСТ Р ИСО 9001-2015 ГОСТ Р ИСО 9004-2019 ГОСТ Р ИСО 19011-2021	Процессы организации, продукция и услуги, которые предназначены или затребованы потребителем
Система экологического менеджмента	ГОСТ Р ИСО 14001-2016 ГОСТ Р ИСО 14004-2017 ГОСТ Р ИСО 14006-2022 ГОСТ Р ИСО 14040-2022 ГОСТ Р ИСО 14050-2023	Экологические результаты деятельности организации, экологические аспекты деятельности организации
Система менеджмента охраны труда	ГОСТ Р ИСО 45001-2020	Безопасные и благоприятные условия труда и предотвращение производственный травм и ущерба для здоровья, а также принятия предупреждающих мер по улучшению показателей в области ОЗБТ
Система информационной безопасности	ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000-2021 ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021 ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002-2021 ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010	Информационные риски, конфиденциальность, целостность и доступность информации
Системаэнергоменеджмента	ГОСТ Р ИСО 50001-2023 ГОСТ Р ИСО 50004-2022 ГОСТ Р ИСО 50006-2023	Энергетическая результативность
Система менеджмента рисков	ГОСТ Р ИСО 31000-2019	Любые типы риска, которым подвержена организация
Система менеджмента цепи поставок	ГОСТ Р ИСО 28000-2019 ГОСТ Р ИСО 28001-2019 ГОСТ Р ИСО 28004-2019	Любые аспекты, затрагивающие цепи поставок

Первым этапом является планирование логистической деятельности, которое предполагает разработку стратегий и процессов управления потоками. Организация определяет требования к продукции, устанавливает критерии приемки и объем необходимых ресурсов для реализации материальных потоков.

Второй этап – закупки, направленные на обеспечение организации необходимыми материалами и услугами. Организация должна оценивать и выбирать поставщиков, контролировать их деятельность и обеспечивать соответствие поставляемой продукции установленным требованиям, а также документировать результаты.

Третий этап – управление инфраструктурой, включающей здания, оборудование, транспорт и информационные технологии. Управление направлено на поддержание их работоспособности, проведение обслуживания и создание условий для стабильного функционирования процессов и безопасности персонала.

Четвертый этап – производство продукции, представляющее собой преобразование ресурсов в готовую продукцию в управляемых условиях. Это требует наличия необходимой документации, ресурсов, контроля качества, компетентного персонала и мероприятий по предотвращению ошибок.

Пятый этап – идентификация и прослеживаемость, позволяющие отслеживать движение продукции на всех стадиях за счет присвоения уникальных обозначений серий, партий для возможности отслеживания всей истории ее движения.

Шестой этап – управление собственностью потребителей и поставщиков. Организация обязана обеспечивать сохранность, защиту и правильное использование переданных ресурсов, а также фиксировать случаи их повреждения или утраты.

Седьмой этап – сохранение продукции, включающее хранение, упаковку, погрузочно-разгрузочные работы, транспортировку и защиту продукции от повреждений и загрязнений с соблюдением установленных требований.

Восьмой этап – деятельность после поставки, которая учитывает требования законодательства, ожидания потребителей, особенности продукции и обратную связь.

Девятый этап – документирование и управление информацией. Он включает фиксацию, хранение, защиту и контроль информации, связанной с процессами и продукцией, обеспечивая доказательство соответствия установленным требованиям.

Таким образом, логистическая деятельность охватывает все ключевые процессы: планирование, закупки, управление инфраструктурой, производство, контроль продукции, её сохранение, поставку и информационное сопровождение.

В настоящее время в Российской Федерации и на международном уровне отсутствует отдельная система менеджмента качества, полностью ориентированная на логистическую деятельность. Несмотря на существование инициатив, таких как ISO/TC 344 «Innovativelogistics» и разработки китайского секретариата SAC, единый общепринятый стандарт в данной области не сформирован.

В связи с этим, для регулирования качества логистических процессов на практике применяется ГОСТ Р ИСО 9001-2015, который охватывает деятельность организации в целом, включая процессы, связанные с движением продукции и ресурсов, не выделяя отдельно те элементы деятельности, на качество которых необходимо обращать внимание именно в логистической деятельности.

Применение ГОСТ Р ИСО 9001-2015 позволяет обеспечить выполнение требований к продукции и услугам, контроль всех этапов движения материальных потоков и документальное подтверждение соответствия процессов установленным критериям. Таким образом, при отсутствии специализированной СМК в логистике, необходимо детальное изучение данного стандарта для поиска оптимальных инструментов управления и обеспечения качества логистической деятельности.

С целью выделения требований СМК, применяемых в логистической деятельности, нами был проанализирован ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Соответствие выявленных требований ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и элементов логистической деятельности приведено в табл. 2.

Таблица 2. Требования ГОСТ Р ИСО 9001–2015, распространяющиеся на элементы логистической деятельности

Элемент логистической деятельности	Требования ГОСТ Р ИСО 9001-2015 к элементу
Планирование	П. 8.1: - планирование, внедрение и управление процессами, необходимыми для выполнения требований к поставке продукции и предоставлению услуг; - определение требований к продукции и услугам; - установление критериев для процессов и приемки услуг и продукции; - определение ресурсов, необходимых для достижения соответствия требованиям к продукции и услугам; - управление процессами в соответствии с установленными критериями; - определение, разработка, актуализация и применение, а также регистрирование и сохранение документированной информации в необходимом объеме; - определение формы результатов планирования, подходящей для деятельности организации; - управление запланированными изменениями и анализ последствий непредусмотренных изменений; - управление процессами, переданными внешним организациям.

Продолжение таблицы 1

Закупки	П. 8.4: - обеспечение соответствия процессов, продукции и услуг, поставляемых внешними поставщиками, требованиям; - определение и применение критериев оценки, выбора, мониторинга результатов деятельности, а также повторной оценки внешних поставщиков; - регистрация и сохранение документированной информации.
Инфраструктура	П. 7.1.3: - определение, создание и поддерживание инфраструктуры, необходимой для функционирования ее процессов.
Производство продукции	П. 8.5.1: - осуществление производства продукции и предоставления услуг в управляемых условиях. Управляемые условия должны включать в себя, насколько это применимо: - документированную информацию, определяющую: а) характеристики производимой продукции, предоставляемых услуг или осуществляемой деятельности; б) результаты, которые должны быть достигнуты; - доступность и применение ресурсов, подходящих для осуществления мониторинга и измерений; - осуществление деятельности по мониторингу и измерению на соответствующих этапах; - применение соответствующей инфраструктуры и среды для функционирования процессов; - назначение компетентного персонала, включая любую требуемую квалификацию; - валидацию и периодическую повторную валидацию способности процессов производства продукции и предоставления услуг в тех случаях, когда конечный выход не может быть верифицирован последующим мониторингом или измерением; - выполнение действий с целью предотвращения ошибок, связанных с человеческим фактором; - осуществление выпуска, поставки и действий после поставки.
Идентификация и прослеживаемость продукции	П. 8.5.2: - использование подходящих способов для идентификации выходов, когда это необходимо для обеспечения соответствия продукции и услуг; - идентификация статуса выходов по отношению к требованиям, относящимся к мониторингу и измерениям, по ходу производства продукции и предоставления услуг; - управление специальной идентификацией выходов, когда прослеживаемость является требованием; - регистрация и сохранение документированной информации, необходимой для обеспечения прослеживаемости.
Управление предоставленной собственностью потребителей и поставщиков	П. 8.5.3: - забота о собственности потребителей или внешних поставщиков, когда она находится под управлением организации или используется ею; - идентификация, верификация, сохранение и защита собственности потребителя или внешнего поставщика, предоставленной для использования или включения в продукцию и услуги; - уведомление потребителя или внешнего поставщика в случае, когда собственность потребителя или внешнего поставщика утеряна, повреждена или признана непригодной для использования; - регистрация и сохранение документированной информации о случаях, когда собственность потребителя или внешнего поставщика утеряна, повреждена или признана непригодной для использования.

Окончание таблицы 1

Сохранение продукции	П. 8.5.4: - сохранение выходов во время производства продукции и предоставления услуг в той мере, насколько это будет необходимым для обеспечения соответствия требованиям.
Деятельность после поставки	П. 8.5.5: - выполнение требований к деятельности, связанной с продукцией и услугами, после того, как они были поставлены.
Документирование и управление информацией	П. 7.5: - документированная информация, требуемая настоящим стандартом; - документированная информация, определенная организацией как необходимая для обеспечения результативности системы менеджмента качества. П. 7.5.3.2: - управление документированной информацией; - защита документированной информации от непредумышленных изменений в случае ее сохранения в качестве свидетельств соответствия.

В связи с тем, что система менеджмента качества, полностью описывающая только логистическую деятельность на данный момент, отсутствует, то исследование по выявлению требований к ее элементам является достаточно актуальным, так как позволяет систематизировать одновременно множество направлений деятельности, реализуемой предприятием, тем самым повысить качество ее результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Гаджинский А.М. Логистика: учебник. – URL: https://www.booksite.ru/fulltext/logist/text.pdf

2) ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 24 с.

3) ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 32 с.

4) ГОСТ Р ИСО 45001-2020. Системы менеджмента безопасности труда и здоровья. Требования и руководство по применению. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 33 с.

5) ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования.- Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 24 с.

6) ГОСТ Р ИСО 50001-2023. Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению. – Москва: Российский институт стандартизации, 2023. – 30 с.

7) ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 14 с.

8) ГОСТ Р ИСО 28001-2019. Системы менеджмента цепи поставок. Наилучшие практики осуществления безопасности цепи поставок, оценки и планов безопасности. Требования и руководство по применению. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 25 с.

9) Данильченко, М.А. Роль логистических систем в современной экономике / М.А. Данильченко, Ю.А. Данилова. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rol-logisticheskih-sistem-v-sovremennoy-ekonomike/viewer (дата обращения 01.03.2026)

УДК 621.833.22

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ МАССЫ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В РЕДУКТОРЕ

К.И. Тележкина

Научный руководитель – **А.А. Кулебякин**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье решается задача снижения массы ведущего зубчатого колеса конического редуктора для колесного устройства противоскольжения. В ходе работы были рассмотрены методы снижения массы деталей. Выбраны наиболее подходящие и рациональные методы для поставленной задачи. Также был проведен анализ напряжений в зубчатом колесе под воздействием внешних сил методом конечных элементов в «T-FLEX CAD 17». По результатам анализа был выбран новый материал для изготовления колеса и выполнено его изменение геометрической формы.

Ключевые слова: *зубчатое колесо, коническая передача, редуктор, снижение массы, полимерный материал, прочностной анализ*

METHODS OF REDUCING THE MASS OF GEAR WHEELS IN A GEARBOX

K.I. Telezhkina

Scientific Supervisor – **A.A. Kylebyakin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article solves the problem of reducing the mass of the leading gear wheel of a bevel gearbox for a wheel anti-skid device. During the work, methods for reducing the mass of parts were considered. The most suitable and rational methods for the task were selected. The analysis of stresses in the gear wheel under the influence of external forces was also performed using the finite element method in T-FLEX CAD 17. Based on the results of the analysis, a new material was selected for the wheel and its geometric shape was modified.

Keywords: *gear wheel, bevel gear, gearbox, weight reduction, polymer material, strength analysis*

Снижение массы конструкции с сохранением требуемых прочностных характеристик является одним из важных аспектов в формировании стоимости изделия, что особенно актуально при изготовлении деталей из дорогостоящих материалов (например, титановых сплавов). Также существенное влияние на стоимость изготовления деталей оказывают технологии производства. Поэтому необходимо делать рациональный выбор способа изготовления детали и ее конструкции.

При конструировании привода с одноступенчатым коническим редуктором для колесного устройства противоскольжения возникла необходимость существенного снижения массы из-за ограничения общей массы изделия согласно техническому заданию. Основная доля массы приходится на ведущее колесо (рис. 1), которое имеет внешний делительный диаметр d_e = 320 мм и при изготовлении из низкоуглеродистой конструкционной стали массу 11,2 кг. Требуется без увеличения стоимости изготовления снизить его массу, по предварительным расчетам она должна быть 1,3…1,5 кг. Но при этом из-за конструктивных особенностей устройства противоскольжения нет возможности изменить геометрические параметры зубчатого колеса, которые позволили бы сделать конструкцию редуктора более компактной, а, следовательно, более легкой.

Для решения этой задачи есть два метода:

1. Метод замены исходного материала всей конструкции детали или ее какой-либо части на материал с меньшей плотностью;

2. Методы уменьшения объема детали (конструктивные решения с изменением геометрической формы):

а) Метод топологической оптимизации с помощью CAE-систем;
б) Создание перфораций и фигурных вырезов;
в) Использование ребер жесткости и сотовых структур;
г) Применение тонкостенной конструкции и др.

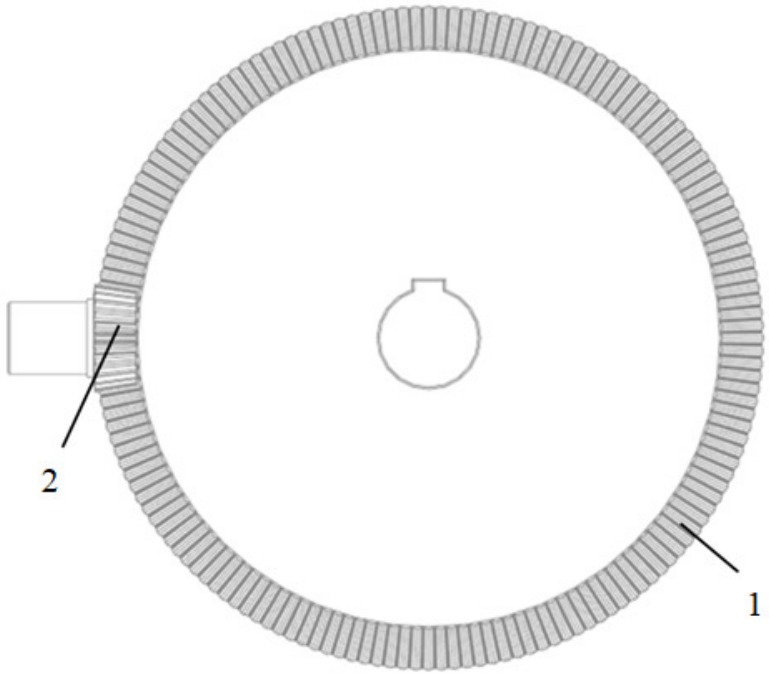


Рис. 1. Коническая зубчатая передача:
1 – ведущее колесо, 2 – ведомое колесо

1. Подбор нового материала.

В соответствии с исходным материалом альтернативным металлическим сплавом может быть сплав из алюминия. Масса колеса при этом составит 4 кг, т.е. уменьшится на 64%, но стоимость изготовления возрастет минимум в 2-3 раза, что не подходит для разрабатываемого изделия.

Известно, что для изготовления зубчатых колес также можно применять неметаллические материалы органического происхождения, а именно полимерные конструкционные материалы (ПКМ), которые обладают следующими достоинствами: малая плотность, отсутствие необходимости в смазке (так как низкий коэффициент трения), коррозионная стойкость.

Изготавливают детали из таких материалов следующими способами:

а) экструзия;
б) литье под давлением;
в) термоформование;
г) прессование;
д) механическая обработка полимера в виде листов, стержней и т.д.;
е) 3D-печать.

Самым простым способом изготовления из ПКМ является 3D-печать, так как отсутствует необходимость выбора и/или проектирования оснастки, приспособлений, что напрямую повышает затраты на изготовление и усложняет процесс производства. В табл. 1 приведено сравнение материалов для 3D-печати технологией FDM, которая является самой распространенной и простой.

Таблица 1. Материалы для 3D-печати

Характеристики	Материалы					
	PLA	ABS	PETG	Nylon	PC	PEEK
Температура печати, °C	190-220	220-260	230-250	240-260	260-300	370-450
Максимальная рабочая температура, °C	50-60	85-100	70-80	80-150	115-130	260
Плотность, г/см^3	1,24	1,04	1,27	1,10	1,20	1,31
Предел прочности на растяжение, МПа	35-60	30-45	45-60	60-90	55-75	90-100
Предел прочности на изгиб, МПа	55-80	60-75	70-90	70-100	90-105	160-170
Ударная вязкость, кДж/м^2	5-20	105-320	85-100	80-450	600-850	6
Тенденция к деформации	низкая	высокая	низкая	средняя	высокая	высокая
Адгезия между слоями	высокая	средняя	высокая	средняя	средняя	средняя
Постобработка	-	+	+	+	+	±
Примечания к постобработке: «+» – проходит отлично, «±» – возможна, «-» – затруднительна.						

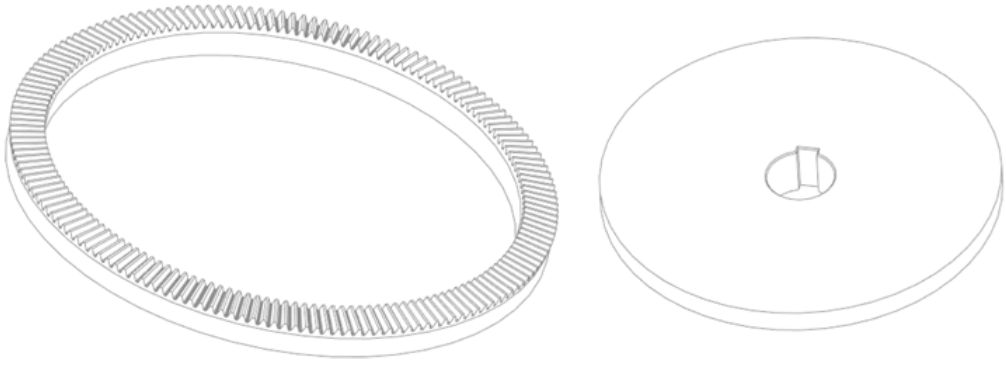
Наиболее подходящим материалом из представленных является Nylon, так как обладает высокой прочностью и ударной вязкостью, малой плотностью, достаточной рабочей температурой, а также не имеет существенных сложностей во время печати (в отличие от PEEK, требующего очень высокую температуру печати и чувствителен к перепадам температур окружающей среды) и отлично обрабатывается механически.

Стоит отметить, что Nylon имеет два варианта композита с увеличенной прочностью, но более высокой стоимостью:

– с добавлением стекловолокна;

– с добавлением углеродного волокна.

Если ведущее колесо изготавливать монолитно из обычного Nylon, то масса будет 1,6 кг. А при изготовлении, допустим, металлического кольца из алюминия и диска из Nylon (рис. 2), то общая масса колеса будет равна 2,1 кг. Конечный выбор определяется после исследования напряжений методом конечных элементов (МКЭ).



а б

Рис. 2. Элементы конструкции ведущего колеса:
а – кольцо с зубчатым венцом; б – диск

2. Анализ напряжений методом конечных элементов.

Анализ напряжений в зубчатом колесе МКЭ был проведен в «T-FLEXCAD 17» с помощью модуля «T-FLEX Анализ». Были определены эквивалентные напряжения монолитного колеса из Nylon. Результаты представлены на рис. 3. У основания зубьев возникают наибольшие напряжения (46,39 МПа), которые могут приводить к излому зубьев

при превышении предельно допустимых напряжений. Для Nylon полученный результат не превышает допустимые, следовательно, нет необходимости упрочнять зубчатый венец и можно колесо изготавливать полностью из выше указанного полимера.

3. Изменение конструкции зубчатого колеса.

Для снижения массы ведущего колеса до требуемого значения после замены материала необходимо использовать какое-либо конструктивное решение с изменением геометрической формы. Так как напряжения сосредоточены на зубьях, то нет необходимости применять сложные методы, достаточно добавить несколько сквозных отверстий. Добавим 8 отверстий криволинейной формы. Новая конструкция ведущего колеса представлена на рис. 4. Масса в данном случае будет равна 1,41 кг, что укладывается в установленный диапазон по расчетам.

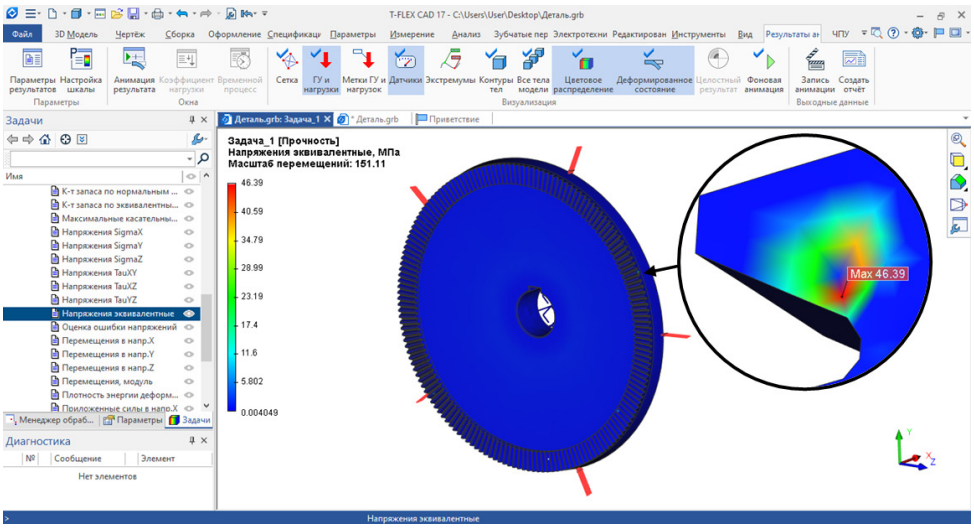


Рис. 3. Результат анализа МКЭ в «T-FLEX CAD 17»

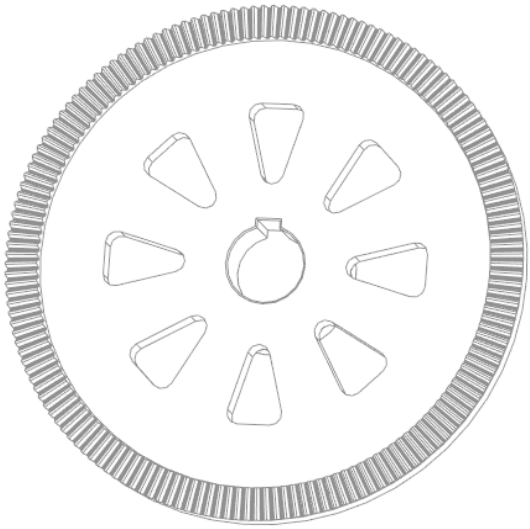


Рис. 4. Новая конструкция колеса

Таким образом, были рассмотрены методы снижения массы деталей, из них были выбраны метод замены материала и метод уменьшения объема с помощью создания фигурных вырезов у рассматриваемого зубчатого колеса конического редуктора. Выполнен анализ напряжений методом конечных элементов, выбран Nylon в качестве нового материала и получена новая конструкция колеса, что в совокупности позволило снизить его массу на 87%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Анфимов, М.И. Редукторы. Конструкции и расчет: Альбом / М.И. Анфимов. – 4.изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 463 с.: ил.

2) Карапетян, А.Н. Выбор полимерных материалов при конструировании зубчатых колес / А.Н. Карапетян, Г. Шарр // Известия НАН РА и ГИУА. – Серия ТН. – 2007. – Т. LX, № 2. – С. 266-271.

3) Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД / Д.Д. Попова, Н.А. Самойленко, С.В. Семенов, А,А. Балакирев, А.Ю. Головкин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 55. – С. 42-51.

4) Шестерни из полимерных материалов / Л.В. Смирнов, Н.Н. Кокушин, А.П. Батенев, Е.А. Ефимов // Вестник СПГУТД. – Серия 4. – 2022. – № 4. С. 26–30.

5) Старжинский, В.Е. Технология производства зубчатых колес из термопластичных полимерных материалов (обзор) / В.Е. Старжинский, С.В. Шилько, Е.В. Шалобаев // Полимерные материалы и технологии. – 2018. – Т.4, № 2. – С. 6-31.

6) Таблицы свойств конструкционных материалов для 3D-печати // ООО «ИННЕР ИНЖИНИРИНГ»: [сайт]. – URL: https://inner.su/articles/tablitsy-svoystv-konstruktsionnykh-materialov-dlya-3d-pechati/?ysclid=mnfemdllql310962505 (дата обращения: 30.03.2026).

7) PEEK пластик для 3D принтера. Особенности, применение, настройки печати // 3DiY SHOP: [сайт]. – URL: https://3d-diy.ru/blog/peek-plastik-dlya-3d-printera-osobennosti-primenenie-nastrojki-pechati/?ysclid=mnffyndbvb798048171 (дата обращения 30.03.2026).

УДК 006:620.2

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

А.А. Тугаринова, В.А. Иванова

Научный руководитель – **В.А. Иванова**, д-р техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается систематизация материалов по классификационным признакам на основе анализа определений из нормативно-технической документации. Предложена структура классификационных признаков, объединенных в укрупненные группы: функционально-технологическую, структурно-составную, технологическую и оценочно-эксплуатационную. Выявлены взаимосвязи между признаками и обоснована необходимость применения многоуровневого подхода при описании материалов. Результаты исследования могут быть использованы при создании баз данных материалов, разработке классификаторов для цифровых платформ промышленности и в образовательных целях.

Ключевые слова: *классификация материалов, классификационные признаки, нормативная документация*

SYSTEMATIZATION OF CLASSIFICATION CHARACTERISTICS OF MATERIALS BASES ON THE ANALYSIS OF REGULATORY DOCUMENTATION

A.A. Tugarinova, V.A. Ivanova

Scientific Supervisor – **V.A. Ivanova**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the systematization of materials by classification characteristics based on the analysis of definitions from regulatory and technical documentation. A structure of classification characteristics is proposed, grouped into the following enlarged categories: functional-technological, structural-compositional, technological, and evaluation-operational. Interrelations between the characteristics are identified, and the necessity of applying a multilevel approach to describing materials is substantiated. The results of the study can be used in creating material databases, developing classifiers for digital industrial platforms, and for educational purposes.

Keywords: *classification of materials, classification characteristics, regulatory documentation*

В условиях цифровой трансформации промышленности и внедрения систем менеджмента качества на основе стандартов ISO 9001:2015 одной из ключевых задач является обеспечение однозначной идентификации понятия «материал» на всех этапах жизненного цикла продукции – от закупки сырья до утилизации готового изделия [30]. Многообразие существующих понятий и стандартных определений термина «материал» (далее – материал) требует разработки унифицированной системы классификационных признаков, которая позволяла бы:

– однозначно идентифицировать материал в документации системы менеджмента качества;

– стандартизировать требования к входному контролю материала;

– обеспечить сопоставимость данных о свойствах материалов от разных поставщиков.

Однако анализ существующей нормативной базы показывает, что определения одного и того же материала в разных стандартах могут описываться различными наборами характеристик, которые необходимо систематизировать. Целью работы является выделение и структурирование классификационных признаков материалов на основе анализа определений из нормативно-технической документации.

Исследование базировалось на анализе определений материалов из действующих нормативных документов. Для каждого определения были выделены характеристики, которые затем сгруппированы в классификационные признаки. На основе проведенного анализа сформированы классификационные признаки, объединенных в четыре укрупненные группы (табл. 1).

Таблица 1. Систематизация классификационных признаков материала

Укрупненная группа классификационных признаков	Укрупненные классификационный признак	Классификационный признак
Группа 1. Функционально-технологические признаки. Данный блок характеризует назначение материала и его роль в производственном процессе.	***Назначение (отрасль промышленности).*** Признак определяет область применения (отрасль промышленности) материала и привязан к Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности (ОКВЭД 2) [32].	*Строительство и дорожное хозяйство:* грунтовые материалы (ОКВЭД 08.1) [35], теплоизоляционные материалы (ОКВЭД 23) [10], геосинтетика (оквэд 13.95) [20], золошлаковый (ОКВЭД 23.99) [33].
		Машиностроение и металлургия: проводниковые материалы (ОКВЭД 24.42, 27.33) [6], смазочные материалы (ОКВЭД 19.20) [7].
		Деревообработка и мебельная промышленность: древесные [2], кромочные [2], облицовочные [2, 13] материалы (ОКВЭД 16, 31).
		Оптика и электроника: оптические материалы [25] (ОКВЭД 23.19), диэлектрики (ОКВЭД 23.43) [5].
		Медицина: стоматологические полимерные [15] и металлические материалы [29] (ОКВЭД 21.20.2).
		Текстильная и легкая промышленность: нетканые, [31] эластичные материалы [27] (ОКВЭД 13).
	Способ использования в производстве. Признак описывает, для какой функции в производстве применяется материал.	*Образование покрытия* (лакокрасочные материалы [8])
		Облицовывание поверхности (кромочные [2], облицовочные [2, 13] материалы).
		Уменьшение трения (смазочные материалы [7]).
		Смягчение ударов (набивочные материалы [19]).
		Абразивная обработка (абразивные материалы [4]).
	Форма поставки. Форма поставки определяет логистические и технологические особенности применения.	*Жидкие и пастообразные материалы* (лакокрасочные материалы [8], смазочные [7], полимерные [15]).
		Сыпучие и порошковые (противогололедные реагенты [12], порошковые металлы [1], сухие строительные смеси [22]).
		Полосовые и рулонные (кромочные материалы [2], геосинтетика [23], облицовочные пленки [2, 13]), полимерная мембрана [пнст 922], нетканные материалы [34]).
		Листовые и плитные (облицовка [2, 13], настилочные материалы [2]).
		Волокна и нити (текстильные материалы [21]).
	Агрегатное состояние. Выделяется как самостоятельный признак для материалов, у которых агрегатное состояние критично для применения.	*Жидкие материалы* (противогололедные [12], наноматериал [16], нанопена [17]).
		Твердые материалы (противогололедные [12], наноматериал [16], нанопена [17], нанопористый материал [17].
		Газонаполненные материалы (нанопены [17]).
Группа 2. Структурно-составные признаки. Данный блок описывает внутреннее строение материала и его компонентный состав.	***Происхождение.*** Признак, который определяет, создан ли материал природой (и добыт человеком) или произведён человеком с использованием технологий.	*Природные (натуральные) материалы (*кромочные [2], облицовочные [2], геотекстильные [18], строительные [35], оптические [25], абразивные материалы [4]).
		Искусственные материалы (кромочные [2], облицовочные [2], строительные [35], абразивные [4] материалы).
		Синтетические материалы: (кромочные [2], облицовочные [2], оптические [25] материалы, геотекстиль [18]).
	Структура. Признак описывает морфологию материала.	*По типу:* ячеистая (пеностекло [13], ячеистые материалы [10]), мелкодисперсная (стеклокристаллические материалы [24]), волокнистая (нетканые материалы [31]), пористая (нанопористые материалы [17]), слоистая (многослойные текстильные материалы [34]).

		По фазовому составу: кристаллическая (стеклокристиллические [24], нанопористые [17], магнитные [3] материалы), стекловидная (стеклокристаллические материалы [24]), аморфная (нанопористый материал [17]), комбинированная (нанопористый материал [17]).
	Уровень структуры. Критически важный признак для современных материалов.	*Макроскопический*: композит [28].
		Микроструктурный: мелкодисперсные (стеклокристаллический материал [24]).
		Наноструктурный: наноматериалы [16], наноструктурированные материалы, нанопены, нанокомпозиты [17].
	Составляющие компоненты (состав). Признак описывает компонентный состав материала**.**	*Соединение двух материалов:* композиты [11, 28], многослойные текстильные материалы [34], комбинированные противогололедные [12]. *Соединение более двух материалов:* композиты [11, 28], полимерные материалы [26], порошковые материалы [1].
	Химический состав. Признак, который определяет природу материала.	*Неорганические и органические материалы*, а также указание на *конкретные химические соединения* (например, натрий-кальций-силикатное стекло для пеностекла [13]).
Группа 3. Технологические признаки. Признаки, характеризующие материал во время производства и жизненный цикл изделия из него.	***Технология получения.*** Определяет, технологию производства материала или изделия из него.	*Высокотемпературное вспенивание* (пеностекло [13]). *Полимеризация* (стоматологические материалы [26] и др.). *Спекание* (изделия из порошковых материалов [1]). *Обработка давлением и пропитка* (древесные материалы [2]).
	Этап использования в производстве. Позиционирование материала в производственном цикле.	*Сырьевые материалы [22, 25]*: исходные продукты. *Основные материалы [9]*: входят в массу готового изделия. *Вспомогательные материалы [9]*: расходуются в процессе производства изделия.
	Вид производства. Для материалов, ориентированных на конкретные технологии производства.	*Аддитивное строительное производство* (материалы для АСП [22]).
Группа 4. Оценочные и эксплуатационные признаки. Признаки, характеризующие свойства и условия применения.	***Физико-механические свойства.*** Внутренняя характеристика, не зависящая от формы и назначения.	*Электрические:* электропроводность (проводники [6]), диэлектрическая проницаемость (диэлектрики [5]). *Оптические:* показатель преломления, дисперсия, прозрачность, однородность (оптические материалы [25]). *Механические:* эластичность (настилочные материалы [2], эластичные материалы [27]), жесткость (пеностекло [13]), сыпучесть (комбинированные противоголедные материалы [12]). *Теплофизические:* теплоизоляция (теплоизоляционные материалы [10], пеностекло [13]), термопластичность (термопласты [14]). *Физические:* магнитность (магнитныематериалы [3]).
	Потребительские (функциональные, технологические) свойства. Способность материала выполнять свою работу в готовом изделии.	*Сцепное свойство*, *повышение шероховатости* (фрикционные материалы [12]). *Защитные свойства*: водонепроницаемость, ветрозащита (мембранные материалы [34]). *Снижение силы трения* (смазочные материалы [7]).

В ходе анализа были выявлены признаки, требующие дополнительного пояснения.

В определениях фрикционных и комбинированные противогололедных материалов [12] присутствует характеристика «сыпучие». Данный признак не является формой поставки (которая может быть россыпью или порошком) и не является свойством в классическом понимании. Предлагается рассматривать сыпучесть как технологическую характеристику, относящуюся к поведению материала при транспортировке и дозировании, и включать ее в блок технологических признаков.

Анализ показал, что в определениях материалов чаще указывается компонентный состав (из каких материалов или веществ состоит продукт), а не химический состав в

строгом смысле. Химический состав (например, «натрий-кальций-силикатное стекло» в [13]) встречается реже. Предлагается:

– «Составляющие компоненты» – признак, описывающий, из каких материалов/веществ состоит продукт (полимер с добавками, два и более материала, металлический порошок и др.).

– «Химический состав» – признак, указывающий конкретные химические соединения или классы соединений.

В результате проведенного анализа определений материала из нормативных нормативно-технических документов систематизированы классификационные признаки, объединенных в четыре укрупненные группы. Предложенная систематизация может быть использована для:

– создания унифицированных баз данных материалов в промышленности;

– разработки классификаторов для систем автоматизированного проектирования (САПР);

– совершенствования нормативно-технической документации в части терминологической согласованности;

– образовательных целей при изучении дисциплин материаловедческого профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ 17359-82. Порошковая металлургия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 24 с.

2) ГОСТ 17743-2016. Технология деревообрабатывающей и мебельной промышленности. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с.

3) ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 32 с.

4) ГОСТ 21445-84. Материалы и инструменты абразивные. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 25с.

5) ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения. – Москва: Издательство стандартов, 2001. — 14 с.

6) ГОСТ 22265-76. Материалы проводниковые. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 4 с.

7) ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 19 с.

8) ГОСТ 28246-2017. Материалы лакокрасочные. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 40 с.

9) ГОСТ 3.1109- 82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. –М.: Стандартинформ, 2012. – 12 с.

10) ГОСТ 31913 – 2022 (ISO 9229:2020). Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 24 с.

11) ГОСТ 32794-2014. Композиты полимерные. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 93 с.

12) ГОСТ 33387-2015. Дороги автомобильные общего пользования. Противогололедные материалы. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.

13) ГОСТ 33676-2015. Материалы и изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Классификация. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 3 с.

14) ГОСТ 34290-2017. Арматура трубопроводная. Клапаны мембранные из термопластичных материалов. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018. – 15 с.

15) ГОСТ 9.710- 84. Единая система защиты от коррозии и старения. Старение полимерных материалов. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 7 с.

16) ГОСТ ISO/TS 80004-1-2017. Нанотехнологии. Часть 1. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 3 с.

17) ГОСТ ISO/TS 80004-4-2016. Нанотехнологии. Часть 1. Материалы наноструктурированные. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 9 с.

18) ГОСТ Р 53225-2008. Материалы геотекстильные. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 10 с.

19) ГОСТ Р 53719-2009. Ресурсосбережение. Упаковка. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 10 с.

20) ГОСТ Р 55028-2012. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Классификация, термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 8 с.

21) ГОСТ Р 58828-2020. Судебная экспертиза волокнистых материалов и изделий из них. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 11 с.

22) ГОСТ Р 59095-2020. Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 14 с.

23) ГОСТ Р 70090-2022. Материалы геосинтетические бентонитовые рулонные для гидроизоляции. Общие технические условия. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 19 с.

24) ГОСТ Р 71073-2023. Материалы стеклокристаллические. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 7 с.

25) ГОСТ Р 71250-2024. Оптика и фотоника. Производство оптических материалов. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 23 с.

26) ГОСТ Р 71412-2024. Стоматология. Материалы на полимерной основе для коронок и облицовки. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 19 с.

27) ГОСТ Р ИСО 10765-2017. Обувь. Метод испытания для определения характеристик эластичных материалов. Характеристики растяжения. – М.: Стандартинформ, 2017. – 7 с.

28) ГОСТ Р ИСО 11224-2014. Материалы текстильные. Формирование и скрепление полотна в нетканых материалах. Словарь. – М.: Стандартинформ, 2015. – 6 с.

29) ГОСТ Р ИСО 22674-2013. Стоматология. Металлические материалы для несъемных и съемных протезов в конструкции. – М.: Стандартинформ, 2014. – 39 с.

30) ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 32 с.

31) ГОСТ Р ИСО 9092-2014. Материалы текстильные. Нетканые материалы. Определение. – М.: Стандартинформ, 2015. – 2 с.

32) ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2). Общероссийский классификатор видов экономической деятельности. – М.: Росстандарт, 2014.

33) ПНСТ 1003-2025. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы золошлаковые. Классификация. – М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2025 — 12 с.

34) ПНСТ 922-2024. Материалы текстильные многослойные с полимерной мембраной. Общие технические условия. – М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2025 — 12 с.

35) СП 11-109-98. Изыскания грунтовых строительных материалов. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 1998. – 29 с.

УДК 517.925

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕТОЧКИ ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Д.В. Удалов

Научный руководитель – **А.В. Оборин,** канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассмотрены современные программно-аппаратные комплексы, применяемые при производстве и переточке осевого режущего инструмента на многоосевых шлифовальных станках с ЧПУ. На основе анализа решений NUMROTO, GivealGrind N4B6, SYNTEC 210MA-E5 и SCHNEEBERGER Norma NGC с программным обеспечением Qg1 выявлены их функциональные возможности, технологические преимущества и ограничения. Показано, что эффективность инструментального производства в значительной степени определяется не только кинематикой оборудования, но и уровнем специализированного программного обеспечения, обеспечивающего моделирование геометрии инструмента, расчет траекторий и контроль технологического процесса.

Ключевые слова: *осевой режущий инструмент, шлифование, пятиосевой станок с ЧПУ, NUMROTO, SYNTEC, SCHNEEBERGER, автоматизация производства, переточка инструмента*

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEMS FOR THE PRODUCTION AND REGRINDING OF AXIAL CUTTING TOOLS

D. V. Udalov

Scientific Supervisor – **A.V. Oborin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article examines modern software and hardware systems used for the production and regrinding of axial cutting tools on multi-axis CNC grinding machines. Based on the analysis of NUMROTO, GivealGrind N4B6, SYNTEC 210MA-E5 and SCHNEEBERGER Norma NGC with Qg1 software, their functional capabilities, technological advantages and limitations are identified. It is shown that the efficiency of tool manufacturing depends not only on machine kinematics, but also on the level of specialized software that provides tool geometry modeling, toolpath calculation and process control.

Keywords*: axial cutting tool, grinding, 5-axis CNC machine, NUMROTO, SYNTEC, SCHNEEBERGER, production automation, tool regrinding*

В современном инструментальном производстве значимую роль играют многоосевые шлифовальные станки с числовым программным управлением и специализированное программное обеспечение, позволяющее проектировать геометрию режущего инструмента, рассчитывать траектории обработки и выполнять симуляцию технологического процесса. Актуальность темы определяется тем, что повышение точности, производительности и повторяемости параметров инструмента напрямую связано с уровнем автоматизации технологической подготовки производства. Официальные материалы NUM указывают, что пакет NUMROTO предназначен для производства и переточки широкого спектра инструментов, а SCHNEEBERGER характеризует Norma NGC как универсальный 5-осевой станок для производства и переточки режущего инструмента. Это подтверждает, что цифровое управление геометрией и траекториями сегодня выступает ключевым фактором качества инструментального производства.

Одним из наиболее известных специализированных решений является программный пакет NUMROTO. NUMROTO представляет собой комплексное программное обеспечение для производства и переточки широкого спектра инструментов; кроме того, компания

указывает на его использование на более чем 50 типах станков от 20 международных производителей. Для инструментального производства это важно, поскольку такая совместимость упрощает внедрение программного комплекса в различные производственные конфигурации и снижает зависимость от одного производителя оборудования.

С технологической точки зрения сочетание специализированного ПО и многоосевого оборудования обеспечивает решение сразу нескольких задач: формирование сложной геометрии режущей части инструмента, поддержание стабильного качества обработки и сокращение времени переналадки. Для предприятий, работающих с широкой номенклатурой осевого инструмента, это особенно важно, поскольку позволяет объединить изготовление нового инструмента и операции его восстановления в единой цифровой среде.

Еще одним направлением развития является применение универсальных систем ЧПУ с поддержкой многоосевой обработки. Контроллеры серии 210MA-E5 от компании SYNTEC поддерживают 5-осевую одновременную обработку, RTCP и многоосевую компоновку. Следовательно, такие системы могут выступать основой для создания гибких производственных комплексов, в которых функциональность определяется не только станком, но и конфигурацией управляющей системы и прикладного программного обеспечения.

Практическое значение систем данного класса состоит в том, что они позволяют адаптировать оборудование под конкретные производственные задачи, включая обработку сложных профилей инструмента и интеграцию дополнительных модулей автоматизации. Это позволяет сделать вывод о востребованности открытых и масштабируемых архитектур управления в тех случаях, когда предприятию необходимо сочетать достаточную точность обработки и более гибкую стоимость внедрения по сравнению с высокоспециализированными премиальными комплексами.

Отдельного внимания требуют решения SCHNEEBERGER. Для корректности следует отметить, что официальные материалы компании подтверждают универсальный 5-осевой станок Norma NGC для производства и переточки режущего инструмента, а также использование программного обеспечения Qg1 для программирования обработки и импорта 3D-моделей. На официальной странице Norma NGC прямо указано, что станок предназначен для производства и переточки осевого инструмента, а в справочной информации по ПО Qg1 показано применение этого ПО для обработки сложных деталей, включая импорт 3D-модели и автоматический расчет операций шлифования.

Это позволяет сделать важный вывод: на современном этапе конкурентоспособность программно-аппаратного комплекса определяется не только числом осей и мощностью шпинделя, но и глубиной интеграции программной среды с оборудованием. Если программное обеспечение поддерживает импорт геометрии, выбор зон обработки, моделирование траекторий и работу с измерительными подсистемами, то повышается устойчивость технологического процесса и снижается влияние человеческого фактора. Именно поэтому цифровая составляющая в инструментальном производстве сегодня становится не вспомогательным, а определяющим элементом технологической системы.

Сопоставление рассмотренных решений показывает, что NUMROTO целесообразно рассматривать как зрелую специализированную программную платформу для инструментального шлифования; GivealGrind N4B6 – как пример современного пятиосевого оборудования с возможностями автоматизации шлифовальных операций; SYNTEC 210MA-E5 – как гибкую управляющую платформу для реализации многоосевой обработки; SCHNEEBERGER Norma NGC с Qg1 – как высокофункциональный комплекс, ориентированный на широкий спектр задач производства и переточки режущего инструмента. Такой сравнительный анализ позволяет использовать данные решения как ориентиры при проектировании или модернизации технологических участков инструментального производства.

Таким образом, анализ современных технологий показывает, что развитие производства осевого режущего инструмента идет по пути углубления интеграции программного обеспечения, систем ЧПУ и многоосевого шлифовального оборудования. Наиболее перспективными являются комплексы, обеспечивающие параметрическое описание инструмента, симуляцию обработки, автоматическую компенсацию и расширение функций за счет модулей измерения и загрузки. Для российских предприятий и исследовательских работ в области автоматизации технологической подготовки производства это направление представляет практический интерес, поскольку позволяет повысить точность, производительность и воспроизводимость результатов при изготовлении и восстановлении режущего инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) NUMROTO–NUM: официальный сайт. – URL: https://www.num.com/complete-solutions/numroto/?Open&s0=31

2) Syntec: официальный сайт. – URL: https://www.syntecthailand.com/210-5

3) Norma NGC // SCHNEEBERGER: [site]. – URL: https://www.schneeberger.swiss/machines/norma-ngc

4) Live from the GrindingHub, Day 3: Grinding of precision components with Qg1! // SCHNEEBERGER: [site]. – URL: https://www.schneeberger.swiss/en/blog/live-from-the-grindinghub-day-3-grinding-of-precision-components-with-qg1

УДК 378.4:658.56

РОЛЬ ВУЗОВ В ЭПОХУ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ: ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И КАЧЕСТВО

Е.М. Шастина

Научный руководитель - **А.П. Чирков**, д-р техн. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются вопросы трансформации высших учебных заведений в условиях смены технологических укладов и необходимости импортозамещения. Анализируется государственное регулирование технологического развития в Российской Федерации. Показано, что вузы становятся активными участниками реального сектора экономики.

Ключевые слова: *технологические уклады, импотозамещение, вузы, система менеджмента качества, SMART-стандарты*

THE ROLE OF UNIVERSITIES IN THE ERA OF IMPORT SUBSTITUTION: INDUSTRY AND QUALITY

E.M. Shastina

Scientific Supervisor - **A.P. Chirkov**, Doctor of Technical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the transformation of higher education institutions in the context of the changing technological paradigms and the need for import substitution. The state regulation of technological development in the Russian Federation is analyzed. It is shown that universities are becoming active participants in the real sector of the economy.

Keywords: technological paradigms, import substitution, universities, quality management system, and SMART standards.

Современная экономика находится в состоянии цифровой трансформации, движущей силой которой выступает смена технологических укладов. Переход от одного технологического уклада к другому (будь то цифровые технологии, новые материалы, системы искусственного интеллекта и т.п.) неизбежно влечет за собой глубинную перестройку промышленности, выражающуюся не только в модернизации бизнес-процессов, но и во внедрении принципиально новых технологий и инновационных методов управления производством и предприятием в целом.

Развитие промышленности происходит не стихийно, а регулируется со стороны государства, которое обеспечивает и задает устойчивый вектор развития. В настоящее время данная деятельность базируется на ряде стратегических документов, принятых на законодательном уровне.

Прежде всего, стоит отметить Федеральный закон от 28 декабря 2024 г. № 523-ФЗ «О технологической политике в Российской Федерации» [1], который вводит понятия «технологической политики» и «технологического лидерства Российской Федерации». Данный закон задает «правила игры» в современном мире, определяет меры поддержки и механизмы координации между наукой, бизнесом и властью. Особенно стоит отметить, что в ст.6 п.2 ФЗ «О технологической политике» указано: к лицам, содействующим развитию технологий, относятся: «…образовательные организации высшего образования, научные организации и центры трансфера технологий, оказывающие содействие введению в

гражданский оборот результатов интеллектуальной деятельности образовательных организаций высшего образования и научных организаций» [1].

Кроме того, в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145 [2] говорится о необходимости объединить усилия органов власти разного уровня с научно-образовательными и предпринимательскими сообществам «по созданию благоприятных условий для применения достижений науки и технологий в интересах социально-экономического и пространственного развития России».

Таким образом, видно, что основные законодательные документы, касающиеся вопросов технологического развития, определяют национальные цели и направления развития, концентрируясь на критически важных сферах для недопустимости отставания России.

Все это позволяет предприятиям планировать долгосрочное развитие и внедрение инноваций в свою деятельность, а научным и образовательным учреждениям – выстраивать свою работу в соответствии с приоритетными задачами экономики.

Экономическое развитие Российской Федерации, осложненное внешними ограничениями и необходимостью импортозамещения, привело к пересмотру роли высших учебных заведений: от чисто образовательных организаций с фундаментальной наукой к становлению активными участниками реального сектора экономики.

Сегодня многие университеты создают и развивают на своих площадках специализированные центры, конструкторские бюро, центры инновационных разработок, производственные площадки и научные лаборатории. Эти структуры призваны решать разнообразные критически важные задачи, среди которых можно отметить:

– выпуск продукции – в данном случае лаборатории становятся малыми производственными площадками, способными в короткие сроки наладить выпуск необходимых комплектующих и деталей, ранее поступавших по импорту;

– проведение научных и прикладных исследований под конкретные запросы предприятий, столкнувшихся с необходимостью быстрой адаптации в условиях цифровой трансформации экономики. Вузы выполняют научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы под запросы предприятий для поиска решений, обеспечивающих стабильность и повышение качества производственных процессов;

– разработка отечественных материалов и компонентов, которые будут использоваться в самых разных отраслях промышленности – от машиностроения и приборостроения до микроэлектроники и фармацевтики.

Таким образом, вузы становятся «мостом» между прикладными научными исследованиями и промышленными предприятиями. Именно здесь рождаются новые научно-технологические решения, способные заменить импортные аналоги.

Однако создание научной лаборатории или производственного участка – это лишь половина дела, даже если они оснащены всем необходимым оборудованием (приборами, станками, средствами измерений и т.п.). Все это должно обеспечивать не просто выпуск продукции, а выпуск качественной продукции. И чтобы эта возможность стала реальностью, необходимо также выстраивать систему управления качеством.

Документирование процессов, разработка и внедрение системы менеджмента качества становятся критически важным по следующим причинам:

– даже малое производство требует обеспечения стабильности и воспроизводимости результатов. Использование статистических методов в рамках функционирования системы менеджмента качества будет давать гарантию, что каждая партия изделий или комплектующих будет идентична предыдущей и соответствовать необходимому уровню качества;

– промышленные заказчики в разных секторах экономики предъявляют довольно жесткие требования к поставщикам, особенно в авиастроении, атомной энергетике и оборонно-промышленном комплексе. Поэтому наличие сертифицированной системы

менеджмента качества часто является обязательным условием для получения заказа на поставку партии комплектующих со стороны таких предприятий;

– четкая документация и регламентация процессов позволяет снизить издержки, избежать брака, перерасхода материалов и времени, что очень важно для мелкосерийных производств.

С одной стороны, материальное оснащение научных лабораторий и производственных площадок в рамках деятельности вузов необходимо и важно, но при этом без грамотно созданной системы управления качеством и документирования процессов невозможно обеспечить стабильную работу данных производственных участков с выпуском качественной продукции. Все это должно формировать доверие и репутацию вузов со стороны промышленных предприятий.

Создавая научную лабораторию необходимо понимать и учитывать требования к ее компетентности, которые в Российской Федерации регулируются комплексом законодательных актов. Среди них ключевую роль играет приказ от 26 октября 2020 г. № 707 «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации» [3]. Данный документ устанавливает требования к персоналу, оборудованию и системе менеджмента лаборатории. Пункт 21 приказа [3] говорит о том, что данные требования детализируются через соответствие положениям национального стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [4].

Стандарт включает в себя основные разделы, касающиеся:

– требований к ресурсам (раздел 6). Данный раздел регламентирует требования к персоналу, помещениям и условиям окружающей среды, оборудованию, а также метрологической прослеживаемости. Выполнение этих требований гарантирует создание в лаборатории условий для получения надежных и достоверных результатов измерений;

– требований к процессам (раздел 7). Раздел охватывает все этапы деятельности лаборатории, начиная от запросов заказчика и выбора методов испытаний до оценивания неопределенности измерений и представления отчета о результатах;

– требований к системе менеджмента (раздел 8). Раздел предусматривает наличие документированных процедур, проведение внутренних аудитов и анализа со стороны руководства.

С другой стороны, документируя систему менеджмента качества, необходимо также следовать и учитывать тенденции развития технологических укладов и использовать современные цифровые тренды развития в области стандартизации – SMART-стандарты (машиночитаемые стандарты, интегрированные в цифровую среду предприятия). В условиях перехода к шестому технологическому укладу традиционное бумажное документирование становится тормозом в развитии, а SMART-стандарты позволяют автоматизировать бизнес-процессы и контроль качества, встраивать цифровые требования и оперативно адаптировать предприятия к изменениям.

Наличие системы менеджмента качества на основе документированных процедур в цифровом формате (SMART-стандартов) будет являться подтверждением стабильности результатов деятельности научных лабораторий и производственных площадок вузов. Так же это станет инструментом адаптации университетов к быстроменяющимся требованиям цифровой экономики и подготовит их к этапу доминирования шестого технологического уклада.

Таким образом, формируемая в настоящее время модель развития промышленности представляет собой тесное сотрудничество, где государство определяет и задает технологические приоритеты, вузы становятся центрами инновационных разработок и опытного производства в рамках импортозамещения, а основой их работы становятся системы менеджмента качества. Именно такой комплексный подход способен обеспечить Российской Федерации устойчивый технологический суверенитет и успешное развитие при переходе к новому технологическому укладу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) О технологической политике в Российской Федерации : Федеральный закон от 28 декабря 2024 г. № 523-ФЗ // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: http://pravo.gov.ru (дата обращения: 03.04.2026).

2) О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: http://pravo.gov.ru (дата обращения: 03.04.2026).

3) Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации: Приказ Минэкономразвития России от 26 октября 2020 г. № 707 // КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru (дата обращения: 03.04.2026).

4) ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий: межгосударственный стандарт: Дата введения 2020-05-01. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 32 с.

УДК 669.013:621.746.047:658.562

СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СТРУЙНОГО НАНЕСЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО (BINDER JETTING): ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

И.О. Щетинников, В.А. Иванова

Научный руководитель – **В.А. Иванова**, д-р техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Разработана методика контроля качества литейных форм, изготавливаемых методом Binder Jetting (BJ), с акцентом на стандартизацию производственных испытаний и организацию системы управления качеством. Рассмотрены: нормативная база испытаний, анизотропии прочности по направлениям печати X, Y, Z, методика проведения испытаний с расчётными формулами и статистическими критериями. Введён коэффициент анизотропии K. Предложены протоколы испытаний и схема интеграции контроля в производственный процесс.

Ключевые слова: *Binder Jetting, литейные формы, управление качеством, стандартизация, прочность при растяжении, анизотропия, организация производства*

STANDARDIZATION OF QUALITY CONTROL METHODS FOR FOUNDRY MOLDS MANUFACTURED BY BINDER JETTING: EVALUATION OF TENSILE STRENGTH ANISOTROPY AND ORGANIZATION OF PRODUCTION TESTING

I.O. Shchetnikov, V.A. Ivanova

Scientific Supervisor – **V.A. Ivanova,** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

A quality control methodology has been developed for foundry molds manufactured by the Binder Jetting (BJ) process, with a focus on standardizing production testing and organizing a quality management system. The study considers the regulatory framework for testing, anisotropy of strength with respect to the printing directions X, Y, and Z, and a test procedure including calculation formulas and statistical criteria. An anisotropy coefficient K is introduced. Test protocols and a scheme for integrating quality control into the production process are proposed.

Keywords: *Binder Jetting, foundry molds, quality management, standardization, tensile strength, anisotropy, production organization*

Аддитивное производство литейных форм (BJ-форм) и стержней методом струйного нанесения связующего (далее Binder Jetting, BJ) занимает всё более значимое место в современном литейном производстве. Технология позволяет изготавливать формы произвольной геометрии без оснастки, сокращает производственный цикл и обеспечивает высокую воспроизводимость параметров от партии к партии [1, 2]. Принцип метода – послойное нанесение жидкого связующего на песчаную смесь (кварцевый песок с катализатором) посредством струйной печатающей головки с последующей полимеризацией [3].

Вместе с тем широкое промышленное применение BJ сдерживается отсутствием специализированной системы контроля качества или стандартных методов контроля готовых форм.

Действующие стандарты на испытания формовочных смесей разрабатывались для традиционных технологий уплотнения формовочных смесей и не отражают специфику послойного аддитивного формообразования. Ключевая особенность BJ-форм – анизотропия прочности: свойства изделия зависят от ориентации моделей в области печати относительно

осей системы координат [4, 5]. Контроль прочности в одном направлении, как предусмотрено стандартными методиками, не позволяет объективно оценить эксплуатационную надёжность литейной формы в целом. Настоящая работа направлена на разработку методики испытаний, учитывающей данную специфику.

Нормативную основу предлагаемой методики составляют действующие национальные и межгосударственные стандарты, охватывающие три взаимосвязанных направления:

— испытания формовочных смесей для литейного производства;
— аддитивные технологии нанесения связующего;
— испытания полимерных композитов на растяжение.

ГОСТ 23409.7-78 является основополагающим стандартом, устанавливающим геометрию образца-восьмёрки, порядок закрепления в захватах и расчёт предела прочности, а также регламентирует общие условия проведения испытаний: температуру, влажность, погрешности аппаратуры [9]. ГОСТ Р 59568-2021 и ГОСТ Р 59569-2021 применяются на этапе входного контроля компонентов – связующего, катализатора и кварцевого песка — до начала печати [10, 11]. ГОСТ 32656-2014 [13] устанавливает требования к методам определения их механических свойств при растяжении: предела прочности, модуля упругости, коэффициента Пуассона.

Послойный характер BJ-процесса обусловливает принципиальное отличие микроструктуры форм от традиционных уплотнённых образцов. В плоскости каждого слоя (направления X и Y) связующее капиллярно пропитывает пространство между зёрнами, полимеризация происходит объёмно и равномерно, формируя однородную межзёренную сеть. На границе раздела между слоями (направление Z) связующее нового слоя должно пропитать пористую поверхность предыдущего, что зависит от вязкости связующего, насыщения, давления ракеля и состояния поверхности (рис. 1) [4, 5].

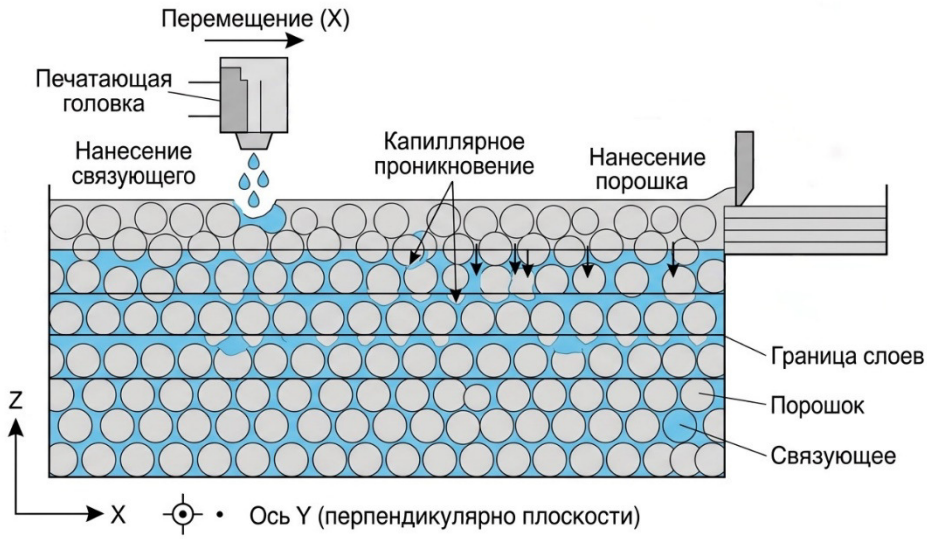


Рис. 1. Схема процесса нанесения связующего в процессе печати по технологии Binder Jetting

Следствием является анизотропия: прочность в направлении Z, как правило, ниже прочности в плоскости X–Y и характеризуется более высоким коэффициентом вариации (CV) [5].

Wendling et al. экспериментально показали, что прочность ($\sigma_{изг,\ МПа}$) при трёхточечном изгибе образцов с ориентацией (Y) составила 5,19±0,24 МПа, тогда как по оси Z – 3,22±0,13 МПа, то есть на 38% ниже [5]. Bobrowski et al. установили, что прочность при растяжении 3D-печатных стержней с фурановым связующим достигает 1,55–2,39 МПа в зависимости от ориентации и параметров печати [1]. Таким образом, контроль прочности только в одном

направлении не отражает реального состояния формы: элемент, отвечающий требованиям в плоскости X–Y, может не обеспечить необходимой прочности при нагружении вдоль Z в процессе сборки или заливки [2, 6].

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015 контроль прочности литейных форм относится к категории контроля и испытания продукции [12].

Предприятие обязано разработать документированную процедуру, определяющую методы измерения, критерии приёмки и порядок регистрации результатов. Для BJ-производства предлагается трёхуровневая схема контроля.

Первый уровень – входной контроль сырья: характеристики кварцевого песка, связующего и катализатора проверяются по ГОСТ Р 59568-2021 и ГОСТ Р 59569-2021 [10, 11].

Второй уровень – операционный контроль: одновременно с рабочей партией форм в тех же режимах и ориентациях печатаются контрольные образцы (восьмёрки), которые испытываются по настоящей методике.

Третий уровень – статистическое управление процессом (SPC):

Вводим коэффициент анизотропии (K), чтобы количественно оценить, насколько сильно механические свойства изделий, полученных по технологии BinderJetting, зависят от направления нагружения относительно слоёв. Рассчитанный по результатам механических испытаний коэффициент анизотропии (K) наносится на контрольную карту по партиям, что позволяет в режиме мониторинга отслеживать стабильность процесса. Анализ тренда и разброса значений (K) даёт возможность своевременно выявлять изменения технологических параметров (износ головок для струйного нанесения связующего, изменение вязкости связующего, нарушения режима отверждения) и принимать корректирующие меры до выпуска бракованной продукции. [12]. При выходе значений коэффициента K или коэффициента вариации CV за установленные предельные значения партия является несоответствующей согласно разделу 8.7 ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [12], инициируется анализ причины несоответствия и разрабатываются корректирующие действия. Результаты испытаний регистрируются в протоколе.

Испытания проводятся на образцах (рис. 2) по ГОСТ 23409.7-78 [9]. Размеры рабочей зоны: длина L = 75 мм, ширина b = 25 мм, высота h = 25 мм, площадь поперечного сечения $A_0 = b \times h = 625$ мм².

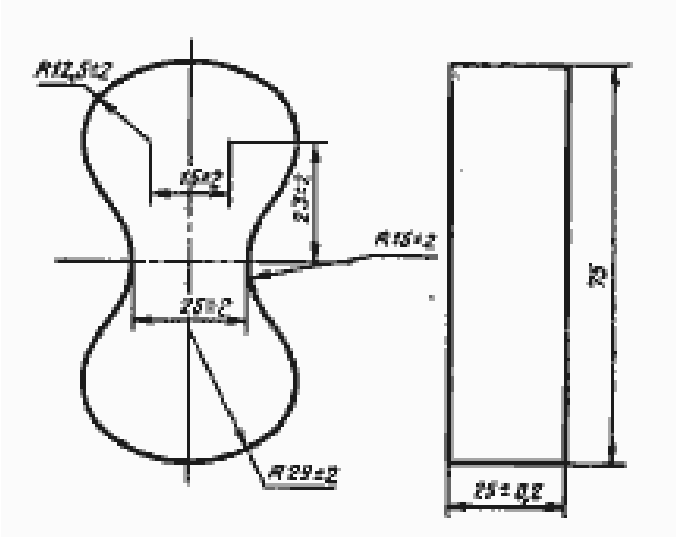


Рис. 2. Схема тестовых образцов

Испытательная машина должна обеспечивать диапазон нагрузки 0–5 кН с погрешностью не более ±2%, постоянную скорость расхождения зажимов 1,0–1,5 мм/мин и наличие штатных захватов для образца-восьмёрки. Условия проведения: температура (23±2) °C, относительная влажность (50±5)% – по ГОСТ 23409.0-78 [9].

Для оценки анизотропии образцы изготавливаются в трёх взаимно перпендикулярных ориентациях: X – продольная ось образца параллельна движению печатающей головки; Y – параллельна движению ракеля в горизонтальной плоскости; Z – совпадает с вертикальной осью послойного наращивания. На каждое сочетание «режим печати × направление» изготавливается не менее 5 образцов [5, 9]. При 4-х исследуемых режимах итоговая программа включает испытания 4×3×5 = 60 образцов.

Предел прочности при растяжении (σ_p, МПа) рассчитывается по формуле

$$\sigma_p = \frac{F_{max}}{A_0}, \quad (1)$$

где F_{max} – максимальная нагрузка при разрыве, Н; A_0 – площадь поперечного сечения, мм;

- статистические показатели — по формулам

$$\bar{\sigma}_p = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sigma_{p,i}, \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\sigma_{p,i} - \bar{\sigma}_p)^2}, \quad (3)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{\sigma}_p}\cdot 100\%, \quad (4)$$

где n – число образцов в серии; S – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации. Серия признаётся удовлетворительной при $CV \le 15\%$ [9];

- коэффициент анизотропии — по формуле

$$K = \frac{\bar{\sigma}_{p,max}}{\bar{\sigma}_{p,min}}, \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_{p,max}$ и $\bar{\sigma}_{p,min}$ — наибольшее и наименьшее среднее значение σ_p среди направлений X, Y, Z для данного режима.

При $K \to 1$ — свойства квазиизотропны; $K > 1{,}3$ — выраженная анизотропия [5].

Результаты испытаний фиксируются в протоколе (табл. 1). По завершении серии рассчитываются статистические показатели и коэффициент анизотропии K (табл. 2). Критерии приёмки партии BJ-форм установлены на основе действующих нормативных документов и данных научной литературы [5, 6, 9].

Таблица 1. Критерии приёмки результатов испытаний

Показатель	Допустимое значение	Нормативное основание
$\bar{\sigma}_p$ по любому направлению, МПа	≥ 0,8	[6]
Коэффициент вариации CV, %	≤ 15	-
Коэффициент анизотропии K	≤ 1,5	[5]

Таблица 2. Сводный протокол производственного контроля BJ-форм

Режим	Направление	n	$\bar{\sigma_p}$, МПа	S, МПа	CV, %	K_a
Режим 1	X	5				
	Y	5				
	Z	5				
…	…	…	…	…	…	…

В таблице: n – количество испытанных образцов; $\bar{\sigma_p}$ – среднее значение прочности на растяжение; S – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; K – коэффициент анизотропии по формуле (5).

Проведённый анализ нормативной базы показал, что действующие стандарт – ГОСТ 23409.7-78 – не регламентируют контроль прочностных характеристик BJ-форм с учётом ориентации образца, обусловленный физической природой BJ-процесса: послойное нанесение связующего приводит к тому, что прочность в плоскости слоёв (X–Y) и на межслоевых границах (Z) существенно различается. Именно Z-направление является критическим – его прочность, на 38–61% ниже, чем в плоскости X–Y [5].

Для устранения выявленного пробела в рамках ГОСТ Р ИСО 9001-2015 предложена трёхуровневая схема контроля: входной контроль сырья по ГОСТ Р 59568/59569-2021 → операционный контроль партии образцами (восьмерки) → SPC-мониторинг по контрольным картам. Это позволяет контролировать прочность BJ-форм и систематизировать контроль, интегрируя ее в существующую систему менеджмента качества предприятия.

Операционный контроль реализуется через разработанную методику испытаний по ГОСТ 23409.7-78 и ГОСТ 32656-2014 и обеспечивает получение статистически значимые оценки предела прочности σ_p тестовых образцов, изготовленных по технологии BJ, по каждому из трёх направлений.

Для SPC-мониторинга предложен коэффициент анизотропии: при $K \leq 1{,}5$ партия считается принятой; при $K > 1{,}5$ или $CV > 15\%$ инициируется анализ корневой причины и корректирующие действия в соответствии с разделом 8.7 ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [12].

Таким образом, предложенная методика позволит повысить качество форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Bobrowski A. 3D Printed (Binder Jetting) Furan Molding and Core Sands – Thermal Deformation, Mechanical and Technological Properties / A. Bobrowski, K. Kaczmarska, D. Drożyński [et al.] // Materials. – 2023. – Vol. 16, № 9. – Art. 3339. – DOI: 10.3390/ma16093339.

2) Mitra S. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting / S. Mitra, M. El Mansori, M. Dargusch // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 40. – Art. 101889. – DOI: 10.1016/j.addma.2021.101889.

3) Puzio S. The Use of 3D Printed Sand Moulds and Cores in the Castings Production / S. Puzio, J. Kamińska, K. Major‐Gabryś, D. Halejcio [et al.] // Archives of Foundry Engineering. – 2024. – Vol. 24, № 1. – P. 32–39. – DOI: 10.24425/afe.2024.148833.

4) Halejcio D. The Comparison of Chosen Moulding Sands' Properties / D. Halejcio, K. Major‐Gabryś // Archives of Foundry Engineering. – 2024. – Vol. 24, № 4. – P. 43–51. – DOI: 10.24425/afe.2024.150971.

5) Wendling J. Thermomechanical properties of 3D‐printed sand moulds using inorganic binder / J. Wendling, J. Thorborg, M. Sterzenbach [et al.] // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, № 9. – e19300. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19300.

6) Zhang Z.‐F. Binder jetting 3D printing process optimization for rapid casting of green parts with high tensile strength / Z.‐F. Zhang, L. Wang, L.‐T. Zhang [et al.] // China Foundry. – 2021. – Vol. 18, № 4. – P. 335–343. – DOI: 10.1007/s41230‐021‐1119‐2.

7) Mitra S. The effect of ageing process on three‐point bending strength and permeability of 3D printed sand molds / S. Mitra, A. Rodríguez de Castro, M. El Mansori // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 97. – P. 1241–1251. – DOI: 10.1007/s00170-018-2032-7

8) Evaluation of additive manufacturing of sand cores in terms of the resulting surface roughness / S. Puzio, D. Gruszka, K. Major-Gabryś [et al.] // Heliyon. – 2022. – Vol. 8, № 10. – e10751. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10751.

9) ГОСТ 23409.7-78. Пески формовочные, смеси формовочные и стержневые. Методы определения прочности при сжатии, растяжении, изгибе и срезе. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.

10) ГОСТ Р 59569-2021. Аддитивные технологические процессы. Нанесение связующего струйное. Сырьё для изготовления песчано-полимерных деталей. Методы испытаний. – М.: Росстандарт, 2021.

11) ГОСТ Р 59568-2021. Аддитивные технологические процессы. Нанесение связующего струйное. Сырьё для изготовления песчано-полимерных деталей. Технические требования. – М.: Росстандарт, 2021.

12) ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015.

13) ГОСТ 32656-2014 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009). Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2015.

УДК 620.162

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПРОДУКЦИИ ЧЕРЕЗ ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Л.И. Эгги, А.П. Чирков

Научный руководитель – **А.П. Чирков,** д-р техн. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В статье приведены результаты исследования, направленные на разработку методов повышения качества результатов испытаний с применением оценки неопределенности результатов измерений. Исследования выполнены на базе данных испытаний тормозных колодок.

Ключевые слова: *методика испытаний, тормозная колодка, неопределенность измерений*

INCREASING THE RELIABILITY OF PRODUCT TESTING RESULTS THROUGH THE APPLICATION OF A MEASUREMENT UNCERTAINTY ASSESSMENT PROCEDURE

L.I. Aggie, A.P. Chirkov

Scientific Supervisor - **A.P. Chirkov,** Doctor of Technical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

This article presents the results of a study aimed at developing methods for improving the quality of test results using measurement uncertainty assessment. The study was conducted using brake pad test data.

Keywords*: test method, brake pad, measurement uncertainty*

Введение

Безопасность дорожного движения является одной из приоритетных задач народного хозяйства, поскольку напрямую влияет на сохранение жизни и здоровья населения, снижение социально-экономических потерь и повышение эффективности функционирования транспортной системы.

Значительную роль в обеспечении безопасности эксплуатации легковых автомобилей играет надежность тормозной системы, в частности дисковые тормозные колодки и его элементы.

1. Особенности тормозных систем

Современные конструкции тормозных систем характеризуются применением новых фрикционных материалов, повышенными рабочими температурами и нагрузками, что приводит к усложнению условий эксплуатации тормозных колодок.

На легковых автомобилях применяются два основных типа тормозных колодок: дисковые и барабанные.

Барабанные колодки взаимодействуют с внутренней поверхностью тормозного барабана и имеют более низкую эффективность охлаждения, что может привести к снижению эффективности торможения при длительном или интенсивном использовании.

Конструкция дисковой тормозной системы включает тормозной диск, жестко закрепленный на ступице колеса, тормозной суппорт с направляющими элементами и поршнями гидравлического привода (фиксированного или плавающего типа), передающими усилие на колодки, дисковые тормозные колодки, состоящие из металлической опорной плиты и фрикционного слоя, а также крепежные элементы, обеспечивающие правильное расположение колодок.

Опорная плита передает усилие, создаваемое суппортом, на фрикционный материал, обеспечивая равномерное торможение.

Дисковые тормозные колодки работают с открытым диском, обладают хорошей теплоотводящей способностью и стабильностью характеристик при интенсивных и повторных торможениях.

Конструкция дискового тормозного механизма приведена на рис. 1, где *а* - механизм в сборе, *б* - разрез по оси колесных тормозных цилиндров; 1 - тормозной диск; 2 - шланги; 3 - поворотный рычаг; 4 - стойка передней подвески; 5 - грязезащитный диск; 6 - клапан выпуска воздуха; 7 - шпилька крепления колодок; 8, 9 - половины скобы; 10 - тормозная колодка; 11 - канал подвода жидкости; 12 - поршень малый; 13 - поршень большой.

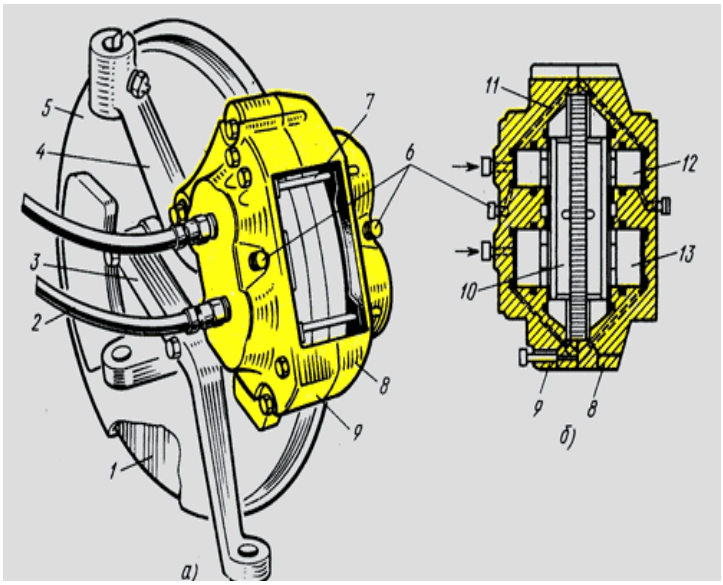


Рис. 1. Конструкция дискового тормозного механизма легкового автомобиля [1]

Дисковый тормозной механизм обладает рядом преимуществ по сравнению с барабанными. В числе которых более высокая теплопроводность и стабильность коэффициента трения, более низкая склонность к перегреву и более упрощенное обслуживание.

Ключевым элементом дискового тормозного механизма, который определяет эффективность и безопасность торможения, являются дисковые тормозные колодки.

2. Обеспечение качества и безопасности тормозных колодок – ключевого элемента тормозных механизмов

Качество и безопасность дисковых тормозных колодок легковых автомобилей регламентируется системой технического регулирования Российской Федерации и Евразийского экономического союза.

Совокупность законодательных, нормативных и методических документов определяет обязательные требования к характеристикам тормозных систем, а также к методам их испытаний и подтверждению соответствия.

Основополагающим обязательным документом является ТР ТС 018/2011 [2], устанавливающий обязательные требования к безопасности колесных транспортных средств, включая показатели эффективности торможения, устойчивости при торможении и надежности дисковых тормозных механизмов.

Контроль технического состояния дисковых тормозных систем при эксплуатации установлен ГОСТ 33997-2016 [3]. Документ определяет методы измерения эффективности торможения, допустимые отклонения тормозных сил по осям, а также критерии признания тормозной системы работоспособной.

При проведении стендовых испытаний тормозных колодок контролируются следующие параметры [2, 4]:

- коэффициент трения при различных режимах нагружения;
- изменение коэффициента трения при нагреве (фрикционная стабильность);
- интенсивность износа;
- тепловое поведение материала;
- механическая прочность фрикционного слоя;
- устойчивость характеристик при циклическом нагружении.

Качество тормозных колодок и достоверность методов их испытаний оказывают непосредственное влияние на эксплуатационную безопасность автомобилей, снижение аварийности и уменьшение затрат, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом транспортных средств. В связи с этим совершенствование методик испытаний тормозных колодок имеет важное народнохозяйственное значение.

3. Стендовые испытания тормозных колодок

В настоящее время для оценки характеристик дисковых тормозных колодок применяются дорожные и стендовые испытания, при этом стендовые испытания получили наибольшее распространение благодаря возможности воспроизведения заданных режимов торможения и высокой повторяемости результатов.

Общий вид инерционного стенда для испытаний тормозных механизмов приведен на рис. 2.

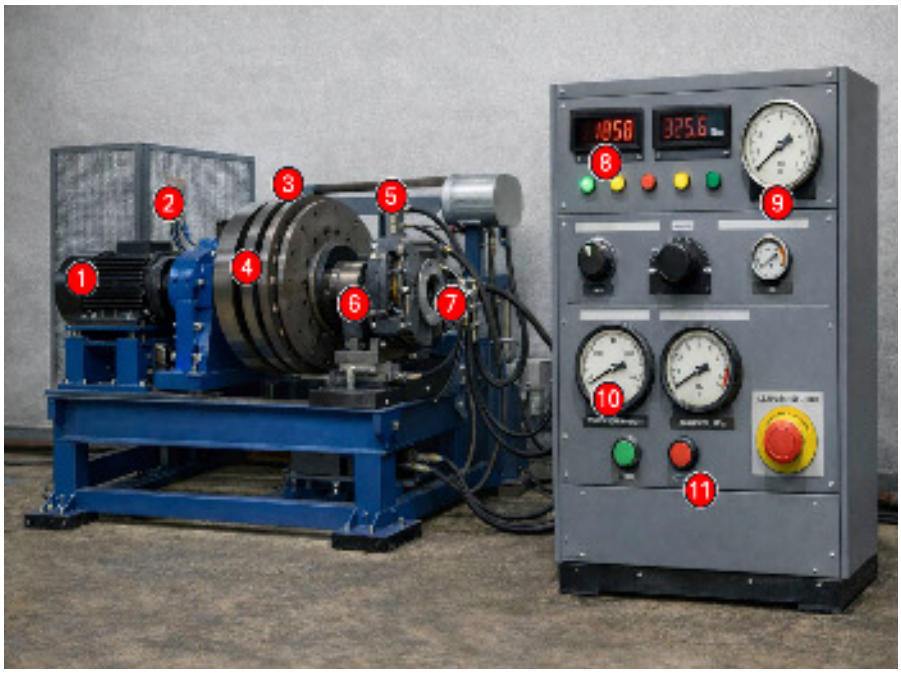


Рис. 2. Общий вид инерционного тормозного стенда 509.356:
1- электродвигатель главного привода; 2 - защитный кожух (ограждение вращающихся частей); 3 - соединительная муфта; 4 - блок инерционных дисков (маховиков); 5 - вал стенда; 6 - тормозной суппорт с колодками; 7 - гидравлический цилиндр привода тормоза; 8 - цифровой индикатор частоты вращения; 9 - цифровой индикатор тормозного момента; 10 - аналоговые измерительные приборы давления и тормозного момента; 11 - органы управления (кнопки "Пуск", "Стоп" и "Аварийная остановка").

4. Оценка неопределенности измерений при выполнении испытаний

В соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [5] испытательная лаборатория «должна обеспечивать наличие в технических записях для каждого вида лабораторной деятельности результатов, отчета и достаточной информации, позволяющей, если это возможно, идентифицировать факторы, влияющие на результат измерения и связанную с ним

неопределенность измерений, а также обеспечить возможность повторного проведения данной лабораторной деятельности в условиях, максимально близких к первоначальным».

Важное значение оценка неопределенности измерений и включение её в методику стендовых испытаний имеет для обеспечения качества проводимых испытаний тормозных систем. Это позволит повысить достоверность и воспроизводимость результатов, а также обеспечить их соответствие современным нормативным требованиям и международным стандартам.

Одним из основных оцениваемых параметров тормозных колодок является показатель коэффициента трения, который описывается математической моделью (1).

$$\mu = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot d^2 \cdot \text{п} \cdot p \cdot r_д}, \quad (1)$$

где π = 3.1415; n - число поршней в тормозном механизме, шт.; p - давление в приводе тормоза, МПа; $r_д$ - средний радиус трения, м; d - диаметр поршня, м

При испытаниях тормозных колодок имеются все исходные данные для оценки неопределенности измерений. Они позволяются оценить на основании статистической обработки результатов измерений неопределенность по типу А - $u(A)$, на основании данных о характеристиках используемых средств измерений неопределенность по типу В - ($u(B)$ и так называемые коэффициенты чувствительности (c), для чего выполнялись вычисления производных по математической модели. Использование этих данных по формуле (2) позволили вычислить общую неопределенность результатов испытаний - $u(c)$ и представить с учетом интервальной их оценки (рис. 3).

$$u(c) = \sqrt{u(A)^2 + c_1 \cdot u(B)_1{}^2 + \ldots + c_n \cdot u(B)_n{}^2)} \quad (2)$$

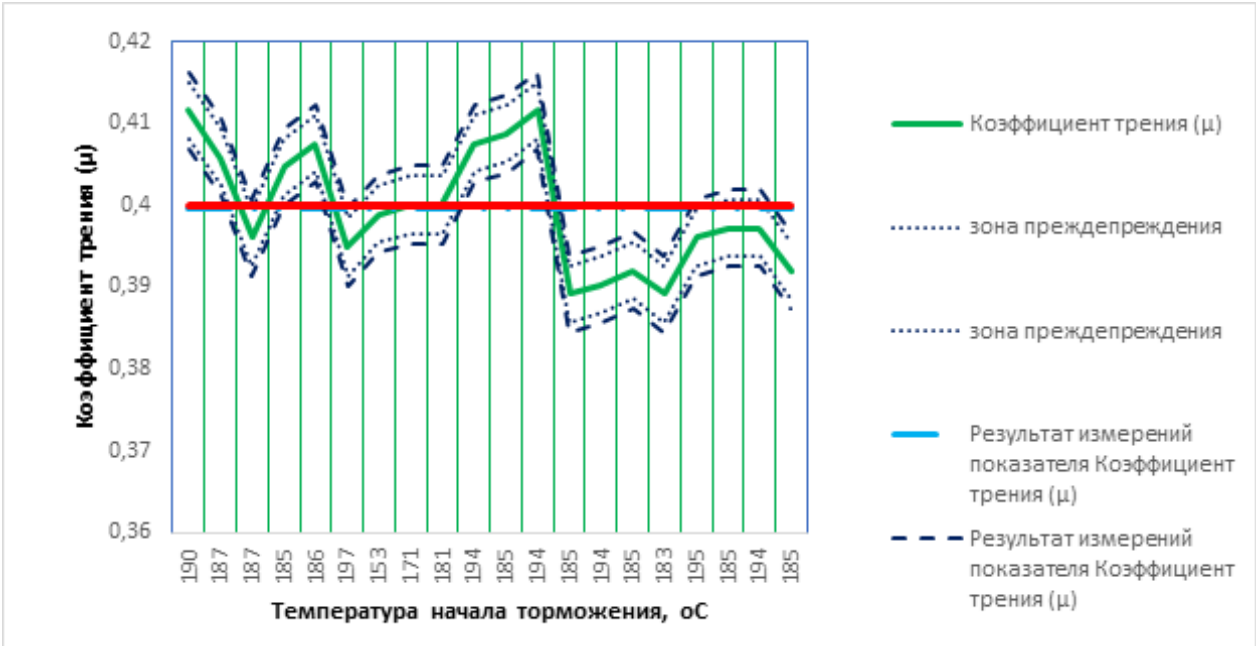


Рис. 3. Интервальная оценка результатов измерений коэффициента трения

Интервальная оценка результатов измерений позволяет оценить риски принятия решений о соответствии или несоответствии испытываемых образцов.

В частности на рис. 3 при температуре начала торможения в 153, 171, 181,185,187 и 194 °С имеется риск считать соответствующим уровень коэффициента трения.

Наличие расчета неопределенности повысит также научную обоснованность методики и позволит корректно сравнивать результаты испытаний по различным сериям колодок.

Заключение

Выполненные исследования показали возможности применения оценки неопределенности измерений для повышения качества испытаний тормозных колодок.

Научная ценность результатов работы заключается в развитии и уточнении методических подходов к стендовым испытаниям дисковых тормозных колодок за счет внедрения оценки неопределенности результатов измерений. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших научных исследованиях, направленных на совершенствование методов испытаний элементов тормозных систем транспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Тормозное управление гидравлической тормозной системы с АБС: основы конструкции и диагностики: Методические указания к выполнению практических и лабораторных работ для студентов очной и заочной формы обучения / А.П. Панычев, А.П. Пупышев, Е.Г. Есюнин, Д.В. Шатунов, Ю.А. Ялпанов. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. - 42 с. – URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/2594/1/Panyschev_i_dr.pdf

2) ТР ТС 018/2011 "О безопасности колесный транспортных средств". - URL: https://sudact.ru/law/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuza-ot-09122011-n_19/tr-ts-0182011/?ysclid=mldwi9aoxs668797394

3) ГОСТ 33997-2016. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки. – URL: https://sto-koles.com/assets/files/gost%2033997-2016.pdf?ysclid=mlm9jirh56532644728

4) ГОСТ 15960-96. Материалы асбестовые фрикционные эластичные и изделия из них. Технические условия. – URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294836/4294836380.pdf?ysclid=mli3c76bf6500134547

5) ГОСТ ISO/IEC 170252019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. - URL: https://nps2.cntd.ru/kodeks02/

Секция 2. Оборудование, подсистемы и энергетические установки наземных транспортно-технологические средств

УДК 625.76.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ И ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛЫ ОДНОМАССНОЙ ВИБРОПЛИТЫ НА ОСОБЕННОСТИ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ

М.А. Афанасьев, И.С. Тюремнов

Научный руководитель – **И.С. Тюремнов**, канд. тех. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается влияние частоты и вынуждающей силы вибровозбудителя на особенности взаимодействия одномассной самоходной виброплиты с грунтом. Установлено, что для обеспечения эффективной работы виброплиты целесообразно увеличение частоты колебаний вибровозбудителя.

***Ключевые слова**: виброплита, уплотнение грунта, частота колебаний, вынуждающая сила*

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FREQUENCY AND DRIVING FORCE OF A SINGLE-MASS PLATE COMPACTOR ON THE FEATURES OF ITS INTERACTION WITH THE SOIL

M.A. Afanasev, I.S. Tyuremnov

Scientific Supervisor – **I.S. Tyuremnov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The influence of the frequency and driving force of the vibration exciter on the interaction of a single-mass self-propelled vibrating plate with the ground is considered. It has been established that in order to ensure the effective operation of the vibrating plate, it is advisable to increase the frequency of vibration of the vibration exciter.

***Keywords**: plate compactor, soil compaction, oscillation frequency, driving force*

Самоходные виброплиты – грунтоуплотняющие машины динамического действия, имеющие плоский рабочий орган, колебательные движения которого обеспечивают передвижение машины и уплотнение грунта [1]. В зависимости от компоновочной схемы, виброплиты разделяют на одномассные (в которых рама и основание жестко связаны между собой) и двухмассные (в которых рама и основание связаны упругими виброизоляторами) [2].

В последние годы распространение получили одномассные виброплиты, отличающиеся простотой конструкции и низкой стоимостью изготовления за счет использования общепромышленных вибровозбудителей. Эффективная работа таких самоходных виброплит возможна только при рациональном выборе ряда основных параметров, к которым относятся частота колебаний, вынуждающая сила вибровозбудителя, форма и размеры рабочего органа[2,3].

При проведении исследования было выполнено моделирование взаимодействия рабочего органа виброплиты с уплотняемым грунтом на основе трехмассной реологической модели [4]. Исходные параметры модели приведены в табл. 1. Значение относительной вынуждающей силы P/Q изменялось в диапазоне 10-40 с шагом 5. Значение частоты колебаний вибровозбудителя изменялось в диапазоне 35-110 Гц с шагом 15 Гц.

Таблица 1. Исходные параметры реологической модели при проведении однофакторных вычислительных экспериментов

Параметр	Значение
Масса виброплиты m_d, кг	200
Масса грунта m_s, кг	20
Вынуждающая сила P, кН	40
Частота колебаний f, Гц	80
Коэф. упругого сопротивления грунта k_s, МН/м	53,8
Коэф. вязкого сопротивления грунта b_s, кН·с/м	115,6

В результате серии однофакторных вычислительных экспериментов удалось установить, что, вне зависимости от выбора основных параметров, основным режимом работы одномассной виброплиты является режим хаотических колебаний с кратностью 3-8. Это означает, что за 1 цикл отрыва рабочего органа от грунта дебалансный вал совершает 3-8 оборота (рис. 1).

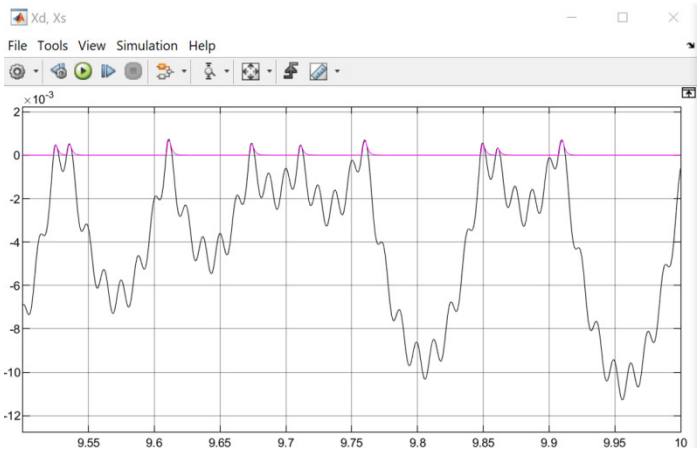


Рис. 1. Осциллограмма вертикальных перемещений рабочего органа виброплиты x_d и грунта x_s в режиме хаотических колебаний

При увеличении относительной вынуждающей силы происходит экспоненциальный рост размаха колебаний виброплиты (рис. 2). В результате, взаимодействие виброплиты с грунтом становится нестабильным, и она теряет управляемость.

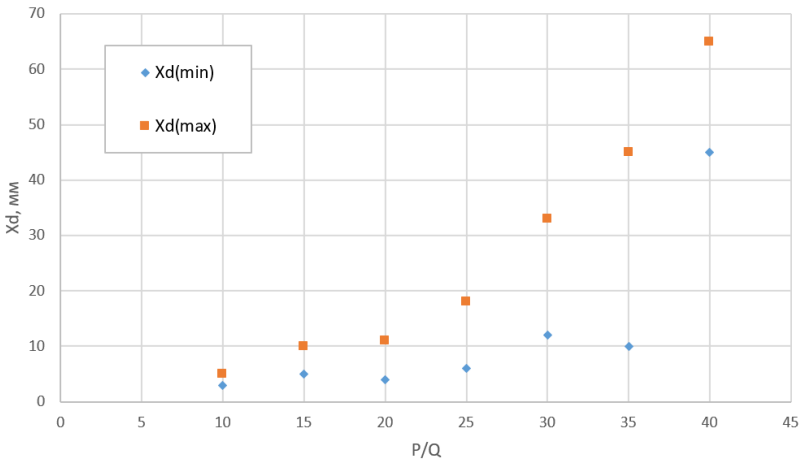


Рис. 2. Влияние относительной вынуждающей силы одномассной виброплиты на размах колебаний

Вместе с тем, увеличение вынуждающей силы приводит к пропорциональному увеличению контактной силы *Fc* как по минимальным (*Fc*(min)), так и по максимальным значениям (*Fc*(max)), что должно позитивно сказываться на эффективности уплотнения грунта (рис. 3).

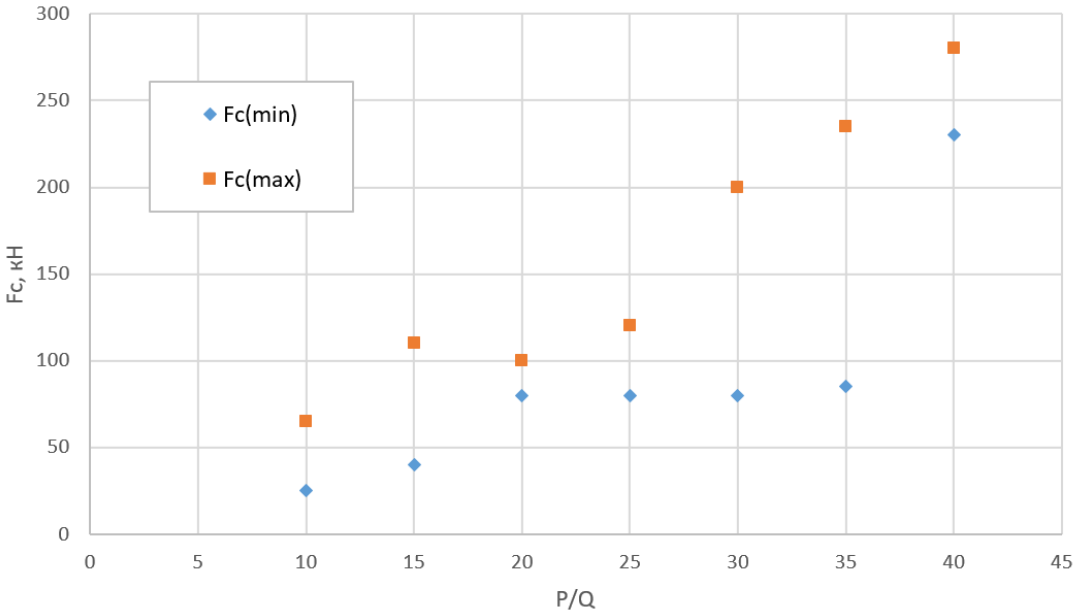


Рис. 3. Влияние относительной вынуждающей силы одномассной виброплиты на контактную силу

Увеличение частоты колебаний вибровозбудителя, напротив, приводит к уменьшению значений размаха колебаний основания виброплиты (рис. 4). Тем не менее, эти значения существенно превышают значения размаха колебаний двухмассных виброплит с сопоставимыми параметрами. Кроме того, увеличение частоты колебаний приводит к снижению контактной силы, что может негативно сказаться на эффективности уплотнения грунта (рис. 5).

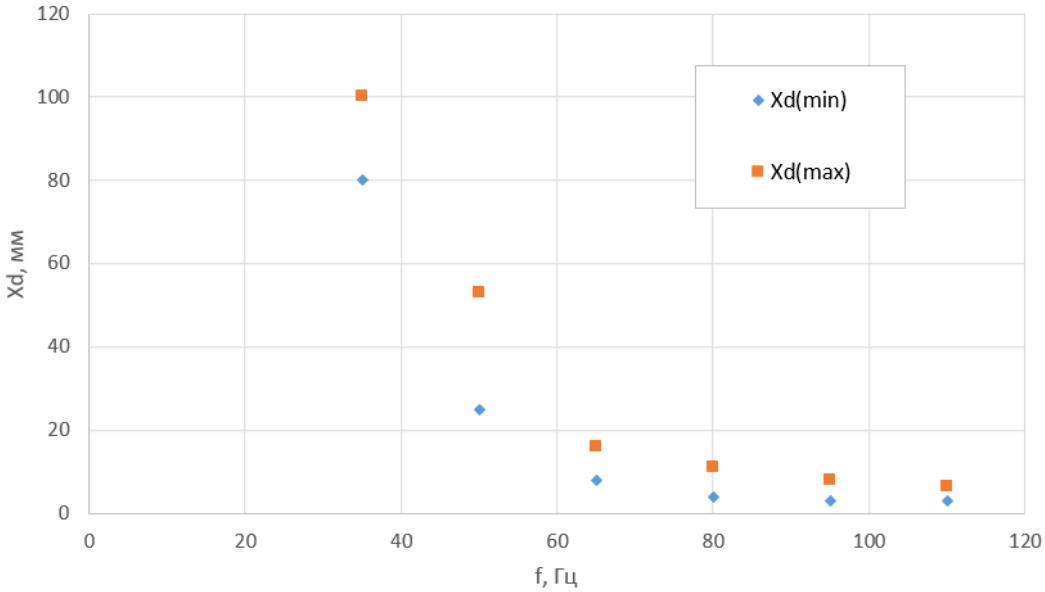


Рис. 4. Влияние частоты колебаний одномассной виброплиты на размах колебаний

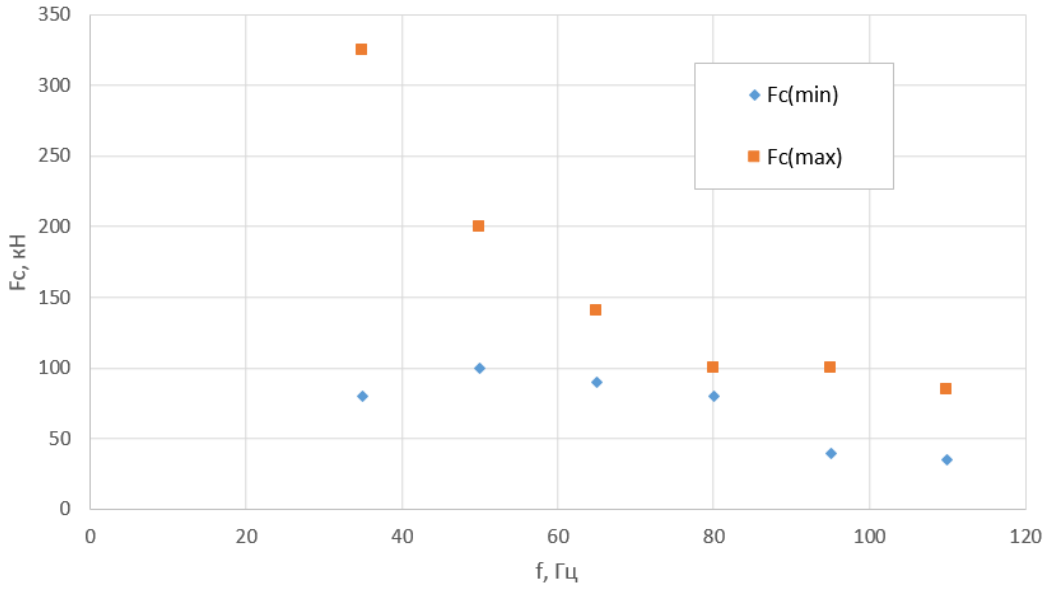


Рис. 5. Влияние частоты колебаний одномассной виброплиты на контактную силу

Таким образом, при проектировании одномассных виброплит целесообразно использовать вибровозбудитель со сравнительно высокими значениями частоты колебаний, превышающими диапазон частоты колебаний современных промышленно выпускаемых виброплит (свыше 110 Гц). Это позволит компенсировать негативные эффекты, связанные с увеличением значения вынуждающей силы. Однако на практике достичь таких высоких значений частоты колебаний достаточно сложно из-за конструктивных ограничений, применяемых вибровозбудителей. Это делает использование двухмассной компоновочной схемы в конструкции виброплит более предпочтительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Афанасьев, М.А. Анализ особенностей конструкций самоходных виброплит / М.А. Афанасьев, И.С. Тюремнов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2025. – Т. 22, № 1(101). – С. 12-25. – DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-12-25. – EDN NTKBQI.

2) Афанасьев, М.А. Статистический анализ технических характеристик самоходных нереверсивных виброплит с различными типами двигателей / М.А. Афанасьев, И.С. Тюремнов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 4(98). – С. 488-501. – DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501. – EDN BRYOWT.

3) Афанасьев, М.А. Статистический анализ технических характеристик самоходных реверсивных виброплит с различными типами двигателей / М.А. Афанасьев, И.С. Тюремнов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 6(100). – С. 814-825. – DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825. – EDN RBLXHW.

4) Tyuremnov, I.S. On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller / I.S. Tyuremnov, A.S. Morev, D.V. Furmanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 11 (1260). – 112033.

УДК 007.52

УПРАВЛЯЮЩАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ KUKA, KAWASAKI И FANUC

О.Д. Белов, А.А. Гречин, Е.Ю. Князев

Научный руководитель – **Д.Н. Мизгирев**, ассистент

Ярославский государственный технический университет

Рассматриваются управляющие платформы промышленных роботов KUKA, Kawasaki и FANUC. Актуальность исследования обусловлена необходимостью выбора оптимальной программно-аппаратной архитектуры при внедрении средств автоматизации. В работе последовательно рассмотрены: аппаратная часть, программное обеспечение, а также специализированные инструменты. Выявлены и систематизированы преимущества платформ в разрезе надежности, гибкости программирования, точности позиционирования и стоимости владения.

Ключевые слова: *управляющая платформа, роботизированная система, промышленная робототехника, контроллер, KUKA, Kawasaki, FANUC, KRL, AS, KAREL, автоматизация*

CONTROL PLATFORM FOR ROBOTIC SYSTEMS: COMPARATIVE ANALYSIS OF KUKA, KAWASAKI AND FANUC SOLUTIONS

O.D. Belov, A.A. Grechin, E.Y. Knyazev

Scientific Supervisor **– D.N. Mizgirev**, Assistant

Yaroslavl State Technical University

The control platforms of KUKA, Kawasaki, and FANUC industrial robots are considered. The relevance of the study is due to the need to select the optimal hardware-software architecture when implementing automation tools. The paper sequentially examines: the hardware, the software, as well as specialized tools. The advantages of the platforms in terms of reliability, programming flexibility, positioning accuracy, and total cost of ownership are identified and systematized.

Keywords: *control platform, robotic system, industrial robotics, controller, KUKA, Kawasaki, FANUC, KRL, AS, KAREL, automation*

В данной статье проводится сравнительный анализ управляющих платформ трех ведущих мировых производителей промышленных роботов: KUKA (Германия), Kawasaki (Япония) и FANUC (Япония). Управляющая платформа, включающая в себя аппаратный контроллер и программное обеспечение, является ключевым элементом любой роботизированной системы, определяющим ее функциональность, гибкость, производительность и стоимость владения. В работе детально рассматриваются архитектура, языки программирования, специализированное ПО, а также преимущества и недостатки каждой из систем. На основе проведенного анализа формулируются практические выводы и рекомендации по выбору платформы в зависимости от конкретных производственных задач.

В эпоху четвертой промышленной революции («Индустрия 4.0») промышленные роботы перестали быть узкоспециализированным инструментом для крупносерийного производства и превратились в гибкий, интеллектуальный компонент современных производственных систем. Однако эффективность и потенциал робота определяются не только его механической частью, но и, в первую очередь, его управляющей платформой. Управляющая платформа представляет собой сложный программно-аппаратный комплекс, который включает в себя контроллер, операционную систему, среду программирования и инструменты для интеграции с внешним оборудованием.

Целью данной статьи является комплексный обзор и сравнительный анализ управляющих платформ KUKA, Kawasaki и FANUC с выявлением их ключевых преимуществ и недостатков для формирования обоснованных критериев выбора в различных промышленных сценариях.

1. Управляющая платформа KUKA

Немецкая компания KUKA известна своими передовыми инженерными решениями, которые делают ставку на гибкость, мощность и открытость архитектуры.

Основой систем управления KUKA долгое время служил контроллер KR C4, который стал революционным решением, объединившим управление роботом, ЧПУ и функции безопасности. Это позволило значительно упростить архитектуру роботизированных ячеек и снизить затраты на дополнительное оборудование. Контроллеры KUKA построены на базе ПК-архитектуры с открытой программной средой, что обеспечивает широкие возможности для расширения и адаптации под конкретные задачи заказчика [2].

Рис. 1. Управляющий модуль KUKA KRC4 [2]

Языком программирования является KRL (KUKA Robot Language) – это мощный, но сложный в освоении язык, который предоставляет опытным программистам полный контроль над роботом.

В 2025 году KUKA представила новую операционную систему iiQKA.OS2. Эта ОС на базе Linux объединяет все роботы KUKA в единой среде. Ключевые особенности ОС:

- Виртуальный контроллер: позволяет осуществить виртуальный запуск роботизированной ячейки еще до поставки физического оборудования.
- Веб-интерфейс: Современный, интуитивно понятный интерфейс, доступный через веб-браузер.
- Кибербезопасность: Система сертифицирована по стандартам киберустойчивости IEC 62443 и соответствует новым нормам безопасности ISO 10218:2025.

К недостаткам платформы KUKA можно отнести сложность языка KRL, требующий высокой квалификации инженерного и программного персонала, а также стоимость покупки и последующего обслуживания. [6]

2. Управляющая платформа Kawasaki

Kawasaki Heavy Industries – одна из первых робототехнических компаний, начавшая производство промышленных роботов в 1960-х годах в Японии. Их платформа делает акцент на надежности, простоте эксплуатации и специализированных решениях.

Kawasaki предлагает несколько линеек контроллеров, таких как серии E и F которые отличаются компактностью и высокой производительностью. Контроллеры серии E оснащены мощным процессором, обеспечивающим высокую точность управления траекторией. Серия F отличается компактностью, малым весом и малым энергопотреблением [1].

Рис. 2. Управляющий модуль Kawasaki серии F02 [1]

Языком программирования является AS (Application Software): это основной язык программирования роботов Kawasaki. Он прост в освоении и позволяет создавать сложные алгоритмы управления движением и логикой.

Для офлайн-программирования и симуляции используется K-ROSET. Это программное обеспечение, которое позволяет создавать и отлаживать программы без остановки реального производства.

К недостаткам относится: малая распространённость в мире и закрытость платформы в целом, что ограничивает в возможностях изменений и интеграций в код решений, непредусмотренных производителем. [4]

3. Управляющая платформа FANUC

FANUC – крупнейший в мире Японский производитель систем ЧПУ и промышленных роботов, делающий акцент на максимальной надежности, стандартизации и интеграции.

Основным продуктом FANUC являются контроллеры серии R-30iB и более ранние R-30iA. Это самые распространённые, надежные устройства, которые используют единую аппаратную платформу как для роботов, так и для станков с ЧПУ FANUC. Архитектура FANUC является закрытой: аппаратное и программное обеспечение глубоко интегрированы и жестко контролируются производителем [3].

Рис. 3. Управляющий модуль FANUC R-30iB [3]

У данного производителя имеется два основных языка программирования TP (Teach Pendant) и KAREL. Первый это простой язык, понятный операторам на цеховом уровне, а

второй более мощный, предназначенный для продвинутых программистов, для реализации сложной логики взаимодействия с внешними устройствами и создания специализированных приложений [5].

Также для 3D-симуляции и офлайн-программирования есть ROBOGUIDE**,** позволяющая создавать точные цифровые копии роботизированных ячеек и отлаживать программы в виртуальном пространстве.

Ключевым преимуществом FANUC является интегрированная система технического зрения iRVision, которая легко настраивается и программируется через единую среду контроллера [7].

Главным недостатком является сложный интерфейс: хотя интерфейс FANUC логичен и функционален, многие пользователи и интеграторы отмечают, что он менее интуитивен и требует более длительного обучения.

Проведенный анализ показывает, что все три управляющие платформы – KUKA, Kawasaki и FANUC – являются высокотехнологичными решениями мирового уровня. Выбор между ними не сводится к поиску лучшей платформы, а должен основываться на четком понимании специфики решаемых задач и приоритетов предприятия (табл. 1).

На основе анализа интеграционных возможностей можно сформулировать гипотезу: в эпоху Индустрии 4.0 к управляющим платформам промышленных роботов предъявляется комплекс требований, выходящих за рамки традиционных параметров точности и надёжности. Ключевыми становятся:

- Открытость архитектуры – возможность взаимодействия с внешними IT-системами через стандартные API и протоколы.
- Встроенные средства кибербезопасности – сертификация по IEC 62443, контроль доступа, шифрование.
- Наличие среды офлайн-программирования и симуляции для сокращения времени ввода в эксплуатацию.
- Интуитивность интерфейса и низкий порог обучения для операторов и технологов.
- Возможность удалённого мониторинга, диагностики и предиктивного обслуживания.
- Гибкость языка программирования – сочетание простого цехового уровня и мощного низкоуровневого инструментария.

Таблица 1. Сравнение выполнения этих требований тремя рассматриваемыми платформами

Требование	KUKA (KR C4 / iiQKA.OS2)	Kawasaki (серии E/F)	FANUC (R-30iB)
Открытость архитектуры	Высокая (ПК-архитектура, Linux, открытые API)	Низкая (закрытая платформа, ограниченные возможности модификации)	Низкая / Средняя (глубокая закрытая интеграция, но есть язык KAREL)
Кибербезопасность	Высокая (сертификация IEC 62443, соответствие ISO 10218:2025)	Не заявлена явно (закрытость отчасти компенсирует риски)	Средняя (ролевая модель, но менее продвинута, чем у KUKA)
Офлайн-программирование и симуляция	iiQKA.OS с виртуальным контроллером (высокая точность)	K-ROSET (базовая симуляция)	ROBOGUIDE (мощная, с поддержкой iRVision)
Интуитивность интерфейса	Высокая (веб-интерфейс)	Средняя (традиционный пульт, но язык AS прост)	Низкая/Средняя (функционально, но требует длительного обучения)
Удаленный мониторинг и диагностика	Встроенные средства через веб-интерфейс и облачные сервисы	Ограниченные (через K-ROSET или дополнительное ПО)	Доступно через ROBOGUIDE и опциональные модули (iRVision Monitor)
Гибкость языка программирования	Высокая (KRL – мощный, но сложный)	Средняя (AS – простой, но менее гибкий)	Высокая (TP для цеха, KAREL для сложной логики)

Из таблицы видно, что платформа KUKA в наибольшей степени соответствует современным требованиям открытости, безопасности и удобства интеграции в цифровое производство. FANUC остаётся лидером по надежности и стандартизации, особенно в средах, где преобладает оборудование этого же вендора. Kawasaki предлагает баланс надёжности и простоты, но уступает в открытости и гибкости при интеграции с гетерогенными системами.

Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу: при выборе управляющей платформы для современного предприятия на первый план выходят именно интеграционные характеристики, а не только классические показатели точности или грузоподъёмности. Дальнейшее развитие систем управления будет идти по пути унификации протоколов, встроенной кибербезопасности и облачных сервисов управления роботизированным парком.

В заключение стоит отметить общую тенденцию в развитии управляющих платформ: движение в сторону унификации, открытости и создания экосистем. Появление вендор-независимых платформ управления парком роботов указывает на то, что будущее за интеллектуальными системами, способными объединять разнородное оборудование в единую, гибко управляемую сеть. Данная трансформация является прямым следствием изменения роли промышленного робота в структуре современного предприятия. Если ранее роботизированная ячейка функционировала как автономная единица, взаимодействующая с внешним миром лишь посредством дискретных сигналов, то сегодня робот становится полноправным узлом цифрового производства, интегрированным в общезаводскую информационную магистраль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) KawasakiRobotics: офиц. сайт. – URL: https://kawasakirobotics.com/ (дата обращения: 05.04.2026)

2) KUKA: офиц. сайт. – URL: https://www.kuka.com/ (дата обращения: 05.04.2026)

3) FANUC: офиц. сайт. – URL: https://www.fanuc.com/ (дата обращения: 05.04.2026)

4) Качоровский, П. 74 функции и опции в роботах Kawasaki Robotics, которые вам, как робототехнику, стоит знать. – URL: https://www.astor.com.pl/ (дата обращения 07.04.2026)

5) Решения для роботизированной производственной линии: электронный ресурс. – URL: https://www.lh-robot.ru/ (дата обращения 06.04.2026)

6) Дубинина, В.В. Анализ технико-экономических показателей промышленных роботов: электронный ресурс. – URL: https://mce.su/ (дата обращения 07.04.2026)

7) Промышленные роботы Kawasaki vs FANUC: сравнение и критерии выбора: электронный ресурс. – URL: https://vt-robotics.ru/ (дата обращения 08.04.2026)

УДК 62-2:62-59:621

АЛГОРИТМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПАЛЛЕТЫ ПО РОЛИКУ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

А.С. Гуськова, Е.В. Сафронов

Научный руководитель – **Е.В. Сафронов**, канд. техн. наук, доцент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Использование гравитационных стеллажей для паллет способствует увеличению плотности хранения паллетированных грузов на складах, увеличению производительности их обработки и требуют меньшего количества обслуживающего линейного персонала. Для обеспечения безопасной работы гравитационных стеллажей применяются тормозные ролики, ограничивающие скорость движения паллеты в допустимых пределах. Существующие на рынке тормозные ролики являются нерегулируемыми и не способны изменять тормозной момент в процессе работы. Разработан ролик динамического торможения, который при изменении тормозного сопротивления в цепи якоря его двигателя регулирует скорость движения паллеты по ролику. Предложено два алгоритма работы ролика динамического торможения в гравитационном стеллаже. Проведена проверка работы одного из алгоритмов и получены результаты регулирования скорости движения паллеты. Рассмотрены возможности применения каждого алгоритма для стеллажей с разными условиями работы и установленных в разных зонах склада.

Ключевые слова: *тормозной ролик, гравитационный роликовый конвейер, паллета, динамическое торможение, алгоритм движения*

ALGORITHMS FOR REGULATING THE SPEED OF PALLET MOVEMENT ON THE DYNAMIC BRAKING ROLLER

A.S. Guskova, E.V. Safronov

Scientific Supervisor – **E.V. Safronov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

The use of gravity pallet racks helps to increase the storage density of palletized goods in warehouses, increase their processing productivity and require fewer line staff. To ensure the safe operation of gravity racks, brake rollers are used to limit the speed of the pallet within acceptable limits. The brake rollers available on the market are unregulated and are not capable of changing the braking torque during operation. A dynamic braking roller has been developed, which, when the braking resistance in the armature circuit of its motor changes, regulates the speed of the pallet along the roller. Two algorithms for the operation of a dynamic braking roller in a gravity rack are proposed. The operation of one of the algorithms was checked and the results of regulating the pallet speed were obtained. The possibilities of applying each algorithm to racks with different working conditions and installed in different warehouse areas are considered.

Keywords: *brake roller, gravity roller conveyor, pallet, dynamic braking, motion algorithm*

Введение

Одним из решений в повышении производительности обработки паллетированных грузов на складах является использование гравитационных стеллажей. За счет глубинного способа хранения в гравитационных стеллажах и отсутствия необходимости в проходах между стеллажами, увеличивается полезная площадь склада на 60% по сравнению с традиционными фронтальными стеллажами [1]. Гравитационные стеллажи значительно ускоряют складские операции, обеспечивают высокую производительность отгрузки (до 90 паллет/час) и быструю окупаемостью затрат, требуют меньшее количество обслуживающего персонала [2]. Принципиальное конструктивное отличие гравитационного стеллажа от других типов стеллажей для паллет состоит в его динамической части, закрепленной на стеллажной металлоконструкции. Динамическая часть представляет собой гравитационный

роликовый конвейер (ГРК), состоящий из неприводных несущих роликов и элементов безопасности, таких как тормозные ролики (ТР) и устройство остановки и разделения паллет (УОРП) [3, 4]. Одним из требований обеспечения безопасной работы ГРК является ограничение скорости движения паллеты по ТР, скорость которой не должна превышать допустимую [V] [5].

Одним из показателей эффективности работы ГРК для паллет является его пропускная способность, которая определяется количеством паллет, перемещающихся по ГРК за определенный промежуток времени [6]. Показателем уровня пропускной способности является эффективная скорость движения паллеты по ТР, которая наиболее приближена к допустимой скорости [V], но не превышает ее. Анализ работ [3, 4] показал, что ТР фрикционного и магнитного принципа торможения не позволяют регулировать тормозной момент в процессе эксплуатации (без демонтажа/монтажа и разборки ТР), а движение по ним паллет малой (от 250 до 500 кг) и средней (до 1000 кг) масс происходит со скоростью значительно ниже эффективной.

В работах [7, 8] был предложен ролик динамического торможения (РДТ), способный изменять тормозной момент, приведенный к обечайке ролика от встроенного в его конструкцию двигателя путем введения тормозного сопротивления в цепь якоря. Выбор механической характеристики двигателя основывался на принципе обеспечения движения паллеты с эффективной скоростью, а выбранная в этом случае механическая характеристика называется эффективной. Для автоматической работы РДТ в ГРК необходимо внедрить систему управления (СУ), которая будет подбирать эффективную механическую характеристику из набора экспериментально полученных характеристик.

В работе [9] был предложен алгоритм настройки всех РДТ в ГРК по сигналу от 1-го РДТ, установленного со стороны загрузки гравитационного канала (рис. 1). Основным условием работы алгоритма является расположение паллет одинаковой массы в ГРК. Если это условие будет нарушено, возможно возникновение группового движения паллет, которое приведет к повышенным динамическим нагрузкам на гравитационный стеллаж и последующему его разрушению [10].

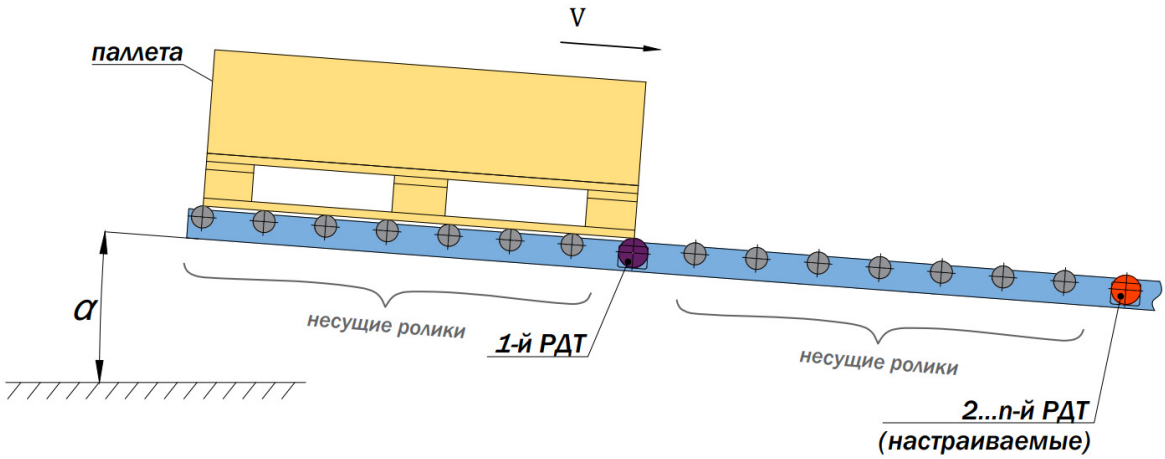


Рис. 1. Схема канала ГРК с установленными РДТ для работы по алгоритму выбора эффективной характеристики

Работа предложенного алгоритма проверялась на стенде, имитирующем движение паллеты по ТР. Описание работы стенда, и проверка работы алгоритма РДТ в канале гравитационного стеллажа по 1-му РДТ приведены в [11]. Проверка работы алгоритма проводилась в четыре этапа.

В первом и третьем этапах груз, имитирующий приложенную массу от веса паллеты к обечайке ролика, устанавливался в положение, при котором он приобретал потенциальную

энергию, необходимую для преобразования в кинетическую энергию на втором и четвертом этапах.

Второй этап имитировал работу РДТ на механической характеристике «по умолчанию», которая в общем случае должна иметь добавочное сопротивление $R_{\partial} < 0{,}5$. В проверке работы алгоритма в качестве характеристики «по умолчанию» была выбрана естественная механическая характеристика (добавочное сопротивление $R_{\partial} = 0$). Эксперимент проводился с грузами, масса $m_г$ которых эквивалентна массе паллеты m в соотношении 1:50 и имитировал движение паллеты по ГРК с уклоном ГРК $tan\alpha = 4\%$. Масса груза $m_г$ эквивалентна массе паллеты m в соотношении 1:50.

Четвертый этапимитировал движение паллеты по настроенным роликам, которые настраиваются на эффективную механическую характеристику, имеющую эффективную скорость для вычисленной массы паллеты на втором этапе. Эффективность работы ГРК по предложенному алгоритму будет зависеть от степени дискретности механических характеристик – чем их больше, тем больше вероятность, что паллеты будут иметь эффективную скорость.

На графике (рис. 2) продемонстрированы результаты экспериментальных исследований работы РДТ по алгоритму подбора эффективной механической характеристики.

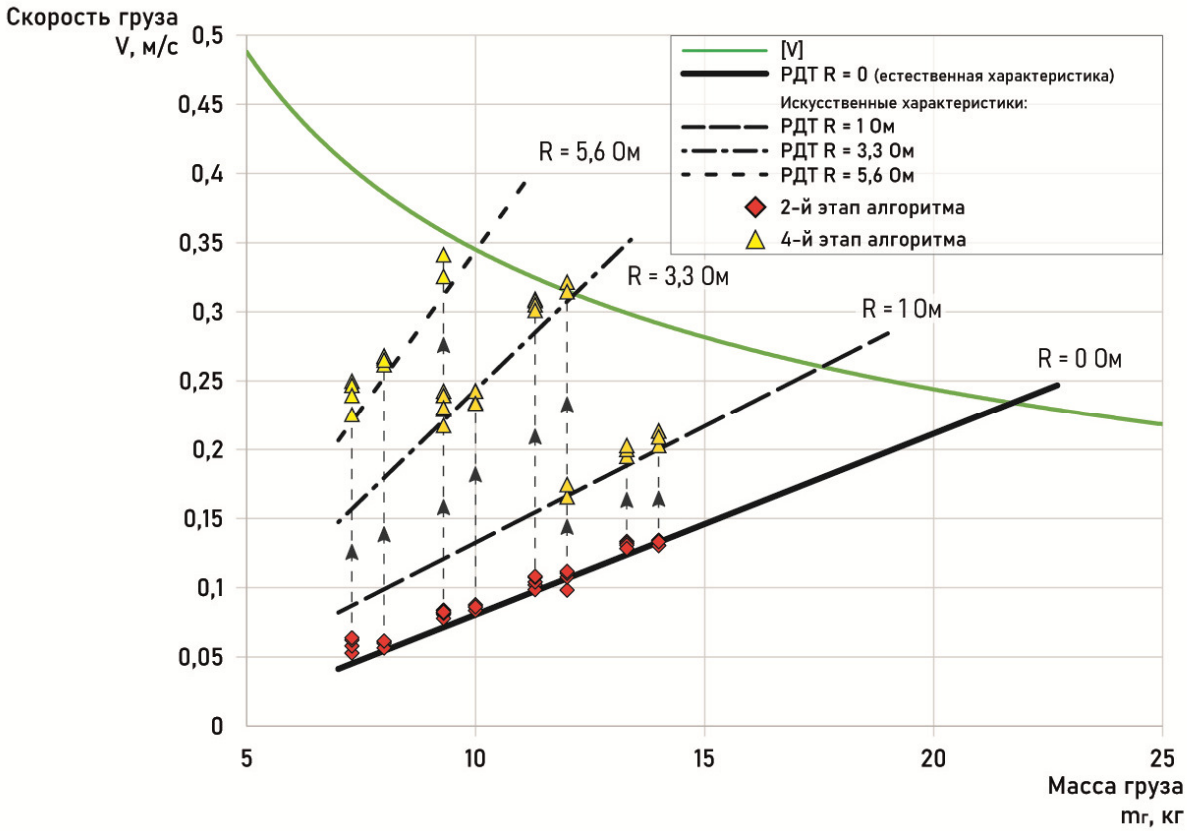


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований работы алгоритма подбора эффективной механической характеристики

Абсолютная погрешность определения массы груза на естественной механической характеристике на втором этапе алгоритма программы не превышают 10%. Ошибка регулирования скорости опускания груза при работе двигателя на искусственных механических характеристиках на четвертом этапе алгоритма программы не превышает 7,4% – при $R_д = 1$ Ом, до 9,5% – при $R_д = 3{,}3$ Ом, до 13,6% – при $R_д = 5{,}6$ Ом. В литературе посвященной теории систем автоматического регулирования рекомендуется ограничивать ошибку регулирования в пределах $\pm 5\%$ [12]. Ошибка регулирования при $R_д = 5{,}6$ Ом

превышает рекомендуемый интервал, но необходимо учесть, что абсолютная погрешность включает в себя инструментальную погрешность, влияние которой на ошибку регулирования оценить количественно проблематично.

Также был разработан алгоритм работы РДТ в ГРК на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора), функцией которого является поддержание заданного параметра в определенном интервале. Аналогично предыдущему алгоритму изначально РДТ настраивается на характеристику «по умолчанию», которая может быть как механической, так и электромеханической. Имея обратную связь по скорости, алгоритм получает значение регулируемой скорости $V_{рег.}$ паллеты и определяет величину отклонения от заданной скорости, скорость изменения отклонения и накопленную ошибку. Исходя из полученных слагаемых формируется управляющий сигнал, передаваемый на потенциометр. Заданная скорость $V_{зад.}$составляет 90-95% от допустимой скорости $[V]$паллеты, масса которой определяется через обратную связь по току или скорости и характеристику «по умолчанию». Для работы ПИД-регулятора необходимо перед началом эксплуатации ГРК экспериментально определить коэффициенты пропорциональной k_p, интегральной k_i и дифференциальной k_d составляющих регулятора. Коэффициенты должны подбираться таким образом, чтобы время $t_п$ переходного процесса не превышало времени передвижения паллеты по РДТ – 2-7 с для масс паллет от 250 до 1500 кг (рис. 3), а также установившаяся регулируемая скорость $V_{рег.}$ не выходила за пределы интервала 0,95-1,05$V_{зад.}$который ограничивается допускаемой статической ошибкой $\Delta = \pm 5\%$ [12].

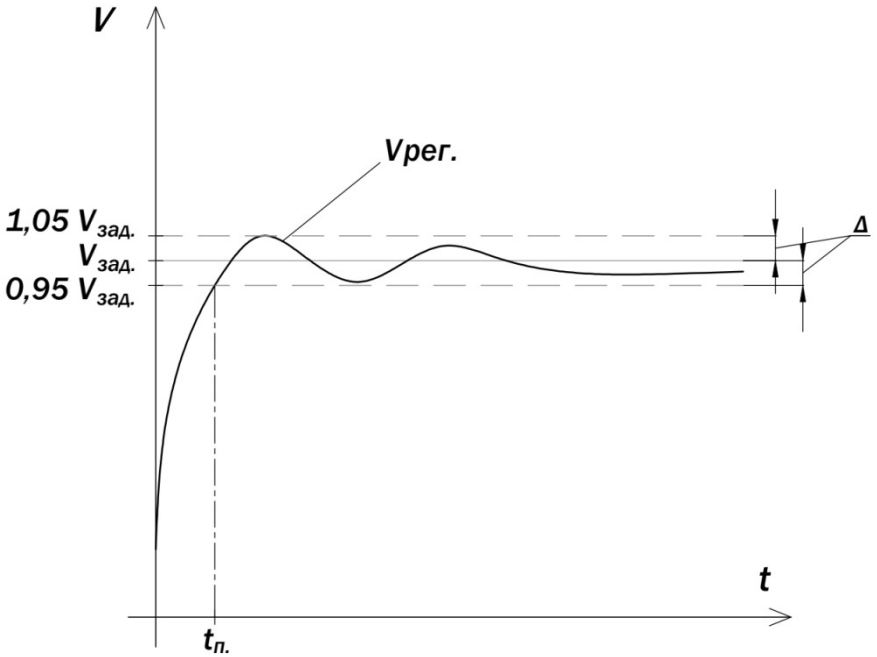


Рис. 3. Характер переходного процесса при работе пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора

За счет внедрения потенциометра в СУ РДТ появляется возможность непрерывно регулировать добавочное сопротивление в цепи якоря его двигателя. Поэтому для работы РДТ по алгоритму, основанному на ПИД-регуляторе, достаточно иметь 2-3 механических или электромеханических характеристик, в случае использования обратной связи по скорости или току соответственно для определения массы паллеты, что существенно меньше, чем требует алгоритм по настройке от 1-го РДТ в гравитационном канале.

Для работы алгоритма на основе ПИД-регулятора каждый РДТ должен снабжаться свой независимой СУ, что увеличивает требования к вычислительным мощностям СУ гравитационного стеллажа, но дает возможность размещать в ГРК паллеты разной массы.

Однако при настройке каждого РДТ на эффективные характеристики для паллет разных масс в одном ГРК произойдет групповое движение паллет, состоящее из одного или нескольких блоков паллет, в которых паллета большей массы расположена следом за паллетой меньшей массы [10]. Таким образом необходимо настраивать все РДТ на одну и ту же механическую характеристику, которая будет являться эффективной для паллеты максимальной массы в гравитационном канале. Для выполнения этого условия ГРК необходимо снабдить системой слежения за паллетами, что также увеличит вычислительные мощности СУ.

Анализ полученных результатов показал, что:

- алгоритм, работающий по настройке с 1-го РДТ в ГРК со стороны загрузки целесообразно применять в местах складирования паллетированного товара, где нет высоких требований к скорости его загрузки и разгрузки.

- алгоритм на основе ПИД-регулятора целесообразно применять при высоком уровне автоматизации склада и в зонах комплектации товаров, при загрузке гравитационного канала паллетами разной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Vujanac, R. Dynamic storage systems / R. Vujanac, N. Miloradovic, S. Vulovic // International Journal of Engineering. – 2016. – Vol. XIV. – P. 79-82.

2) Boywitz, D. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage systems / D. Boywitz, N. Boysen // Computers & Operations Research. – 2018. – Vol. 100. – P. 189-200.

3) Сафронов, Е.В. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа / Е. В. Сафронов, И. А. Шарифуллин, А. Л. Носко. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Литературное агентство "Университетская книга", 2018. – 72 с.

4) Сафронов, Е.В. Тормозные ролики для паллетных гравитационных стеллажей. Конструкция. Теория. Методы расчета. Эффективность применения / Е.В. Сафронов, А.Л. Носко, И.А. Шарифуллин. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – 116 с.

5) Носко, А.Л., Сафронов Е.В. Методика определения максимально допустимой скорости движения поддона на гравитационном роликовом конвейере // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 8 (689). – С. 33–41.

6) LOGOS Logistics: Увеличить пропускную способность. – URL: https://www.logos3pl.com/ru/glossary/throughput/ (дата обращения: 03.04.2026)

7) Патент № 217592 U1 Российская Федерация, МПК G01M 13/00. Стенд для испытания тормозных роликов гравитационных конвейеров и стеллажей: опубл. 06.04.2023 / А.Л. Носко, Е.В. Сафронов, И.А. Шарифуллин, А.С. Гуськова

8) Гуськова, А.С. Тормозной ролик рекуперативного торможения для паллетных гравитационных стеллажей / А.С. Гуськова, Е.В. Сафронов, А.Л. Носко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – № 4(360). – С. 25-33.

9) Гуськова, А.С. Алгоритм движения паллеты по ролику динамического торможения гравитационного стеллажа / А.С. Гуськова, Е.В. Сафронов, А.Л. Носко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 4(372). – С. 72-80.

10) Сафронов, Е.В. Математическая модель расчета скорости группового движения паллет по гравитационному роликовому конвейеру стеллажа / Е.В. Сафронов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 4(372). – С. 62-71.

11) Гуськова, А.С. Алгоритм движения паллеты по ролику динамического торможения гравитационного стеллажа / А.С. Гуськова, Е.В. Сафронов, А.Л. Носко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 4(372). – С. 72-80.

12) Основы автоматического управления / под ред. В.С. Пугачева. – М.: Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1967. – 680 с.

УДК 621.865.8

ОСОБЕННОСТИ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ПОГРУЗОЧНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.М. Емелин

Научный руководитель – **Л.М. Шамахов,** ст. преподаватель.

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются перспективы применения коллаборативных роботов для автоматизации транспортно-погрузочных работ на предприятиях по производству железобетонных изделий. На основе анализа современных исследований показано, что применение коллаборативных роботов предпочтительнее традиционных промышленных роботов благодаря высокой гибкости, безопасности совместной работы с человеком и простоте переналадки. Выделены ключевые особенности эксплуатации коллаборативных роботов в условиях тяжелой промышленности: работа с высокими нагрузками, требования к точности позиционирования (в пределах 1-5 мм) и необходимость интуитивного программирования. Приведены примеры реализации систем управления и технологий обучения демонстрацией.

Ключевые слова: *коллаборативный робот, транспортно-погрузочные работы, железобетонные изделия, промышленная автоматизация, программирование роботов, безопасность*

SPECIFIC FEATURES OF COLLABORATIVE ROBOTS FOR HANDLING AND LOADING OPERATIONS IN PRECAST CONCRETE ENTERPRISES

A.M. Emelin

Scientific Supervisor – **L.M. Shamakov,** Senior Lecturer.

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the prospects for using collaborative robots to automate transportation and loading operations at enterprises producing reinforced concrete products. Based on an analysis of current research, it is shown that the use of collaborative robots is preferable to traditional industrial robots due to their high flexibility, safety in working with humans, and ease of reconfiguration. The article highlights the key features of using collaborative robots in heavy industry, such as handling high loads, precise positioning requirements (within 1-5 mm), and the need for intuitive programming. The article also provides examples of implementing control systems and demonstration-based learning technologies.

Keywords: *collaborative robot, transportation and loading operations, reinforced concrete products, industrial automation, robot programming, and safety*

Современное производство железобетонных изделий характеризуется тяжелыми условиями труда, наличием монотонных операций и высокими требованиями к безопасности. Транспортировка готовой продукции (плит, балок, блоков) и погрузочные работы остаются одними из самых трудоемких и травмоопасных процессов. Традиционные подходы к автоматизации, основанные на использовании промышленных роботов, часто оказываются неэффективными из-за жесткости производственных линий и необходимости частой переналадки под различные типоразмеры изделий.

В последнее десятилетие активное развитие получило направление коллаборативной робототехники. Как отмечают авторы работы [1], коллаборативные роботы – это рабочие машины, способные безопасно сотрудничать с человеком в едином рабочем пространстве, применяемые для задач, которые нельзя полностью автоматизировать. Целью данной работы является анализ особенностей применения коллаборативных роботов для транспортно-погрузочных работ на железобетонных предприятиях, обоснование их выбора перед

промышленными аналогами, а также определение требований к точности и методам программирования.

Промышленные роботы, ориентированные на автономную работу с высокими скоростями и нагрузками, не оснащены встроенными средствами обнаружения человека, что требует их изоляции защитными ограждениями и исключают возможность гибкого взаимодействия с рабочим персоналом [2]. В свою очередь, коллаборативные роботы используют сенсорные системы (силомоментные сенсоры и техническое зрение), обеспечивающие безопасную остановку или снижение скорости при контакте с человеком, что позволяет организовать совместную деятельность в общем рабочем пространстве без физических барьеров.

В условиях широкой номенклатуры железобетонных изделий критически важна гибкость. Стационарные промышленные роботы требуют сложного фундамента и длительного перепрограммирования при смене задачи. Коллаборативные роботы обладают высокой мобильности, что позволяет оперативно перемещать их между технологическими участками, а процесс переналадки занимает минуты благодаря интуитивным методам программирования [3].

Основная особенность транспортно-погрузочных работ на предприятиях железобетонной отрасли - значительная масса перемещаемых объектов. Перспективным направлением преодоления ограничений по грузоподъемности является использование нескольких коллаборативных роботов для совместного перемещения одного объекта. В области координации нескольких манипуляторов разрабатываются распределенные системы управления, обеспечивающие безопасную синхронизацию движений при работе с общим грузом.

Транспортно-погрузочные работы на железобетонных предприятиях предъявляют специфические требования к точности позиционирования. В отличие от прецизионной сборки микроэлектроники, где точность требуется на уровне микрон, для укладки бетонных плит или блоков допустимая погрешность составляет от 1 до 5 мм (а то и более). Такую точность современные коллаборативные роботы обеспечивают без труда [4].

Ключевым требованием для предприятий железобетонной отрасли является легкость программирования. Оператору не обязательно иметь навыки программирования. В условиях частой смены номенклатуры продукции это критически важно. Например, существует технология “обучение движением”, где оператор может вручную перемещать руку робота по нужной траектории, запоминая ключевые точки. Одно из стандартных решений для программирования коллаборативных роботов – применение специальных интуитивных интерфейсов для создания точек погрузки и выгрузки. Вместе с тем, перспективным направлениям является управление с помощью жестов. Как показано в работе [5], система технического зрения позволяет распознавать жесты “старт” и “стоп”, а также корректировать скорость движения в зависимости от расстояния до человека, что делает взаимодействие более безопасным и гибким.

Применение коллаборативных роботов на предприятиях железобетонных изделий является перспективным направлением. Их ключевые особенности - безопасность, гибкость и возможность совместной работы с человеком делают их более предпочтительными по сравнению с традиционными промышленными роботами для решения транспортно-погрузочных задач.

Возможность применения нескольких коллаборативных роботов для преодоления ограничений грузоподъемности, позволит эффективно интегрировать такие системы в тяжелые производственные процессы. Низкие требования к точности и легкость программирования коллаборативных роботов обеспечивают быструю адаптацию к условиям производства. Таким образом, внедрение коллаборативной робототехники на предприятия железобетонной отрасли способствуют повышению производительности и снижению травматизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Батранюк, И.А. Взаимодействие коллаборативных роботов при совместной работе с людьми и другими роботами / И.А. Батранюк, Д.В. Шемет // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т., Красноярск, 12–16 апреля 2021 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2021. – Т. 1. – С. 492–495. – EDN FRSRTM.

2) Илюхин, Ю.В. Обзор решений в области распределения задач между коллаборативным роботом и человеком / Ю.В. Илюхин, А.А. Топорин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2022. – № 3 (62). – С. 58–62. – EDN TWBFNW.

3) Акопян, А.А. Применение коллаборативных роботов в различных отраслях производства / А.А. Акопян, Н.В. Дмитриев // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 43–46. – DOI: 10.26160/2541-8637-2023-11-43-46. – EDN OWZISI.

4) Галин, Р.Р. Моделирование и классификация взаимодействия человека и робота в коллаборативной робототехнической системе / Р.Р. Галин // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 24–29. – DOI: 10.47928/1726-9946-2020-20-3-24-29. – EDN NFSKIT.

5) Абрамов, Н.А. Программирование коллаборативного робота для выполнения технологической операции / Н.А. Абрамов, В.А. Сурин, М. Абдалла // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 7. – С. 868–873. – EDN ATCWNQ.

УДК 621.865.8-52

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАНИПУЛЯТОРА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА

Е.Ю. Князев, А.А. Гречин, О.Д. Белов

Научный руководитель - **Д.Н. Мизгирев**, ассистент

Ярославский государственный технический университет

В статье проведен сравнительный анализ современных методов позиционирования захвата робота-манипулятора в пространстве применительно к задачам оснащения учебного лабораторного стенда. Рассмотрены подходы на основе технического зрения, планирования траектории с использованием G-кодов, сложных систем алгоритмического управления и нейросетевых технологий. Выявлены ограничения данных методов, связанные с вычислительной сложностью, требованиями к калибровке и низкой интеграцией в образовательный процесс. Научно обоснован выбор метода кинематического моделирования и анализа рабочей зоны, дополненного системой диагностики на основе датчиков Холла. Показано, что данный подход сочетает методическую прозрачность, низкую стоимость реализации и создает фундаментальную основу для последующего внедрения интеллектуальных алгоритмов управления. Результаты работы могут быть использованы при проектировании учебно-исследовательских комплексов по робототехнике.

Ключевые слова: *робот-манипулятор, позиционирование захвата, кинематическое моделирование, прямая задача кинематики, датчики Холла, учебный лабораторный стенд, анализ рабочей зоны, машинное зрение, нейросетевое управление*

COMPARATIVE ANALYSIS OF MANIPULATOR END-EFFECTOR POSITIONING METHODS WITH APPLICATION TO EDUCATIONAL AND RESEARCH TEST BENCH TASKS

E.Y. Knyazev, A.A. Grechin, O.D. Belov

Scientific Supervisor - **D.N. Mizgirev**, Assistant

Yaroslavl State Technical University

This paper presents a comparative analysis of state-of-the-art methods for spatial positioning of a robotic manipulator gripper, specifically addressing the tasks of equipping an educational laboratory test bench. Approaches based on computer vision, trajectory planning using G-codes, complex algorithmic control systems, and neural network technologies are examined. Limitations of these methods are identified, including computational complexity, calibration requirements, and poor integration into the educational process. The selection of a kinematic modeling and workspace analysis method, supplemented by a Hall-effect sensor-based diagnostic system, is scientifically substantiated. It is demonstrated that this approach combines methodological transparency, low implementation cost, and provides a fundamental basis for subsequent integration of intelligent control algorithms. The results obtained can be applied in the design of educational and research robotics training systems.

Keywords: *robotic manipulator, gripper positioning, kinematic modeling, forward kinematics, Hall-effect sensors, educational laboratory test bench, workspace analysis, machine vision, neural network control*

Введение

Развитие образовательной робототехники требует создания доступных и методически прозрачных лабораторных стендов. В отличие от промышленных аналогов, учебный манипулятор должен обеспечивать не только выполнение технологической операции, но и наглядную демонстрацию физических принципов, лежащих в основе кинематики и динамики механизмов. Одной из ключевых проблем при проектировании такого стенда является выбор метода **позиционирования захвата**. Под позиционированием в робототехнике понимается процесс определения текущего положения и ориентации рабочего органа (схвата) относительно базовой системы координат с заданной точностью [1].

Существующие подходы к позиционированию варьируются от сложных систем технического зрения до алгоритмов планирования траектории на основе G-кода. Однако в условиях учебной лаборатории данные методы либо избыточны с точки зрения вычислительных ресурсов и стоимости, либо, напротив, представляют собой «черный ящик», скрывающий от студента суть кинематических преобразований. Возникает необходимость в разработке такого алгоритмического обеспечения, которое позволило бы вычислять координаты захвата, опираясь исключительно на внутренние данные о геометрии звеньев и показания простейших датчиков обратной связи, установленных на валах исполнительных механизмов.

Целью работы является сравнительный анализ методов позиционирования применительно к учебному роботу-манипулятору (рис. 1) и научное обоснование выбора подхода, основанного на математическом моделировании кинематики с верификацией по сигналам датчиков Холла. Такой подход позволяет не только реализовать базовую навигацию манипулятора в пространстве без использования дорогостоящих лидаров или систем машинного зрения, но и создает фундаментальную основу для будущей модернизации стенда. Получаемый в ходе работы массив данных о расхождении расчетных и фактических параметров движения (пропуск шагов, люфты) формирует размеченный датасет, который в перспективе может служить обучающей выборкой для внедрения более сложных нейросетевых алгоритмов управления.

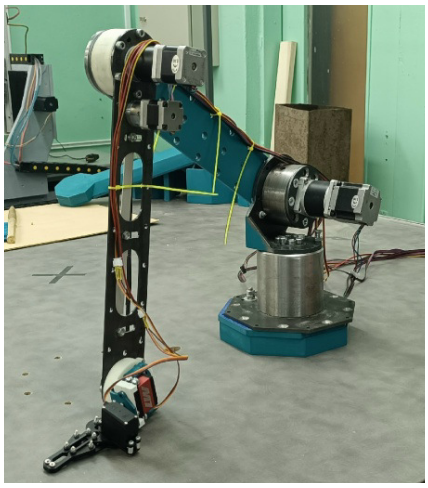


Рис. 1. Учебный робот-манипулятор

1. Методы технического зрения в задачах позиционирования

Методы технического зрения широко применяются для решения задачи позиционирования захвата робота-манипулятора. Данный подход предполагает использование одной или нескольких камер, а также алгоритмов компьютерной обработки изображений для определения пространственного положения как самого манипулятора, так и объектов манипулирования.

В отечественных исследованиях представлены различные реализации данного метода. В частности, разработан метод определения положения манипулятора с непрерывным изгибом секций на базе системы технического зрения без использования специальных маркеров [2]. Другие авторы рассматривают проблематику управления роботом-манипулятором и определения координат объектов в пространстве с использованием технологий машинного зрения, где для описания модели робота и расчета движений применяется кинематический подход с параметрами **Денавита-Хартенберга** [3]. Также исследуются аппаратные аспекты реализации подобных систем, включая способы закрепления камеры на звене манипулятора и принципы построения системы управления на основе зрительной информации [4].

Преимущества. Основным достоинством систем технического зрения является их универсальность — способность работать с объектами произвольной формы и в условиях изменяющейся рабочей среды. Наличие визуальной обратной связи позволяет корректировать траекторию движения манипулятора в реальном времени, компенсируя погрешности позиционирования и адаптируясь к смещению целевых объектов.

Недостатки. Существенным ограничением данного подхода является высокая зависимость точности позиционирования от условий освещения и необходимости предварительной калибровки оборудования [3]. Кроме того, обработка видеопотока в реальном времени требует значительных вычислительных ресурсов, что может усложнить интеграцию системы в учебный лабораторный стенд с ограниченной аппаратной базой.

Технические трудности. Реализация системы позиционирования на основе машинного зрения сопряжена с необходимостью решения ряда технических задач. К ним относятся выбор оптимальной схемы размещения камер, обеспечение синхронизации потоков видеоданных с системой управления приводами, а также разработка алгоритмов распознавания и трекинга объектов в условиях возможных помех и засветок.

Требования к интеграции. Для внедрения данного метода в учебный манипулятор необходимы: установка одной или нескольких камер с разрешением, достаточным для распознавания объектов в рабочей зоне; наличие вычислительного модуля, способного выполнять обработку изображений в реальном времени; разработка программного обеспечения, интегрирующего модули компьютерного зрения с системой управления кинематикой манипулятора. В качестве программной основы могут использоваться библиотеки **OpenCV** и фреймворк **Robot Operating System (ROS)** [3].

Таким образом, метод технического зрения представляет собой функционально развитый, но ресурсоемкий подход к позиционированию захвата, требующий тщательной настройки и калибровки, что в условиях учебного лабораторного стенда может быть избыточным.

2. Программное планирование траектории на основе G-кода

Планирование траектории определяет последовательность перемещений рабочего органа из начального положения в целевое с учётом ограничений рабочей зоны и является одной из ключевых задач робототехники [4]. Разрабатываются программные комплексы, автоматизирующие формирование траектории по различным исходным данным, решающие прямую и обратную задачи кинематики и выполняющие интерполяцию для получения законов изменения обобщённых координат [4].

Для построения траекторий в пространстве обобщённых координат применяют сплайн-интерполяцию, обеспечивающую непрерывность скорости и ускорения на стыках участков, в том числе с использованием **Simulink** [5]. В условиях неизвестной среды с препятствиями востребованы эвристические методы: алгоритм муравьиных колоний [6], его модификации с вероятностными **маршрутными картами** [7] и **алгоритм A*** [8]. Классические методы (псевдо-инверсия, обратные преобразования, потенциальное поле) для многозвенных манипуляторов в сложных средах часто неприемлемы из-за вычислительной трудоёмкости и не всегда гарантируют точное решение [10].

Преимущества. Метод обеспечивает точный контроль положения и ориентации в каждой точке траектории, а сплайн-интерполяция – плавность движения, предотвращающую перегрузки [11]. Формат G-кода стандартизирован и легко интегрируется в существующие системы управления.

Недостатки. Классическое планирование не даёт обратной связи о фактическом положении манипулятора, выполняя команды «вслепую» без возможности коррекции при внешних воздействиях. Общие методы решения кинематической задачи позиционирования итеративны, что ограничивает их применение в реальном времени [5].

Технические трудности. Требуется построение адекватной кинематической модели, реализация прямой и обратной кинематики, эффективная интерполяция и обеспечение бесконфликтного движения при наличии препятствий [7]. Необходим выбор рациональной

траектории, соответствующей как технологическому процессу, так и возможностям манипулятора [5].

Требования к интеграции. Для учебного манипулятора необходимы: математическая модель кинематики, модуль интерпретации **G-кода** в управляющие сигналы и система приводов, способная отрабатывать заданные перемещения с использованием алгоритмов управления на основе обратных задач динамики и датчиков обратной связи [4].

Таким образом, метод планирования траектории – стандартный подход к позиционированию, обеспечивающий точное воспроизведение заданных движений, но не обладающий адаптивностью к изменяющимся условиям среды и не предоставляющий информации о фактическом положении манипулятора в пространстве.

3. Системы автоматического управления приводами манипулятора

Системы управления реализуют непосредственную отработку заданных перемещений исполнительными механизмами с учётом обратной связи и компенсации возмущений, в отличие от методов планирования, формирующих лишь желаемую траекторию. Известны многоцелевые архитектуры, адаптирующие управление движением к изменяющимся условиям и технологическим требованиям [11]. Алгоритмы кинематического управления многозвенными манипуляторами строятся на итерационных или нейросетевых подходах [12]. Контурное управление позволяет оперативно формировать программу движения в реальном времени, в том числе в условиях априорной неопределённости [13]. Для манипуляторов с гибкими звеньями применяются **нейросетевые методы на основе тензодатчиков**, компенсирующие статическую ошибку позиционирования [14], а при работе в неизвестной среде с препятствиями – эвристические алгоритмы типа **A*** [8].

Преимущества. Наличие обратных связей по положению, скорости и усилию повышает точность позиционирования и адаптивность к внешним воздействиям. Многоцелевые архитектуры обеспечивают гибкую перенастройку без изменения аппаратной части, а контурное управление позволяет формировать траекторию непосредственно в процессе операции.

Недостатки. Высокая вычислительная нагрузка на контроллеры при реализации алгоритмов в реальном времени и итерационный характер методов решения кинематической задачи ограничивают применение в быстродействующих системах. Настройка параметров регуляторов требует значительных временных затрат и квалификации персонала.

Технические трудности. Необходимо выбрать оптимальную архитектуру управления, синтезировать регуляторы положения с учётом взаимовлияния звеньев, обеспечить синхронизацию приводов при сложных траекториях и компенсацию динамических ошибок. Контурное управление дополнительно требует методов оперативного пересчёта траектории при изменении условий среды [14].

Требования к интеграции. Для учебного манипулятора нужны: программируемый контроллер с достаточной производительностью; драйверы шаговых двигателей с обратной связью по положению **(датчики Холла, энкодеры)**; программное обеспечение, решающее прямую и обратную задачи кинематики и формирующее управляющие сигналы. Целесообразна многоцелевая структура управления, поддерживающая позиционные и контурные режимы [12].

Таким образом, системы управления – ключевой элемент точного позиционирования, однако их сложность и ресурсоёмкость могут быть избыточными для учебного стенда, где приоритет отдаётся методической прозрачности кинематических преобразований.

4. Нейросетевые и интеллектуальные подходы к управлению

Нейросетевые и интеллектуальные методы представляют собой совокупность подходов, основанных на применении искусственных нейронных сетей, алгоритмов машинного обучения и методов нечеткой логики для решения задач позиционирования и управления роботами-манипуляторами. Данное направление сформировалось на стыке робототехники и искусственного интеллекта и активно развивается в последние годы.

В современных исследованиях представлены различные архитектуры нейросетевых систем управления. Рассмотрена возможность построения алгоритма кинематического

управления для манипуляционных роботов с последовательным соединением звеньев на основе нечеткой нейронной сети, где предлагается формирование обучающей выборки с целью снижения погрешности позиционирования рабочего органа вблизи внешней границы рабочей зоны [15]. Описан метод динамической коррекции траектории манипулятора при высоких требованиях к точности и быстродействию системы на основе нейронной сети прямого распространения, позволяющий учесть динамические свойства манипулятора и планировать траектории, близкие к оптимальным по ряду критериев [16].

В работе по нейросетевой компенсации динамических ошибок рассмотрена позиционная система управления трехзвенным манипулятором, проведено обучение многомерных нейросетевых компенсаторов ошибок, возникающих под влиянием инерционных, кориолисовых и гравитационных моментов нагрузки, и даны рекомендации по программной реализации нейросетевых компенсаторов для реальных позиционных систем управления манипуляционными роботами [17].

Предложен метод управления манипулятором с использованием обучения с подкреплением в глубоких нейронных сетях для захвата движущихся объектов на конвейерной ленте, подробно рассмотрено физико-кинематическое моделирование манипулятора, а также интеграция параметров манипулятора и движущихся объектов в структуру нейронной сети [18]. Проведен сравнительный анализ эффективности алгоритмов **Deep Q-Network** и **Proximal Policy Optimization** для обучения агентов в виртуальной среде, показано, что обученные агенты способны решать поставленную задачу, а модификации позволяют сократить время обучения и количество необходимых шагов в среде [19].

Исследовано применение нейронных сетей прямого распространения и тензодатчиков для компенсации статической ошибки позиционирования и сокращения времени переходного процесса при управлении манипулятором с гибким звеном [20]. Описана **нейро-нечеткая** структура интеллектуальной системы управления перемещением манипулятора по запланированной траектории, состоящая из нечетких **ПД-регуляторов** и многослойных нейронных сетей [21]. Предложена методология построения систем управления на основе алгоритмов глубокого обучения с подкреплением, интегрированная с традиционными методами управления, где гибридная архитектура сочетает детерминированную динамическую модель робота и адаптивный нейросетевой модуль [22].

Преимущества. Основным достоинством нейросетевых и интеллектуальных методов является их способность к адаптации в условиях неопределенности и переменных внешних воздействий. Данные подходы позволяют эффективно решать задачи позиционирования в неструктурированных средах, компенсировать динамические ошибки, вызванные влиянием инерционных и гравитационных нагрузок, а также учитывать упругие деформации звеньев манипулятора. Применение методов обучения с подкреплением дает возможность формировать оптимальные стратегии управления без необходимости построения точных аналитических моделей, что особенно ценно при работе со сложными кинематическими схемами.

Недостатки. Существенным ограничением нейросетевых методов является высокая вычислительная сложность, требующая значительных аппаратных ресурсов для обучения и функционирования нейронных сетей в реальном масштабе времени. Процесс обучения требует большого объема данных и времени, а полученные модели часто оказываются чувствительными к изменению начальных условий и параметров рабочей среды. Кроме того, нейросетевые алгоритмы обладают низкой интерпретируемостью — внутренние механизмы принятия решений остаются скрытыми, что затрудняет анализ причин ошибок позиционирования и отладку системы.

Технические трудности. Реализация нейросетевых методов управления манипулятором сопряжена с необходимостью решения ряда взаимосвязанных задач. К ним относятся: выбор архитектуры нейронной сети и алгоритма обучения; формирование репрезентативной обучающей выборки, охватывающей все возможные конфигурации рабочей зоны; обеспечение вычислительной мощности для работы сети в реальном времени; интеграция нейросетевого модуля с низкоуровневой системой управления приводами.

Дополнительные сложности возникают при переносе обученных моделей из виртуальной среды моделирования на реальное оборудование.

Требования к интеграции. Для внедрения нейросетевых методов в учебный манипулятор необходимы: высокопроизводительный вычислительный модуль с поддержкой библиотек машинного обучения; среда моделирования для предварительного обучения нейронных сетей; система сбора данных с датчиков обратной связи для формирования обучающей выборки и последующей верификации работы обученной модели. Процесс обучения целесообразно проводить в виртуальной среде с последующим дообучением на реальном оборудовании. Применение методов глубокого обучения с подкреплением требует организации безопасной среды для экспериментов и отладки алгоритмов.

Таким образом, нейросетевые и интеллектуальные методы представляют собой наиболее современное и перспективное направление в области позиционирования и управления роботами-манипуляторами, однако их внедрение сопряжено с высокой вычислительной сложностью и значительными требованиями к аппаратному обеспечению, что ограничивает их применение в учебных лабораторных стендах начального уровня. В то же время освоение фундаментальных основ кинематического моделирования, рассмотренных в следующем разделе, является необходимым этапом для последующего перехода к более сложным интеллектуальным системам управления.

5. Кинематическое моделирование и анализ рабочей зоны

Моделирование кинематики и анализ рабочей зоны направлены на математическое описание движения манипулятора, определение границ досягаемости и визуализацию пространства позиционирования захвата. Широко применяется метод **Денавита-Хартенберга**, основанный на однородных матрицах преобразования, для решения прямой задачи кинематики [23]. Альтернативные подходы включают использование блочных матриц [25] и численный метод Монте-Карло для построения рабочей зоны [26]. Для аналитического описания контуров достижимости привлекаются методы аналитической геометрии и теории множеств [27]. Разработаны программные комплексы, реализующие моделирование кинематики и динамики, визуализацию и формирование траекторий [23]. Инверсная кинематика решается, в частности, методом **FABRIK** с прогнозированием положения цели фильтром **Калмана** [28]. Обнаружение столкновений с запретными зонами ведётся на основе области разрешённых конфигураций в пространстве обобщённых координат [29, 30].

Преимущества. Методическая прозрачность и наглядность: студент прослеживает цепочку преобразований от геометрии звеньев к декартовым координатам. Не требуется дорогостоящее аппаратное обеспечение; решение задач кинематики в **Mathcad** не требует программирования [24]. Аналитическое задание рабочей зоны даёт наглядное представление о функциональных возможностях манипулятора.

Недостатки. Классические модели не учитывают люфты, упругие деформации и динамические погрешности, что приводит к расхождению расчётных и фактических координат. Методы поиска траекторий вычислительно затратны и не всегда гарантируют точное решение в реальном времени.

Технические трудности. Требуется выбор математического аппарата (Денавит-Хартенберг, блочные матрицы, кватернионы), разработка эффективных алгоритмов прямой и обратной кинематики с учётом ограничений рабочей зоны, а также интеграция модели с датчиками обратной связи для верификации координат.

Требования к интеграции. Для учебного манипулятора необходимы: математическая модель кинематики на основе геометрии звеньев; программный модуль решения прямой задачи и визуализации рабочей зоны; датчики обратной связи (датчики Холла или энкодеры) на валах двигателей и выходных звеньях; модуль сравнения расчётных и фактических координат для диагностики пропусков шагов и проскальзываний.

Таким образом, кинематическое моделирование и анализ рабочей зоны – фундаментальный подход, сочетающий методическую прозрачность с наглядностью и создающий основу для последующего перехода к интеллектуальным системам управления за счёт накопления данных о расхождении расчётных и фактических параметров движения.

Обоснование выбора метода моделирования и анализа рабочей зоны для учебного манипулятора

Проведенный в предыдущих разделах сравнительный анализ методов позиционирования захвата манипулятора позволяет перейти к научному обоснованию выбора наиболее рационального подхода применительно к учебному лабораторному стенду. Критериями выбора выступают: методическая прозрачность для обучающихся, минимальные требования к аппаратному обеспечению, возможность диагностики погрешностей позиционирования и потенциал для последующей модернизации в направлении интеллектуальных систем управления.

Рассмотренные методы технического зрения, несмотря на их универсальность и адаптивность, характеризуются высокой вычислительной нагрузкой и зависимостью от условий освещения и калибровки оборудования. Методы планирования траектории на основе **G-кода**, являясь стандартом промышленной автоматизации, представляют собой **«черный ящик»**, скрывающий от студента суть кинематических преобразований. Системы и алгоритмы управления, реализующие сложные контуры обратной связи, требуют значительных вычислительных ресурсов и квалификации персонала для настройки. Нейросетевые и интеллектуальные методы, будучи наиболее современными и перспективными, сопряжены с высокой сложностью реализации и низкой интерпретируемостью получаемых моделей.

В этих условиях метод моделирования и анализа рабочей зоны, основанный на кинематическом описании манипулятора и верификации расчетных координат по сигналам датчиков обратной связи, представляется наиболее сбалансированным решением. Данный подход базируется на классическом методе **Денавита-Хартенберга**, который получил широкое распространение при решении прямой задачи кинематики и используется в качестве основы для моделирования кинематики и динамики манипуляторов с различным числом степеней подвижности. В работах по описанию программных комплексов для моделирования роботов-манипуляторов демонстрируется возможность построения математической модели, визуализации результатов и формирования траектории для целевого положения и ориентации рабочего органа.

Ключевым преимуществом данного метода в контексте учебного лабораторного стенда является его методическая прозрачность. Студент получает возможность проследить всю цепочку преобразований: от геометрических параметров звеньев до координат захвата в декартовом пространстве. Как показано в исследованиях, решение прямой задачи кинематики, ориентированной на многозвенные, манипуляторы, может быть реализовано в виде последовательности матричных преобразований, что обеспечивает наглядность и возможность пошаговой верификации вычислений.

Дополнительным аргументом в пользу выбора данного подхода является возможность организации диагностики погрешностей позиционирования без использования внешних измерительных средств. Установка датчиков Холла на валах шаговых двигателей и выходных звеньях манипулятора позволяет получить информацию о фактических углах поворота каждого сочленения. Сравнение этих данных с расчетными значениями, полученными из кинематической модели, дает возможность выявлять пропуск шагов двигателей, проскальзывание в редукторах и люфты в кинематических парах. Как отмечено в исследованиях по точности позиционирования промышленных роботов, указанные погрешности чаще всего возникают за счет ошибок отработки приводами, соответствующих заданному положению захватного устройства перемещений.

Важным аспектом является и то, что метод моделирования и анализа рабочей зоны не требует дорогостоящего аппаратного обеспечения и может быть реализован на базе стандартных вычислительных средств. Создание универсальной модели в программных пакетах, таких как **Simulink** или **MATLAB**, позволяет проводить анализ параметров типовых роботов-манипуляторов и моделировать эксперименты с захватным механизмом. При этом решение прямых и обратных задач кинематики в среде **Mathcad** не требует написания, отладки и тестирования сложных программ, что позволяет быстрее и с меньшим

количеством ошибок решать задачи кинематического и динамического анализа манипулятора.

Отметим, что выбор метода моделирования и анализа рабочей зоны не исключает возможности последующей модернизации учебного стенда в направлении более сложных интеллектуальных систем управления. Напротив, данный подход создает фундаментальную основу для такого перехода. Массив данных о расхождении расчетных и фактических параметров движения, формируемый в процессе работы системы диагностики, представляет собой размеченный датасет, который в перспективе может служить обучающей выборкой для нейросетевых алгоритмов, компенсирующих кинематические погрешности и динамические ошибки позиционирования.

Особую значимость в рамках предлагаемого подхода приобретает разработка модуля кинематического расчета и диагностики, реализующего следующие функции: прием сигналов с датчиков Холла, установленных на валах шаговых двигателей и выходных звеньях; вычисление текущего положения захвата на основе решения прямой задачи кинематики с использованием известных геометрических параметров звеньев; сравнение расчетных координат с координатами, определенными по показаниям датчиков обратной связи; выявление и индикацию расхождений, вызванных пропуском шагов или проскальзыванием; визуализацию текущего положения манипулятора и границ его рабочей зоны.

Для аналитического задания рабочей зоны и визуализации ее границ могут быть использованы методы, основанные на теории множеств и компьютерном построении зоны действия манипулятора. Исследование областей пространства конфигураций, задающих совокупность достижимых точек рабочей зоны с учетом положения запретных зон, позволяет на начальном этапе реализации движения проводить анализ положения целевых точек синтезируемой траектории и определять их достижимость.

Таким образом, метод моделирования и анализа рабочей зоны, дополненный системой диагностики на основе **датчиков Холла**, представляет собой оптимальное решение для учебного лабораторного стенда, сочетающее методическую прозрачность, низкую стоимость реализации, возможность экспериментального исследования погрешностей позиционирования и потенциал для последующего перехода к интеллектуальным системам управления. Данный подход позволяет студентам освоить фундаментальные принципы кинематики манипуляторов, приобрести практические навыки работы с системами обратной связи и создать основу для дальнейшего изучения более сложных методов позиционирования, включая нейросетевые и интеллектуальные алгоритмы (рис. 2).

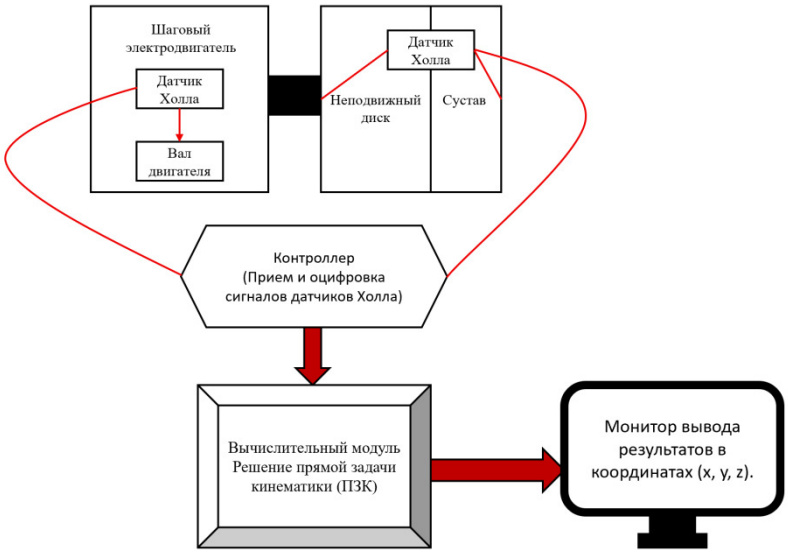


Рис. 2. Схема логики позиционирования с помощью датчиков Холла

Выводы

Проведенное исследование методов позиционирования захвата робота-манипулятора в пространстве применительно к задачам учебного лабораторного стенда позволяет сформулировать следующие выводы.

1) Планирование траектории на основе **G-кода** обеспечивает точное воспроизведение движений, однако не даёт обратной связи о фактическом положении и не позволяет диагностировать погрешности позиционирования.

2) Сложные системы управления с обратными связями ресурсоёмки и требуют высокой квалификации для настройки, что затрудняет их интеграцию в учебный процесс.

3) Нейросетевые методы перспективны для неструктурированных сред и компенсации динамических ошибок, но их внедрение сдерживается вычислительной сложностью, потребностью в больших обучающих выборках и низкой интерпретируемостью моделей.

4) Метод кинематического моделирования и анализа рабочей зоны на основе аппарата **Денавита-Хартенберга** с верификацией по **датчикам Холла** является оптимальным для учебного стенда, сочетая методическую прозрачность, низкие аппаратные требования и наглядность кинематических преобразований.

5) Разрабатываемый модуль кинематического расчёта и диагностики позволяет вычислять текущее положение захвата и выявлять расхождения, обусловленные люфтами и пропусками шагов, создавая экспериментальную базу для изучения точности позиционирования.

6) Предложенный подход формирует фундамент для последующей модернизации стенда в направлении интеллектуальных систем управления, поскольку накапливаемый массив данных о расчётных и фактических координатах может служить обучающей выборкой для нейросетевых алгоритмов компенсации погрешностей.

Следовательно, выбор метода моделирования и анализа рабочей зоны в качестве базового для учебного манипулятора обеспечивает оптимальный баланс методической доступности, практической реализуемости и потенциала развития в сторону интеллектуальных технологий управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Бутенко, В.И. Исследование вопросов точности позиционирования промышленного робота с рекуперацией энергии // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 132–138.

2) Бурлачук, А.М. Определение положения манипулятора с непрерывным изгибом секций с помощью системы технического зрения / А.М. Бурлачук // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 5 (143). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-polozheniya-manipulyatora-s-nepreryvnym-izgibom-sektsiy-s-pomoschyu-sistemy-tehnicheskogo-zreniya[reference:1] (дата обращения: 07.04.2026).

3) Амелько, Д.Е. Аппаратная часть системы управления манипулятором с использованием системы технического зрения / Д.Е. Амелько, Д.В. Гараев // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 2. – С. 337–338. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/apparatnaya-chast-sistemy-upravleniya-manipulyatorom-s-ispolzovaniem-sistemy-tehnicheskogo-zreniya[reference:2] (дата обращения: 07.04.2026).

4) Чайкин, М.О. Разработка программного комплекса для решения задачи планирования траектории при управлении движением манипуляционного механизма / М.О. Чайкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 6. – С. 137–148. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnogo-kompleksa-dlya-resheniya-zadachi-planirovaniya-traektorii-pri-upravlenii-dvizheniem-manipulyatsionnogo[reference:3] (дата обращения: 07.04.2026).

5) Щербаков, В.С. Планирование траектории рабочего органа строительного манипулятора в автоматическом режиме / В.С. Щербаков, И.А. Реброва // Вестник СибАДИ. – 2010. – № 2 (16). – С. 75–80. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-traektorii-rabochego-organa-stroitelnogo-manipulyatora-v-avtomaticheskom-rezhime[reference:4] (дата обращения: 07.04.2026).

6) Горитов, А.Н. Планирование траектории движения манипуляционного робота в неизвестной среде на основе алгоритма муравьиных колоний / А.Н. Горитов, К.В. Гончаров // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 55–64.

7) Горитов, А.Н. Построение плана траектории перемещения манипуляционного робота на основе модифицированного метода муравьиных колоний / А.Н. Горитов, К.В. Гончаров // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 41–48. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-plana-traektorii-peremescheniya-manipulyatsionnogo-robota-na-osnove-modifitsirovannogo-metoda-muravinyh-koloniy[reference:6] (дата обращения: 07.04.2026).

8) Колесников, С.В. Управление манипуляционным роботом в неизвестной среде с помощью алгоритма A* / С.В. Колесников // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. – Т. 1, № 8. – С. 418–419. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-manipulyatsionnym-robotom-v-neizvestnoy-srede-s-pomoschyu-algoritma-a[reference:7] (дата обращения 07.04.2026).

9) Юсупова, Н.И. Поиск траекторий движения многозвенного манипулятора в сложном трехмерном пространстве / Н.И. Юсупова, Г.Р. Шахмаметова, А.Р. Камильянов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – Т. 13, № 2 (35). – С. 157–165. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poisk-traektoriy-dvizheniya-mnogozvennogo-manipulyatora-v-slozhnom-trehmernom-prostranstve[reference:8] (дата обращения: 07.04.2026).

10) Щербинин, С.В. Планирование траекторий электромехатронных манипуляторов / С.В. Щербинин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1-1 (25). – С. 231–236. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/planirovanie-traektoriy-elektromehatronnyh-manipulyatorov[reference:9] (дата обращения 07.04.2026).

11) Смирнова, М.А. Система многоцелевого управления роботом-манипулятором / М.А. Смирнова, М.Н. Смирнов, Н.В. Смирнов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2022. – Т. 18, вып. 4. – С. 621–630.

12) Ганин, П.Е. Алгоритмы кинематического управления многозвенными манипуляционными роботами на основе нечёткой нейронной сети / П.Е. Ганин, А.И. Кобрин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2021. – № 6. – С. 87–97.

13) Стебулянин, М.М. Контурное управление манипуляционным роботом в режиме априорной неопределенности закона движения / М.М. Стебулянин, А.Г. Синицын // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 3 (696). – С. 71–80. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/konturnoe-upravlenie-manipulyatsionnym-robotom-v-rezhime-apriornoy-neopredelennosti-zakona-dvizheniya[reference:12] (дата обращения: 07.04.2026).

14) Нейросетевое управление манипулятором с гибкими звеньями на основе сигналов с тензодатчиков / В.П. Глазков, И.В. Егоров, С.А. Миссюра, С.В. Пчелинцева, Н.И. Фролов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 2 (671). – С. 54–61. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevoe-upravlenie-manipulyatorom-s-gibkimi-zvenyami-na-osnove-signalov-s-tenzodatchikov[reference:13] (дата обращения: 07.04.2026).

15) Ганин, П.Е. Алгоритмы кинематического управления многозвенными манипуляционными роботами на основе нечёткой нейронной сети / П.Е. Ганин, А.И. Кобрин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2021. – № 6. – С. 87–97.

16) Создание метода динамической коррекции движения манипулятора на основе нейронных сетей / А.А. Большаков, В.П. Глазков, И.В. Егоров, А.В. Лавров. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-metoda-dinamicheskoy-korrektsii-dvizheniya-manipulyatora-na-osnove-neyronnyh-setey (дата обращения: 07.04.2026).

17) Rostova, E.N. Neural network compensation of dynamic errors in a position control system of a robot manipulator / E.N. Rostova, N.V. Rostov. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neural-network-compensation-of-dynamic-errors-in-a-position-control-system-of-a-robot-manipulator (дата обращения: 07.04.2026).

18) Цао, И. Метод захвата движущегося объекта манипулятором на основе обучения с подкреплением / И. Цао // Вестник кибернетики. – 2025. – Т. 24, № 2. – С. 66–73. – URL: https://www.vestcyber.ru/jour/article/view/681/417 (дата обращения: 07.04.2026).

19) Залогин, Н.Е. Об обучении интеллектуальных агентов в виртуальной среде для задачи управления роботом-манипулятором / Н.Е. Залогин, Д.С. Григорьев. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ob-obuchenii-intellektualnyh-agentov-v-virtualnoy-srede-dlya-zadachi-upravleniya-robotom-manipulyatorom (дата обращения: 07.04.2026).

20) Нейросетевое управление манипулятором с гибкими звеньями на основе сигналов с тензодатчиков / В.П. Глазков, И.В. Егоров, С.А. Миссюра, С.В. Пчелинцева, Н.И. Фролов. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevoe-upravlenie-manipulyatorom-s-gibkimi-zvenyami-na-osnove-signalov-s-tenzodatchikov (дата обращения: 07.04.2026).

21) Рахим, Ф.А. Нейро-нечеткая структура системы управления перемещением робота-манипулятора / Ф.А. Рахим. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neyro-nechetkaya-struktura-sistemy-upravleniya-peremescheniem-robota-manipulyatora (дата обращения: 07.04.2026).

22) Сафин, М.А. Синтез адаптивной системы управления на основе глубокого обучения с подкреплением для робототехнических комплексов / М.А. Сафин. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-adaptivnoy-sistemy-upravleniya-na-osnove-glubokogo-obucheniya-s-podkrepleniem-dlya-robototehnicheskih-kompleksov (дата обращения: 07.04.2026).

23) Раин, Т. Описание программного комплекса для моделирования робота-манипулятора / Т. Раин // Вестник российских университетов. Математика. – 2023. – Т. 28, № 141. – С. 90–96. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opisanie-programmnogo-kompleksa-dlya-modelirovaniya-robota-manipulyatora (дата обращения: 07.04.2026).

24) Ащепкова, Н.С. Метод кинематического и динамического анализа манипулятора с использованием Mathcad / Н.С. Ащепкова. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-kinematicheskogo-i-dinamicheskogo-analiza-manipulyatora-s-ispolzovaniem-mathcad (дата обращения: 07.04.2026).

25) Построение моделей кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц / А.Г. Лесков, К.В. Бажинова, С.Д. Морошкин, Е.В. Феоктистова. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-modeley-kinematiki-ispolnitelnyh-mehanizmov-manipulyatsionnyh-robotov-s-ispolzovaniem-blochnyh-matrits (дата обращения: 07.04.2026).

26) Логвинов, В.И. Определение рабочей зоны двурукого манипулятора методом Монте-Карло / В.И. Логвинов, К.С. Денисов. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-rabochey-zony-dvurukogo-manipulyatora-metodom-monte-karlo (дата обращения: 07.04.2026).

27) Притыкин, Ф.Н. Построение рабочей зоны механизма руки андроидного робота с учетом положения запретных зон / Ф.Н. Притыкин, В.И. Небритов. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-rabochey-zony-mehanizma-ruki-androidnogo-robota-s-uchetom-polozheniya-zapretnyh-zon (дата обращения: 07.04.2026).

28) Харюнин, А.С. Применение метода FABRIK для моделирования захвата цели манипулятором / А.С. Харюнин, Е.А. Самылина, Н.А. Борисов. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metoda-fabrik-dlya-modelirovaniya-zahvata-tseli-manipulyatorom (дата обращения: 07.04.2026).

29) Геометрический анализ текущих ситуаций характеризующих положение манипулятора и окружающей среды на основе использования области разрешенных конфигураций / Ф.Н. Притыкин, В.Г. Хомченко, В.И. Глухов, Д.И. Нефедов. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/geometricheskiy-analiz-tekuschih-situatsiy-harakterizuyuschih-polozhenie-manipulyatora-i-okruzhayuschey-sredy-na-osnove (дата обращения: 07.04.2026).

30) Притыкин, Ф.Н. Исследование геометрических параметров задающих область разрешенных конфигураций при изменении положения запретных зон / Ф.Н. Притыкин, Д.И. Нефедов. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-geometricheskih-parametrov-zadayuschih-oblast-razreshennyh-konfiguratsiy-pri-izmenenii-polozheniya-zapretnyh-zon (дата обращения: 07.04.2026).

УДК 621.833

РОБАСТНАЯ ОЦЕНКА ЗЕМСНАРЯДОПРОИЗВОДСТВА: ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПОД КОНТРОЛЕМ

М.-Х.Х. Наурбиев

Научный руководитель – **С.А. Царева,** канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье показано значение робастных оценок в машиностроении и отраслях промышленного производства на примере земснарядов. Автор показывает, как достигается минимизация дефектов на стадиях всего процесса, начиная от проектирования, заканчивая эксплуатацией продукции.

***Ключевые слова**: земснаряд, робастные оценки, проблемные аспекты, пути решения*

ROBUST ASSESSMENT OF DREDGER-PRODUCTION: THE LIFE CYCLE UNDER CONTROL

M.-Kh.Kh. Naurbiev

Scientific Supervisor – **S.A. Tsareva**, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article shows the importance of robust estimates in mechanical engineering and industrial production, using the example of dredges. The author demonstrates how to minimize defects at all stages of the process, from design to product operation.

***Keywords:** dredge, robust estimates, problematic aspects, solutions.*

Если оценить «отечественный», а также рынок позиции «международной арены», то знаменатель в призме выпускаемой продукции сводится к повышению качества. Что это значит? Производство земснарядов в наши дни, особенно на этапе опытных образцов и запуска в серию, требует высокой степени робастности — способности технологических и управленческих процессов сохранять стабильность и качество результатов при наличии неизбежных возмущений и изменчивости исходных данных. Робастный подход минимизирует риски дефектов, снижает затраты на доводку и обеспечивает выход на рынок конкурентоспособной продукции. Проведена тщательная оценка планирования качества земснарядов, проанализированы как зарубежные, так и отечественные труды ученых и практиков в данном исследовательском поле за последние 5-7 лет. С помощью указанного статистического метода более точно определены возможные позиции «с пороком» выпускаемой продукции и предложены решения по ее устойчивости к внешним факторам. Это, в свою очередь, способствует принятию оперативных решений по обслуживанию и замене «неисправных» позиций, что имеет непосредственное практическое значение в сфере земснарядного производства.

Автором поставлена цель показать надежные оценки планирования качества земснаряда как эвентуальные и оптативные детерминанты пиков идеала в рамках жизненного цикла земснаряда.

Реальность нашей действительности такова: процветающими, востребованными и достигающими значительных результатов будут те предприятия, которые создадут условия для развития передовых и новаторских методов управления качеством. В этих условиях надежное параметрическое проектирование при производстве продукции не является исключением. Продумано и компетентно выстроенная производственная система предприятия позволит организации добиться признаваемых успехов в меняющихся

рыночных условиях, занять передовые позиции среди конкурентов и завоевать доверие потребителей.

Исследование построим следующим образом: во-первых, проанализируем доктрину в ключе объекта исследования применительно к разным видам продукции, во-вторых, переложим изучение на земснарядопроизводство.

План исследования факторов, влияющих на качество процесса оценки, который вносит существенный вклад в эффективность процесса аудита систем менеджмента качества (СМК) – предмет изучения в труде [1]. Рассмотрена возможность оптимизации указанных коэффициентов на основе метода робастного параметрического проектирования (РПР). В исследовании обсуждаются возможности и ограничения ортогонального планирования экспериментов с РПД. На основе принятого термина «качество оценки» составляется перечень факторов, влияющих на эффективность процесса оценки объекта на предмет его соответствия требованиям (ССВ). Определен состав и структура этих факторов.

Ученые-практики [2] рассмотрели методики оценки робастного качества, что позволило создать новую единицу класса текстильных систем, а именно функциональную модель волоконно-оптической системы Smart Textiles. В работе акцентировано внимание на различных режимах динамического состояния производственной системы, которые соответствуют определенным классификациям робастности. Показана важность робастного подхода для приближения сложной производственной системы к целевым показателям. Особое внимание авторы уделяют алгоритму повышения эффективности внедрения новых материалов и технологий.

Робастная параметрическая конструкция методики химического анализа количественного типа для выборки эвентуальных показателей значимых величин, оказывающих воздействие на процесс установления химического состава медных сплавов с помощью мобильного рентгенофлуоресцентного спектрометра X-50 – объект исследования в работе [3]. Авторами приведен пример составления экспериментального плана параметрического проектирования указанной методики и проведен статистический анализ результатов измерений. Выборка и составление необходимых и желаемых показателей стали причиной повышения точности результатов определения химического состава медных сплавов и достоверности результатов контроля качества продукции при относительно низких затратах на контроль. Показана «робастность» в деле.

Требующие внимания исследования, посвященные методологии робастного проектирования, рассматриваются в статьях [4-6].

Робастные оценки планирования качества продукции являются перспективным инструментом решения проблемных компонентов оборудования и технологий – вывод, который абсолютен исходя из анализа научных и практических трудов в ключе этого вопроса.

Далее о земснарядопроизводстве.

Объектом исследования является оборудование, выпускаемое одним из ведущих и передовых предприятий региона по производству земснарядов, а также запасные части к ним – ООО «СГМ» [7]. Кроме изготовления земснарядов данная компания производит комплектующие к ним, а также реализует соответствующее оборудование – со склада и под заказ; выполняет модернизацию и ремонт земснарядов, обеспечивает гарантийное и сервисное обслуживание.

Данный производственный и эксплуатационный процесс «страдает» следующими «порочными» аспектами. Последние рассматривались на этапах: 1. Разработка проекта продукта; 2. Создание продукта; 3. Формирование клиентской базы; 4. Контакт с клиентами; 5. Работа земснарядов.

Исследователями в ключе этого практико-ориентированного труда науки внимание было детально акцентировано на последнем этапе.

С введением в наши дни определенных санкций импортозамещение вышло на новый уровень, в том числе и в производственно-промышленном секторе. Для того чтобы замена

компонентов изделий в частности и самих объектов «на выходе» осуществлялась в рамках импортозамещения, в ходе данного исследования были выявлены следующие «ущербные» и неидеальные этапы работы, части изделий, этапы принятия решений, а также узлы земснаряда:

- работа земснаряда при низких температурах и все вытекающие из этого последствия (например, замерзание воды при определенных погодных условиях, в которых находится судно; взаимодействие металла, из которого изготовлено изделие, с низкотемпературной водой и т.д.);
- эксплуатация земснаряда вблизи берега;
- износ плавучего основания;

Детальнее на отмеченных выше этапах работы:

Первое: внешний фактор – низкие температуры – учитывает промерзание водной поверхности. Как известно, дно крайне редко промерзает, тем не менее дноуглубительные работы и функционирование земснаряда подразумевают его движение. Сказанное детерминирует необходимость преодоление подобного фактора. Решение проблемы видится в использовании минообразователя. Такое устройство позволяет воде не замерзать в непосредственном месте работы земснаряда. Более того, размер отверстия можно регулировать, изменяя угол наклона направляющей трубы канала. Это позволяет земснаряду оставаться устойчивым к такому внешнему фактору, как погодные условия.

Второе: функционирование, а именно осуществление работ земснарядом вблизи берегов. Обвал грунта не исключён при работе на земснаряде вблизи берегов водоема. Такие ситуации потенциальны при совокупности двух факторов: 1) большой угол наклона, а также 2) влагонасыщение основания берега. Если в таких условиях баггермейстер не успеет дать задний ход на лебедках, устройство забора грунта будет сломано.

Пути преодоление подобного «слабого места» в этапе жизненного цикла земснарядопроизводства как его работа и функционирование:

1) осуществление работ по технологическим картам;

2) внедрение и применение ограждений и сигнализаторов для предотвращения попадания работников в зону риска;

3) применение средств связи для координации действий оператора и непосредственных исполнителей.

Третье: амортизация плавбазы. Последствия износа плавбазы проявляется в следующем: 1) снижение прочности корпуса и его компонентов в силу того, что листовые элементы становятся тоньше; 2) преображение первоначальной формы конструкции; 3) изменение целостности отделяемых компонентов – появление трещин/отверстий и др.

Способы преодоления – снижение износа возможно за счет использования более пластичного типа судовой стали, что поможет снизить показатели расслоение металла на дне и боковых поверхностях. Для количественной оценки отмеченного подхода в рамках анализа было проведено планирование эксперимента в Statgraphics Centurion версии 19 [8].

С точки зрения результатов факторного эксперимента предлагается реализовать автоматическую регулировку рабочего колеса в процессе работы земснаряда. Один из вариантов предполагает внедрение искусственного интеллекта (ИИ), задачей которого станет непосредственный анализ работы грунтового насоса. В частности, в соответствующих ситуациях ИИ сможет регулировать как показатели (вверх или вниз) всасывания грунтового насоса, так и показатели давления грунтового насоса.

Научная новизна исследования, таким образом, выразилась в предложенных путях преодоления указанных несовершенных этапов работы, частей изделий, этапов принятия решений, а также составных частей земснаряда, начиная с аспектов работы земснаряда при таких погодных условиях, как низкие температуры воды, заканчивая факторами засорения насоса. Практическая значимость – в проведенном эксперименте и последующем анализе – что позволило оценить возможности повышения качества работы земснарядов ООО «СГМ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Ященко, В.В. () Исследование возможности совершенствования процесса аудита на основе его оптимизации по методу Тагучи // Вестник Самарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 96-108. – DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-96-108.

2) Титова, М.Н. Концепция робастности в управлении устойчивостью текстильных систем. // Устойчивое ESG-развитие интеллектуальных экосистем / под ред. А.В. Бабкиной. – Санкт-Петербург: ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 144-175. – DOI: 10.18720/IEP/2023.3/5.

3) Митрофанов, С.А. Робастное параметрическое проектирование метода определения химического состава медных сплавов методом рентгенофлуоресценции / С.А. Митрофанов, И.В. Муравьева // Измерительные технологии. – 2023. – № 11. – С. 66-71. – DOI: 10.32446/0368-1025IT.2023-11-66-71.

4) Оморов, Р.О. Робастная устойчивость и эллипсоидальные оценки качества многомерных динамических систем // Инженер: научно-периодическое издание Инженерной академии Кыргызской Республики. – 2023. – № 26. – С. 60-73

5) Шуленин, В. Сравнение робастных оценок модифицированных версий стандартного отклонения и среднего абсолютного отклонения // Известия вузов. Физикаю – 2022. – Т. 65, № 2. –С. 171-180. – DOI: 10.17223/00213411/65/2/171.

6) Робастный алгоритм оценки параметров прецессии по набору оптических изображений / В.В. Лавров, Р.С. Лучкин, О.И. Немыкин, М.Е. Прохоров // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – Т. 79, № 1. – С. 134-144. – DOI: 10.18411/trnio-11-2021-40.

7) Производство земснаряда // Спецгидромех: [сайт]. – 2005. – URL: https://gidro11.ru/ (дата обращения: 09.04.2026)

8) Statgraphics Technologies, Inc. США, Равнины, Вирджиния 20198 // Statgraphics 19 Centurion: [site]. – 2023. – URL: https://www.statgraphics.com (дата обращения: 09.04.2026).

УДК 621.926

ЧИСЛЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ МЕТАЛЛОЁМКОСТИ КОРПУСА БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ БСК-100

В.Р. Петухов, А.В. Проворов

Научный руководитель – **А.В. Проворов**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается численное исследование напряжённо-деформированного состояния корпуса барабанной сушилки технического углерода БСК-100 методом конечных элементов. На основе расчётной модели показано наличие избыточного запаса прочности обечайки. Обоснована возможность снижения толщины стенки корпуса без нарушения условий прочности и жёсткости, что приводит к уменьшению металлоёмкости и массы аппарата.

Ключевые слова: *барабанная сушилка, технический углерод, метод конечных элементов, прочность, металлоёмкость, оптимизация конструкции*

NUMERICAL JUSTIFICATION OF REDUCING THE METAL CONTENT OF THE DRUM DRYER BSK-100 BODY

V.R. Petukhov, A.V. Provorov

Scientific Supervisor – **A.V. Provorov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses a numerical study of the stress-strain state of the drum dryer body of technical carbon BSK-100 using the finite element method. Based on the calculated model, the presence of an excessive safety margin for the shell is shown. The possibility of reducing the wall thickness of the body without violating the conditions of strength and rigidity is substantiated, which leads to a decrease in the metal consumption and weight of the apparatus.

Keywords: *drum dryer, technical carbon, finite element method, strength, metal consumption, design optimization.*

В условиях эксплуатации технологического оборудования для производства технического углерода ключевыми задачами проектирования являются обеспечение надёжности и снижения затрат на материалы. Барабанные сушилки типа БСК-100 характеризуются большими габаритами и значительной массой вращающихся элементов. Традиционные аналитические методы расчёта корпуса часто базируются на упрощённых допущениях, приводящих к завышению толщины обечаек и к необоснованному росту металлоёмкости. Применение современных CAE-комплексов позволяет детально оценить реальное распределение напряжений с учётом контактного взаимодействия, температурных полей и неравномерной загрузки сыпучим материалом. Целью данной статьи является численное обоснование возможности снижения металлоёмкости корпуса сушилки БСК-100 за счёт оптимизации толщины стенки на основе результатов расчётов на прочность и жёсткость.

Объектом исследования выступил корпус сушилки БСК-100, выполненный из листовой стали 10Х17Н13М2Т. Геометрические параметры барабана, включая длину зоны нагрева, внутренний диаметр, исходную толщину стенки обечайки s = 20 мм, расположение бандажей и подкладных листов, были взяты из конструкторской документации проекта. Расчётная модель создавалась в среде КОМПАС-3D с использованием параметрического моделирования, что позволило оперативно варьировать толщину стенок при оптимизации. Численный анализ проводился в интегрированном модуле APM FEM. Корпус моделировался оболочечными конечными элементами, а массивные элементы– твёрдотельными. В зоне

контакта задавались нелинейные контактные пары с учётом коэффициентов трения. Граничные условия включали закрепление опорных площадок роликов и приложение нагрузок от собственной массы конструкции, массы технологического материала (технического углерода, ρ = 300 кг/м³, степень заполнения f = 0,25), веса венцовой шестерни и температурных воздействий в зоне нагрева (t = 330°C под бандажом).

Физико-механические свойства материалов задавались в соответствии с паспортными данными: модуль упругости стали корпуса при рабочей температуре $E = 1{,}36 \cdot 10^3$ МПа. Сетка конечных элементов сгущалась в зонах концентрации напряжений. Для проверки адекватности модели проводилась верификация путём сравнения результатов МКЭ с аналитическим расчётом по классическим формулам сопротивления материалов. Критерием прочности служили эквивалентные напряжения по теории Мизеса, которые сравнивались с допускаемыми значениями $[\sigma_u]$ = 130 МПа.

В ходе численного моделирования нагруженного корпуса сушилки было получено распределение эквивалентных напряжений. Анализ эпюр показал, что максимальные напряжения сосредоточены в зонах контакта обечайки с подкладными листами бандажей и в сечениях, подверженных наибольшему изгибающему моменту от веса материала.

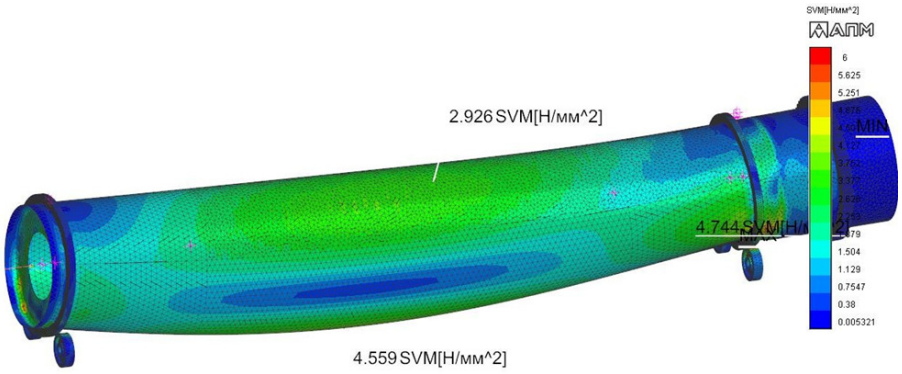


Рис. 1. Картина распределения напряжений по Мизесу в корпусе сушилки БСК-100

Как видно из полученной картины, пиковые значения эквивалентных напряжений в опасном сечении корпуса не превышают 4,6 МПа. При этом допускаемое напряжение для материала корпуса при рабочей температуре составляет $[\sigma_и]$ = 130 МПа. Фактический запас прочности конструкции достигает около 28, что существенно превышает нормативные требования и подтверждает избыточность текущей конструкции. Дополнительно был проведён анализ деформаций корпуса. Максимальный прогиб обечайки в середине пролёта составил $y_{max} = 0{,}19 \cdot 10^{-2}$ м, относительный прогиб $\varepsilon = 0{,}087 \cdot 10^{-2}$, что укладывается в допустимые пределы жёсткости [ε] = 1/200 и не влияет на соосность бандажей и опорных роликов.

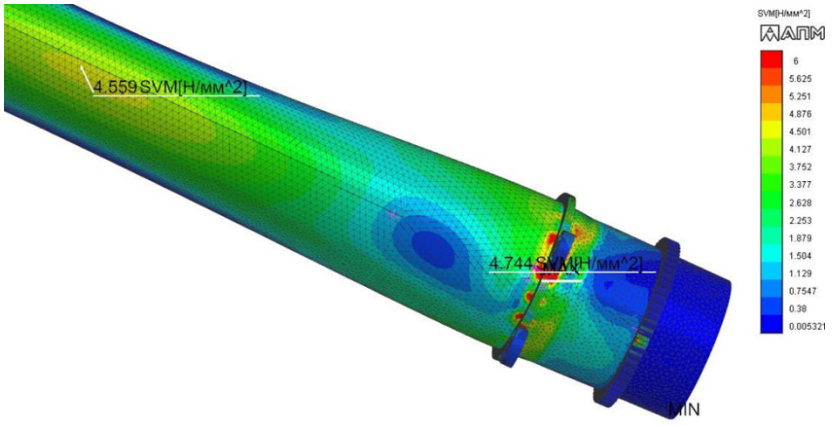


Рис. 2. Напряжения по Мизесу в нижней части обечайки

На основании полученных данных была сформулирована гипотеза о возможности уменьшения толщины стенки корпуса. В параметрической модели толщина обечайки была последовательно уменьшена с исходных 20 до 14 мм. Повторный расчёт показал линейный рост напряжений, однако максимальные значения остались в пределах 6,5 МПа, обеспечивая запас прочности не менее 20. Снижение массы корпуса при оптимизированной толщине составляет приблизительно 30%, что прямо влияет на уменьшение нагрузки на опорно-роликовые устройства, снижение потребляемой мощности привода и сокращение себестоимости изготовления аппарата. При этом жёсткость конструкции сохраняется за счёт работы кольцевых поясов и внутренней насадочной системы, которые берут на себя часть изгибающих нагрузок.

Таким образом, численное моделирование в АРМ FEM подтвердило высокую адекватность расчётной модели корпуса сушилки БСК-100 и выявило значительный избыточный запас прочности, при котором максимальные эквивалентные напряжения в обечайке не превышают 4,6 МПа при допускаемых 130 МПа. Обоснована возможность снижения толщины стенки корпуса с 20 до 14 мм, при которой запас прочности остаётся в допустимых пределах (не менее 20), а условия жёсткости не нарушаются. Оптимизация геометрических параметров корпуса позволит снизить металлоёмкость сушилки на 30%, уменьшить массу вращающихся частей и энергозатраты на привод, повысив технико-экономическую эффективность оборудования без снижения эксплуатационной надёжности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Веткин, Ю.А.Конструирование и расчет технологического оборудования / Ю.А. Веткин, Д.С. Долгин. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2019. – 136 с.

2) ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 80 с.

УДК 644.143

РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ ДЕТАЛИ ВЕРХНЯЯ ПЛИТА ВАФЕЛЬНИЦЫ

А.Р. Разживина

Научный руководитель – **А.С. Ключников,** канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье представлена методика реверс-инжиниринга детали верхней плиты вафельницы, выполненная на основе анализа исходного чертежа без использования натурных образцов. Обоснован переход на отечественный материал ВЧ 40 ГОСТ 7293-85 и технология мелкосерийного производства. Особое внимание уделено инженерным и нормативным аспектам импортозамещения, включая адаптацию конструкции под российские стандарты.

Ключевые слова: *реверс-инжиниринг, верхняя плита вафельницы, ВЧ 40, импортозамещение, мелкосерийное производство, конструкторская документация, САПР*

REVERSE-ENGINEERING PARTS TOP PLATE OF THE WAFFLE MACHINE

A.R. Razhivina

Scientific Supervisor – **A.S. Kliuchnikov,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article presents a reverse engineering method for the upper plate of a waffle iron, based on the analysis of the original drawing without the use of physical samples. The transition to domestic material VCh 40 GOST 7293-85 and the technology of small-scale production are substantiated. Special attention is paid to the engineering and regulatory aspects of import substitution, including the adaptation of the design to Russian standards.

Keywords:*reverse engineering, upper plate of a waffle iron, HF 40, import substitution, small-scale production, design documentation, CAD*

В условиях санкционных ограничений и разрыва логистических цепочек актуальной становится задача обеспечения производства пищевого оборудования отечественными комплектующими [2, 4]. Многие формообразующие узлы импортных вафельниц не имеют открытой конструкторской документации, что затрудняет организацию их выпуска в России. Целью работы является разработка методики реверс-инжиниринга верхней плиты вафельницы на основе исходного чертежа для последующего изготовления с использованием отечественных материалов и технологий механической обработки.

Основой работы стал анализ исходного чертежа: выявлены базовые поверхности, критические допуски, требования к шероховатости рабочих поверхностей и посадочным местам под нагревательные элементы (рис. 1).

На основе чертежа в САПР (КОМПАС-3D) построена параметрическая 3D-модель детали [1]. Размеры, не указанные явно на чертеже, восстановлены расчётным путём с учётом функционального назначения узла и стандартных рядов размеров по ГОСТ. Модель адаптирована под требования ЕСКД.

Для изготовления плиты выбран высокопрочный чугун с шаровидным графитом ВЧ 40 ГОСТ 7293-85 [3]. Этот материал обладает достаточной прочностью, пластичностью и хорошей теплопроводностью, что важно для равномерного прогрева. ВЧ 40 широко доступен на российском рынке в виде сортового проката и заготовок, устойчив к циклическим тепловым нагрузкам и хорошо обрабатывается резанием (табл. 1).

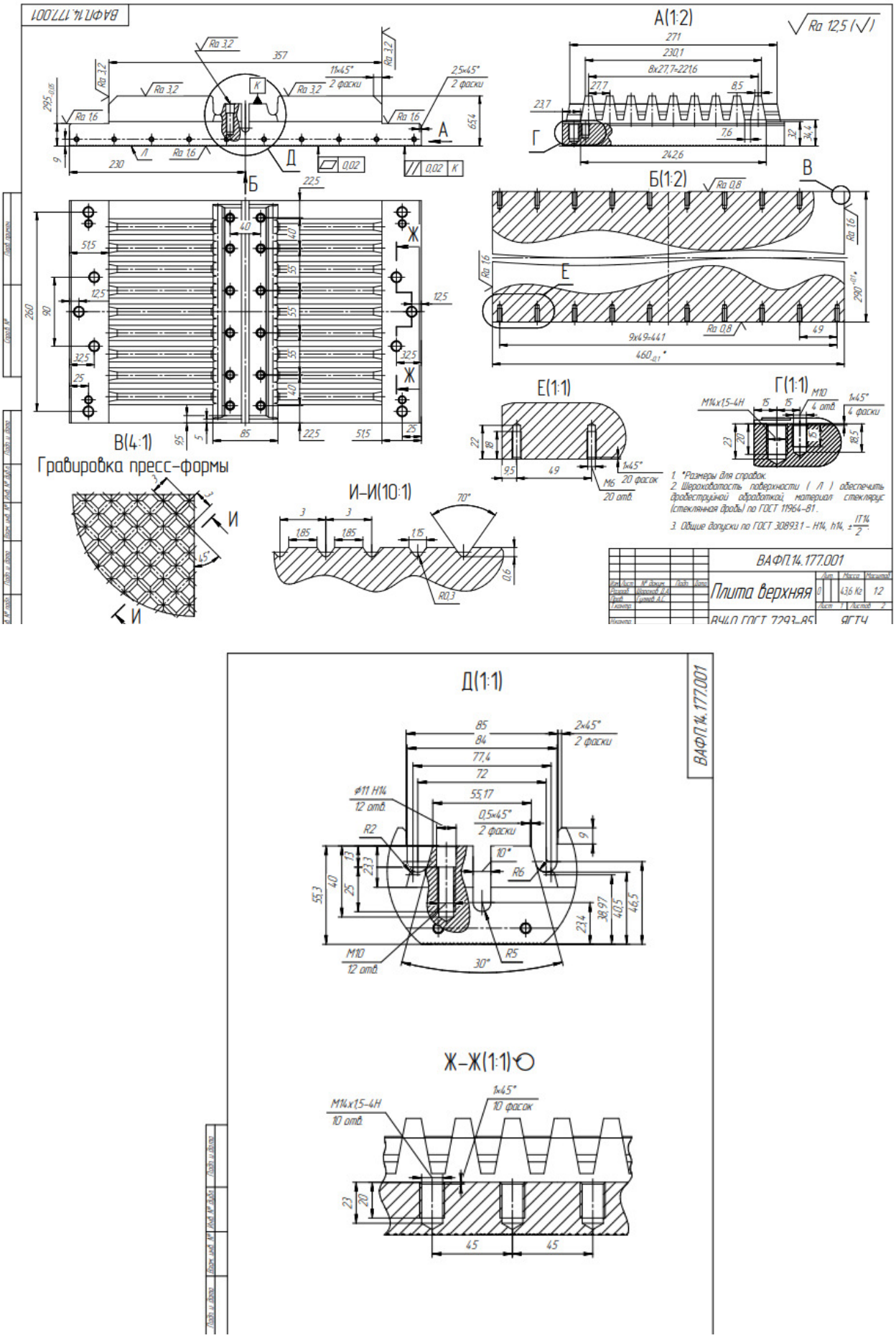


Рис. 1. Исходный конструкторский чертеж верхней плиты вафельницы

Таблица 1. Механические свойства чугуна ВЧ 40 по ГОСТ 7293-85

Показатель	Значение	Примечание
Предел прочности при растяжении σв, МПа	≥400	Обеспечивает механическую надёжность детали
Предел текучести σ 0,2, МПа	≥250	Устойчивость к пластическим деформациям
Относительное удлинение δ, %	≥15	Пластичность, важная для термоциклирования
Твёрдость по Бринеллю, НВ	140–200	Баланс между обрабатываемостью и износостойкостью
Структура	Ферритно-перлитная основа + шаровидный графит	Определяет теплопроводность и демпфирующие свойства

Заготовка верхней плиты изготавливается методом отливки. Технологический процесс изготовления основан на механической обработке заготовки на многоосевом обрабатывающем центре с ЧПУ. Рабочие поверхности фрезеруются до шероховатости $Ra \leq 1{,}6$ мкм, что обеспечивает качественное нанесение пищевого антипригарного покрытия. Присоединительные размеры и крепёжные отверстия выполняются с контролем соосности для обеспечения совместимости с отечественными нагревательными элементами и терморегуляторами [5].

Процесс импортозамещения включает несколько ключевых аспектов [2]. Перевод всех допусков, посадок и обозначений в систему ГОСТ/ЕСКД для совместимости с российским производством и измерительным инструментом. Адаптация присоединительных размеров под отечественные ТЭНы (трубчатые электронагреватели), терморегуляторы и крепёж с унификацией под стандартные ряды диаметров и шагов резьбы [5]. Использование полностью отечественного программного обеспечения и станочного оборудования, что исключает зависимость от зарубежных поставщиков и обеспечивает технологическую независимость.

В ходе работы разработана методика реверс-инжиниринга, позволяющая воспроизвести деталь по чертежу без наличия физического образца [1]. Методика может быть применена для изготовления других узлов пищевого оборудования [4]. Практическая значимость — готовое инженерное решение для выпуска детали, снижение зависимости от импортных поставок, обеспечение технологической независимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Баранова, И.В. Информационные инструменты реверс-инжиниринга в стратегии деятельности инновационно-ориентированных структур / И.В. Баранова, М.М. Батова, С.В. Майоров // Теоретическая экономика. – 2020. – № 11. – С. 28–45. – URL: https://cyberleninka.ru/article /n/informatsionnye-instrumenty-reversinzhiniringa-v-strategii-deyatelnosti-innovatsionno-orientirovannyh-struktur (дата обращения: 01.04.2026).

2) Гавловская, Г.В. Импортозамещение в пищевой промышленности России в условиях санкций / Г.В. Гавловская, М.Р. Самсоненко // Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров: материалы международной научно-практической конференции. – Брест: БрГТУ, 2022. – Т. 1, ч. 2. – С. 112–116. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ importozameschenie-v-pischevoy-promyshlennosti-rossii-v-usloviyah-sanktsiy (дата обращения: 01.04.2026).

3) ГОСТ 7293-85. Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 8 с.

4) Коноваленко, Л.Ю. Анализ российского рынка оборудования для пищевой и перерабатывающей промышленности / Л.Ю. Коноваленко // Никоновские чтения: материалы Международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Чувашский государственный педагогический университет, 2018. – № 23. – С. 121–126.

5) Смирнов, П.А. Теплотехническое моделирование формообразующих элементов пищевого оборудования / П.А. Смирнов // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 3. – С. 610–618. — URL: https://scholar.google.com/?hl=ru&q=Теплотехническое+моделирование+формообразующих +элементов+пищевого+оборудования (дата обращения: 01.04.2026).

УДК 621.9.014

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЯГОВОЙ ЦЕПИ КОНВЕЙЕРА НА ОСНОВЕ CAD/CAE-ТЕХНОЛОГИЙ

К.С. Салюкова, А.М. Шапошников

Научный руководитель – **А.М. Шапошников**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается задача повышения надёжности тяговой цепи конвейера для транспортировки фанеры на АО «Завод Пролетарская свобода». Обоснован переход от литых звеньев к деталям из стального проката с лазерной резкой, сопровождаемый цифровым проектированием в среде SolidWorks и верификацией прочности в ANSYS. Показано, что предложенная технология обеспечивает более однородную структуру материала, снижает риски усталостного разрушения и повышает стабильность производства. Результаты расчётов подтверждают сохранение несущей способности и рост жёсткости конструкции на 15%, что делает модернизацию технически обоснованной и экономически целесообразной.

Ключевые слова: *тяговая цепь, модернизация, механическая обработка, прочностной анализ, экономическая эффективность*

OPTIMIZATION OF A SPECIAL CONVEYOR DRAG CHAIN DESIGN BASED ON CAD/CAE TECHNOLOGIES

K.S. Salyukova, A.M. Shaposhnikov

Scientific Supervisor – **A.M. Shaposhnikov,** Candidate of Technical Science, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This paper addresses the problem of improving the reliability of a conveyor drag chain used for plywood transportation at JSC «Zavod Proletarskaya Svoboda». A transition from cast chain links to components fabricated from steel rolled stock using laser cutting is justified. The redesign process is supported by digital prototyping in SolidWorks and structural strength verification in ANSYS. It is demonstrated that the proposed manufacturing technology provides a more homogeneous material structure, reduces the risk of fatigue failure, and enhances production consistency. Simulation results confirm that the load-bearing capacity is preserved while the structural stiffness is increased by 15%, indicating that the proposed modernization is both technically sound and economically viable.

Keywords: *traction chain, modernization, machining, strength analysis, economic efficiency*

Современные требования к эффективности проектирования и производства обуславливают необходимость минимизации временных и материальных затрат. Достижение этой цели невозможно без применения передовых компьютерных технологий, обеспечивающих высокую точность расчётов и автоматизацию инженерных расчётов. Современные программные системы, основанные на численных методах и физическом моделировании, позволяют достоверно прогнозировать поведение сложных технических объектов, оптимизировать их конструктивные параметры и существенно сокращать сроки разработки за счёт интеграции расчётных и визуализационных модулей [1].

Особую роль в этой области играют автоматизированные системы, трансформирующие содержание и способы выполнения ключевых этапов технологических процессов. Они заметно влияют на подходы к проектированию, организации и совершенствованию производственных циклов. Наиболее ярко эти изменения проявляются в рамках систем автоматизированного проектирования (САПР), где компьютерное геометрическое моделирование выступает ключевым инструментом цифрового прототипирования и инженерного анализа [1, 2].

Понятие «САПР» (система автоматизированного проектирования) в современном понимании охватывает комплексную автоматизированную систему, интегрирующую функциональные модули CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing), CAE (Computer-Aided Engineering), CAPP (Computer-Aided Process Planning) и PDM (Product Data Management) [1]. Такая интеграция обеспечивает непрерывность информационного потока на всех стадиях жизненного цикла изделия — от первоначального замысла до серийного производства и последующего сопровождения.

Центральное место в архитектуре САПР занимают CAD-системы, ориентированные на выполнение конструкторских задач и автоматизацию процессов оформления проектной и конструкторской документации. Современные универсальные CAD-платформы [2] поддерживают как двумерное (2D), так и трёхмерное (3D) параметрическое моделирование отдельных деталей и сложных сборочных узлов. На основе созданной геометрической модели автоматически генерируется полный комплект технической документации, включая чертежи, спецификации, ведомости покупных изделий и технические условия.

Особую значимость в развитии цифрового проектирования имеет переход к использованию объёмных геометрических моделей, которые становятся основой для реализации сквозных цифровых технологий в производстве [2]. Применение 3D-моделей позволяет существенно повысить эффективность автоматизации проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства, обеспечивая единую цифровую основу для взаимодействия между различными подразделениями.

Ключевая цель создания компьютерных геометрических моделей — формирование виртуального прототипа изделия, способного отражать его реальные физические и геометрические характеристики. Такой подход даёт возможность имитировать все этапы жизненного цикла продукта, включая компоновку, сборку, эксплуатацию и ремонт. В рамках CAD-среды становится возможным проводить проверку габаритных, установочных и присоединительных размеров, выявлять конструктивные коллизии, оптимизировать форму деталей и разрабатывать рациональные схемы сборки, что существенно снижает вероятность ошибок на стадии производства. На сегодняшний день на рынке программного обеспечения представлен широкий спектр специализированных CAD-решений для геометрического моделирования. Среди наиболее распространённых – КОМПАС-3D, SolidWorks, AutoCAD, T-FLEX CAD, Solid Edge и NX, которые активно применяются в различных отраслях промышленности благодаря высокой степени функциональности, поддержке стандартов обмена данными и возможностям интеграции в единое цифровое пространство предприятия.

На АО «Завод Пролетарская свобода» эксплуатация тяговой цепи конвейера, предназначенной для транспортировки фанеры, подвержена риску отказов и простоев, вызванных дефектами литых звеньев. Основными дефектами литейного производства являются газовая и усадочная пористость, неметаллические включения и микротрещины, которые в условиях циклических нагрузок могут инициировать усталостное разрушение и приводить к остановке линии. В связи с этим целесообразно перейти к альтернативной технологии изготовления звеньев: использование заготовок из стального проката с последующей лазерной резкой. По сравнению с литьём заготовки из проката обеспечивают более однородную микроструктуру металла и меньшую вероятность формирования дефектов усадки и газов, что потенциально снижает риск усталостного разрушения. Лазерная резка позволяет достигать высокой точности геометрии и воспроизводимости контуров деталей сложной формы, что способствует снижению технологической вариативности в серийном производстве и повышению повторяемости качества.

На основе широко распространённой и функциональной CAD-платформы SolidWorks была разработана новая конструкция тяговой цепи конвейера. Необходимость разработки обусловлена недостатками существующей конструкции, в которой звенья изготавливаются методом стального литья. Несмотря на технологические преимущества литья (рис. 1), такие как возможность получения сложных геометрических

форм и низкой себестоимости единицы продукции, данный способ изготовления сопряжён с риском формирования структурных дефектов в металле:

- газовой и усадочной пористости;
- неметаллических включений;
- микротрещин;
- локальной неоднородности.

При эксплуатации в условиях циклических нагрузок указанные дефекты выступают в роли концентраторов напряжений, способствуя зарождению и развитию усталостных трещин, что снижает ресурс и надёжность звеньев цепи. Дополнительной проблемой является нестабильность качества поставляемых отливок, обусловленная зависимостью литейного процесса от множества технологических факторов (температура заливки, газопроницаемость формы, химический состав сплава и др.). Это требует внедрения строгого входного контроля, включая ультразвуковую дефектоскопию и визуально-измерительный контроль, что увеличивает трудоёмкость и сроки подготовки производства.

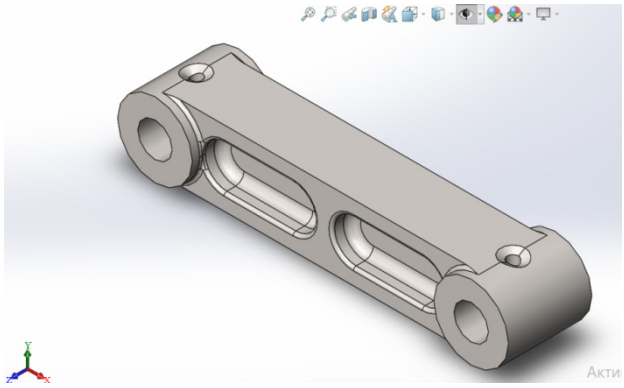


Рис. 1. Существующая конструкция звена тяговой цепи, изготовленного литьём

Разработка новых конструкций звеньев тяговой цепи конвейера в SolidWorks направлена на переход к альтернативной технологии изготовления – использованию заготовок, получаемых из стального проката с последующей лазерной резкой (рис. 2). В отличие от литых звеньев, применение проката обеспечивает более однородную и плотную структуру металла, свободную от усадочных и газовых дефектов, характерных для литья. Лазерная резка обеспечивает высокую точность и воспроизводимость контура при изготовлении деталей сложной формы, что способствует стабильности геометрических параметров и снижению технологической вариативности в условиях серийного производства.

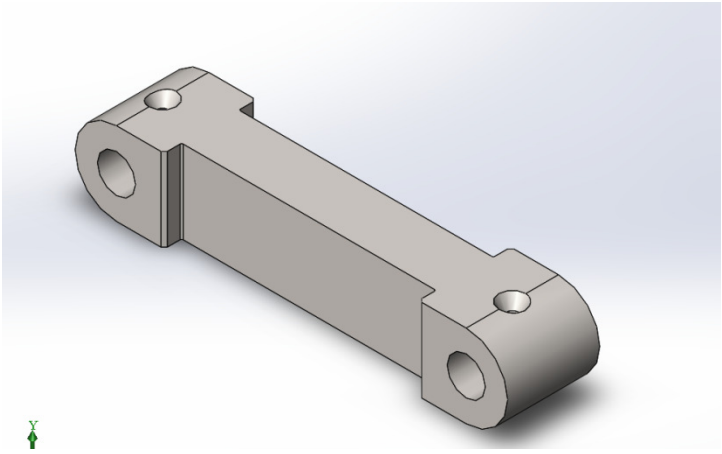


Рис. 2. Новая конструкция звена тяговой цепи, разработанная в SolidWorks

Для обоснования целесообразности предлагаемой модернизации была реализована интегрированная верификация в рамках CAD/CAE-цикла: геометрическое моделирование выполнено в SolidWorks, а анализ прочности и усталостной долговечности — в среде ANSYS с учётом эксплуатационных нагрузок и рабочих условий.

Расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) в ANSYS позволил:

- выявить зоны концентрации напряжений;
- внести корректировки в конструкцию, оптимизировав геометрию для снижения пиковых напряжений.

В результате расчётов установлено, что разница в несущей способности между исходной и модифицированной конструкцией составляет менее 0,5%, что свидетельствует о сохранении прочностных характеристик. Минимальный коэффициент запаса прочности достигает значений 2,18–2,19 для обоих вариантов. При этом наблюдается снижение деформации на 15%, что указывает на повышение жёсткости конструкции.

Проведённое исследование подтвердило эффективность комплексного подхода, основанного на интеграции современных CAD/CAE-технологий и альтернативных методов изготовления. Внедрение сквозного цифрового проектирования и переход к более предсказуемым методам изготовления демонстрируют реальный путь к минимизации простоев, сокращению затрат на контроль и повышению общей эффективности производства в рамках современных требований к цифровизации промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Что такое CAD, CAM, CAE-технологии? // ProCae.ru: сайт инженерных решений. – URL: http://www.procae.ru/articles/15-other/10-wgat-is-it.html (дата обращения: 10.04.2026).

2) Обзор популярных систем автоматизированного проектирования (CAD) // ПОИНТ: официальный сайт компании. – URL: https://www.pointcad.ru/novosti/obzor-sistem-avtomatizirovannogo-proektirovaniya (дата обращения: 10.04.2026).

УДК 621.9.014

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЯГОВОЙ ЦЕПИ

К.С. Салюкова, А.М. Шапошников

Научный руководитель – **А.М. Шапошников**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В работе рассмотрена модернизация конструкции специальной тяговой цепи промышленного конвейера. Проанализированы причины отказов, связанные с применением литых звеньев. Предложен переход к изготовлению звеньев из прокатной заготовки с механической обработкой и термическим упрочнением. Выполнен конечно-элементный анализ в среде ANSYS. Показано снижение деформаций на 15% при сопоставимом уровне напряжений. Проведена оценка экономической эффективности модернизации.

Ключевые слова: *тяговая цепь, модернизация, механическая обработка, прочностной анализ, экономическая эффективность*

MODERNIZATION OF THE DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF A SPECIAL TRACTION CHAIN

K.S. Salyukova, A.M. Shaposhnikov

Scientific Supervisor – **A.M. Shaposhnikov,** Candidate of Technical Science, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The paper considers the modernization of the design of a special traction chain used in an industrial conveyor system. The causes of failures associated with the use of cast links are analyzed. A transition to manufacturing the links from rolled stock followed by machining and heat treatment is proposed. A finite element analysis was performed using ANSYS software. The results demonstrate a 15% reduction in deformation at a comparable stress level. An economic efficiency assessment of the proposed modernization is also presented.

Keywords: *traction chain, modernization, machining, strength analysis, economic efficiency*

Надёжность тяговых органов конвейерного оборудования напрямую влияет на устойчивость производственного процесса и уровень эксплуатационных затрат предприятия. Разрушение одного звена цепи приводит к остановке всей транспортной линии, что сопровождается внеплановыми простоями и экономическими потерями. Анализ эксплуатации специальной цепи показал, что основными причинами отказов являются дефекты литых звеньев, работающих в условиях циклических растягивающих нагрузок. Целью работы является повышение эксплуатационной надёжности цепи за счёт модернизации конструкции и технологии изготовления.

Существующая конструкция предусматривает применение звеньев, получаемых методом стального литья. Несмотря на технологическую простоту, литая структура металла характеризуется возможным наличием дефектов [4]:

- газовой и усадочной пористости;
- неметаллических включений;
- микротрещин;
- локальной неоднородности.

При рабочей нагрузке внутренние дефекты становятся концентраторами напряжений и инициируют усталостное разрушение. Дополнительным фактором является нестабильность качества поставляемых отливок и необходимость усиленного входного контроля. В качестве альтернативы предложено изготовление звеньев из горячекатаного проката стали 45 с последующей механической обработкой и закалкой с отпуском.

Преимущества решения:

- однородная деформированная структура металла;
- повышение предела текучести до 540–600 МПа;
- увеличение усталостной прочности;
- снижение вероятности скрытых дефектов.

Оптимизация была направлена не на снижение номинального напряжения, а на уменьшение геометрических концентраторов и повышение реальной долговечности конструкции.

Расчёт напряжённо-деформированного состояния выполнен методом конечных элементов в среде ANSYS. Распределение эквивалентных напряжений представлено на рис. 1 и 2 [2].

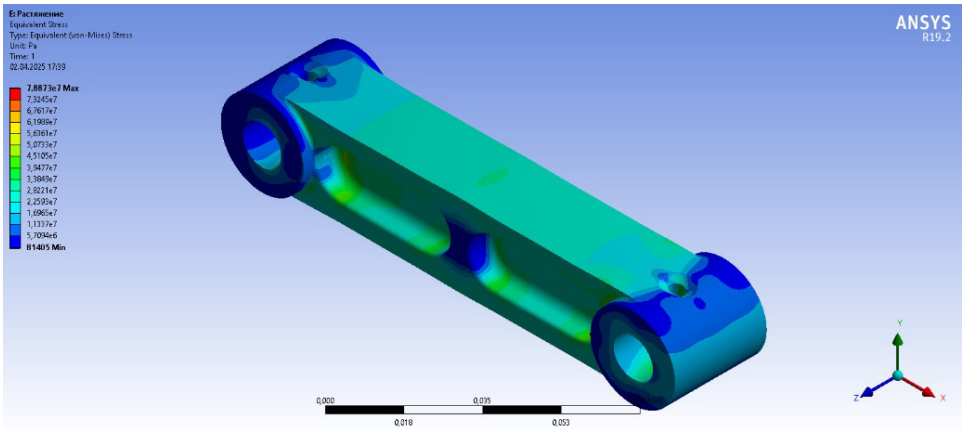


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений на литом звене

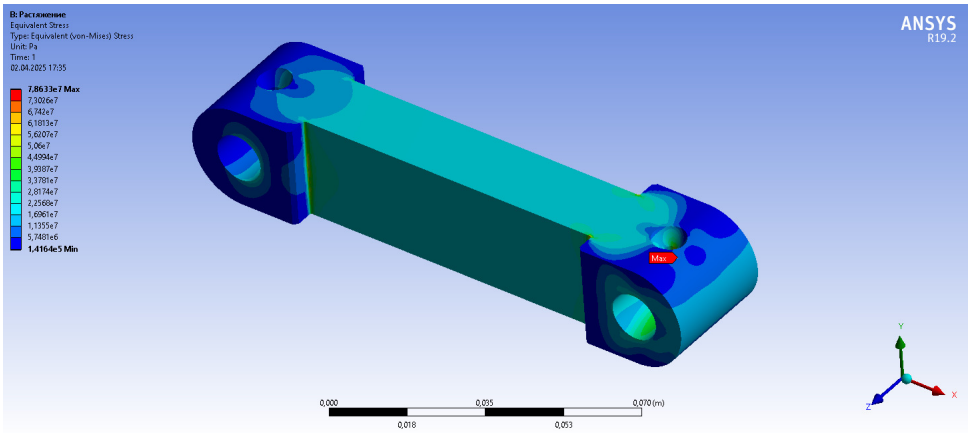


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений на модернизированном звене

Максимальные значения составили:

- литое звено – $7{,}887 \cdot 10^7$ Па (78,9 МПа);
- модернизированное звено – $7{,}863 \cdot 10^7$ Па (78,6 МПа).

Различие менее 0,5%, что подтверждает сохранение несущей способности конструкции.

Минимальный коэффициент запаса прочности составил 2,18–2,19 для обоих вариантов.

Результаты расчёта суммарных деформаций приведены на (рис. 3,4).

Максимальная деформация:

- литое звено – $1{,}49 \cdot 10^{-5}$ м;
- модернизированное – $1{,}26 \cdot 10^{-5}$ м.

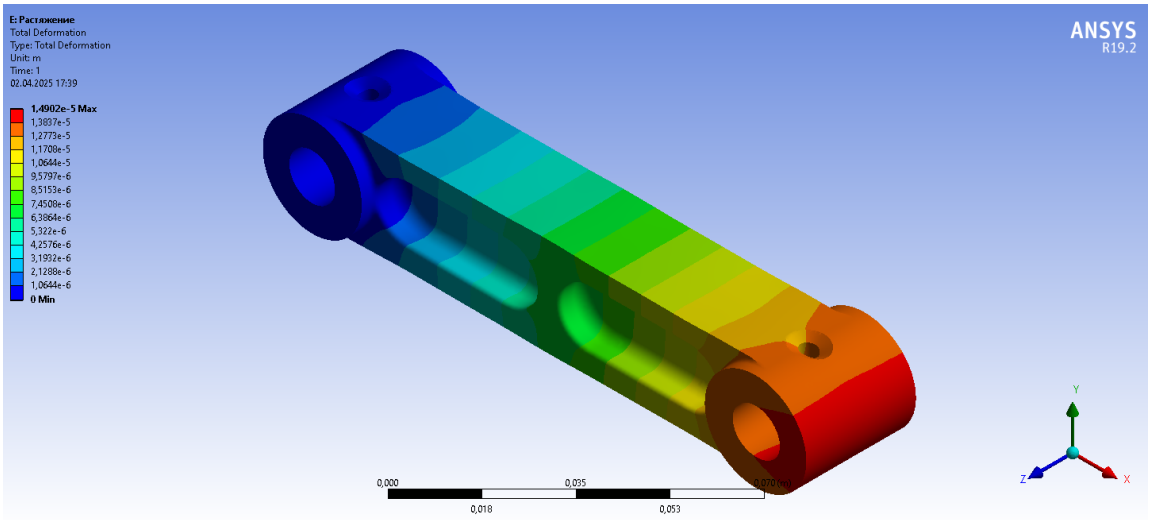


Рис. 3. Суммарные деформации на литом звене

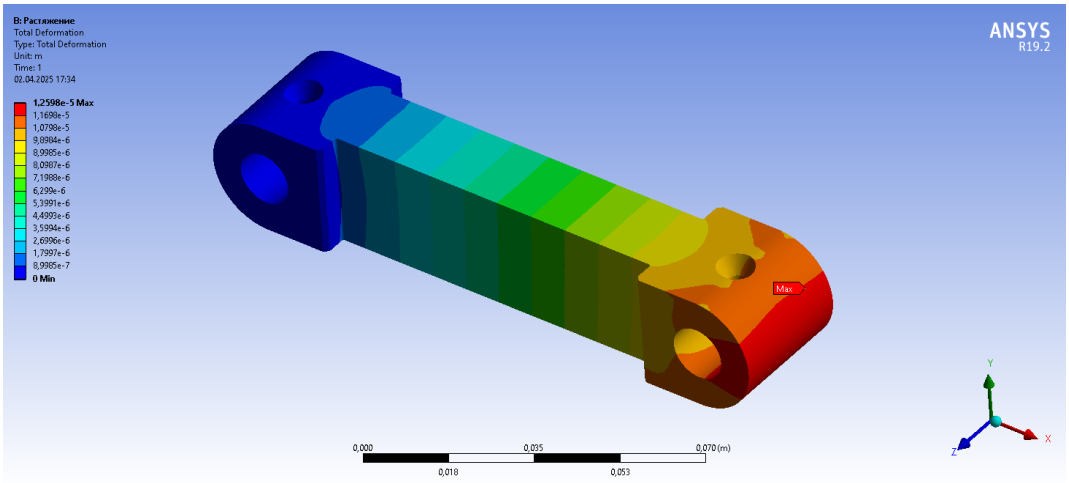


Рис. 4. Суммарные деформации на модернизированном звене

Снижение деформации составляет около 15%, что указывает на повышение жёсткости конструкции. Сравнительные результаты, полученные в результате расчетного метода, представлены в табл. 1.

Следует учитывать, что расчёт выполнен для идеализированной модели материала. В реальных условиях литые детали могут содержать микродефекты, не учитываемые в расчёте, но существенно влияющие на долговечность. Прокатная заготовка обладает более однородной структурой, что повышает эксплуатационную надёжность.

Таблица 1. Сравнение вариантов изготовления

Показатель	Литое звено	Механически обработанное
Макс. напряжение, МПа	78,9	78,6
Коэффициент запаса	2,18	2,19
Процент брака, %	8	2
Структурная однородность	Средняя	Высокая

Для литых звеньев фиксировался процент брака порядка 8%**,** обусловленный:

- внутренними дефектами,
- геометрическими отклонениями,
- нестабильностью структуры.

При переходе к изготовлению из прокатной заготовки с механической обработкой процент брака снижается до 2%, поскольку:

- отсутствуют литейные дефекты,
- обеспечивается высокая повторяемость размеров,
- используется контролируемая термическая обработка.

Годовая программа выпуска составляет 500 звеньев. Себестоимость одного звена в обоих вариантах составляет 3 500 руб.

Потери от брака определяются выражением

$$\mathrm{P_{брак}} = \mathrm{N} \cdot \alpha \cdot \mathrm{C}, \quad (1)$$

где N – годовой объём выпуска; α – доля брака; C – себестоимость изделия.

Потери от простоев оборудования рассчитывались по формуле:

$$\mathrm{P_{простой}} = \mathrm{n} \cdot t \cdot C_{\mathrm{ч}}, \quad (2)$$

где n – число аварийных остановок в год; t – продолжительность простоя, ч; $C_{ч}$– стоимость одного часа простоя.

Сравнение экономических показателей представлено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение экономических показателей

Показатель	Литой вариант	Модернизированный
Потери от брака, руб./год	140 000	35 000
Потери от простоев, руб./год	540 000	90 000
Общие потери, руб./год	680 000	125 000

Таким образом, переход к механически обработанным звеньям позволяет снизить годовые производственные потери более чем в 5 раз. Годовой экономический эффект составляет около 555 000 руб.

При капитальных затратах на внедрение порядка 900 000 руб. срок окупаемости модернизации составит:

$$\mathrm{T} = \frac{900000}{555000} \approx 1{,}6 \text{ года.}$$

Проведённый анализ показал, что модернизированное звено сохраняет несущую способность при сопоставимом уровне напряжений и характеризуется меньшей деформацией. Основное преимущество нового варианта заключается в более однородной структуре материала, снижении процента брака в четыре раза и уменьшении внеплановых простоев оборудования.

Переход к изготовлению звеньев из прокатной заготовки является технически обоснованным и экономически целесообразным решением для промышленного предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Основы теоретической и прикладной механики / Ю.Б. Рукин, Р.А. Жилин, Д.В. Хван [и др.]. – Воронеж: ВГТУ, 2019. – 227 с.

2) Мансурова, А.Р. Применение программного комплекса ANSYS в компьютерном моделировании // Молодой ученый. – 2018. – № 39. – С. 31–33.

3) Жидков, А.В. Применение системы ANSYS к решению задач конечно-элементного моделирования. – Нижний Новгород, 2006. – 115 с.

4) ГОСТ 53464–2009. Отливки из металлов и сплавов. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2010.

УДК 625.084

ИННОВАЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ ПРОИЗВОДСТВА ООО «ЗАВОД «ДОРОЖНЫХ МАШИН»

А.Б. Смирнов[1,2]

Научный руководитель - **И.С. Тюремнов**[1], канд. техн. наук, доцент

[1]Ярославский государственный технический университет
[2]ООО «Завод «Дорожных машин»

В данной статье представлен обзор инновационных разработок ООО «Завод «Дорожных Машин» в области дорожных катков. Особое внимание уделено двум ключевым направлениям:

1. ***Разработка осцилляторных вибровальцев:*** *Компания планирует представить на выставке CTT Expo 2026 первый в России асфальтовый каток модели DM-10-VD с осцилляторным вальцем. Рассматриваются преимущества данной технологии, заключающиеся в более эффективном уплотнении материала за счет совместного вертикального и горизонтального силового воздействия, что особенно важно при работе в условиях городской застройки и при ремонте улиц с наличием инженерных сетей.*

2. ***Развитие беспилотных и автономных катков:*** *Описан представленный на Международном транспортно-логистическом форуме в Санкт-Петербурге (1-3 апреля 2026 г.) беспилотный дорожный каток ДМ-7,7-ВВ (Вальцовый, вибрационный). Подчеркнуты его интеллектуальные системы управления, высокая степень локализации комплектующих (80%), а также меры безопасности. Отмечается, что развитие беспилотных технологий является стратегическим шагом для повышения эффективности, точности и безопасности дорожного строительства, несмотря на необходимость дальнейшего совершенствования для полной автоматизации процесса уплотнения.*

Статья подчеркивает стремление завода к формированию отраслевых тенденций, снижению зависимости от импортных технологий и повышению качества дорожного строительства в России.

Ключевые слова: *ООО «Завод «Дорожных машин», осцилляторный валец, беспилотный каток, автономный каток, инновации, импортозамещение.*

INNOVATIVE DESIGN OF ROAD ROLLERS PRODUCED BY OOO «ZAVOD «DOROZHNYKH MASHIN»

A.B. Smirnov[1,2]

Scientific Supervisor - **I.S. Tyuremnov**[1], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

[1]Yaroslavl State Technical University
[2]OOO “Zavod “Dorozhnyhmashin”

This article presents an overview of innovative road roller developments at OOO «Zavod «Dorozhnykh mashin». Particular attention is paid to two key areas:

1. ***Development of oscillating vibratory drums:*** *The company plans to present Russia's first asphalt roller, the DM-10-VD model, with an oscillating drum at CTT Expo 2026. The advantages of this technology, including more efficient material compaction due to combined vertical and horizontal force, are discussed. This is especially important when working in urban areas and during street repairs with utility lines.*

2. ***Development of unmanned and autonomous rollers:*** *The unmanned road roller DM-7,7-VV (drum, vibratory), presented at the International Transport and Logistics Forum in St. Petersburg (April 1-3, 2026), is described. The article highlights its intelligent control systems, high localization of components (80%), and safety measures. It notes that the development of unmanned technologies is a strategic step toward increasing the efficiency, precision, and safety of road construction, despite the need for further improvements to fully automate the compaction process.*

The article emphasizes the plant's commitment to shaping industry trends, reducing dependence on imported technologies, and improving the quality of road construction in Russia.

Keywords*: road rollers, import substitution, competitiveness, development prospects, requirements for the road roller*

Современное дорожное строительство невозможно представить без высокоэффективной и надежной техники, способной обеспечить высочайшее качество уплотнения дорожных покрытий. От степени и равномерности уплотнения основания и самого покрытия зависят долговечность, безопасность и комфортность эксплуатации дорог. В этом ряду важнейшую роль играют дорожные катки, конструкции которых постоянно совершенствуются для соответствия растущим требованиям отрасли.

ООО «Завод «Дорожных Машин», являясь одним из лидеров в области производства дорожно-строительной техники, уделяет особое внимание инновационным разработкам в сегменте катков. Предприятие стремится не просто следовать тенденциям, но и формировать их, предлагая рынку передовые решения, которые оптимизируют процессы строительства, повышают производительность и снижают эксплуатационные затраты. В данной статье будет проведен обзор основных ключевых конструктивных особенностей, технологических новшеств и преимуществ, которые делают продукцию завода востребованной и конкурентоспособной на рынке дорожно-строительной техники.

Валец является главным рабочим органом асфальтового катка, от которого зависит функциональность и эффективность катка в целом.

Большинство асфальтовых катков воздействуют на уплотняющий материал главным образом вертикальными статическими или динамическими усилиями сжатия. Между тем уплотнение дорожно-строительных материалов может быть более эффективным при горизонтальных, а точнее, совместных горизонтальных и вертикальных силовых воздействиях, так как у большинства материалов пределы прочности на сдвиг заметно ниже, чем на сжатие. Так появились осцилляторные вибровальцы, в которых используются два эксцентриковых вала, которые вращаются в одном направлении, развернутыми друг относительно друга на 180° (рис. 1).

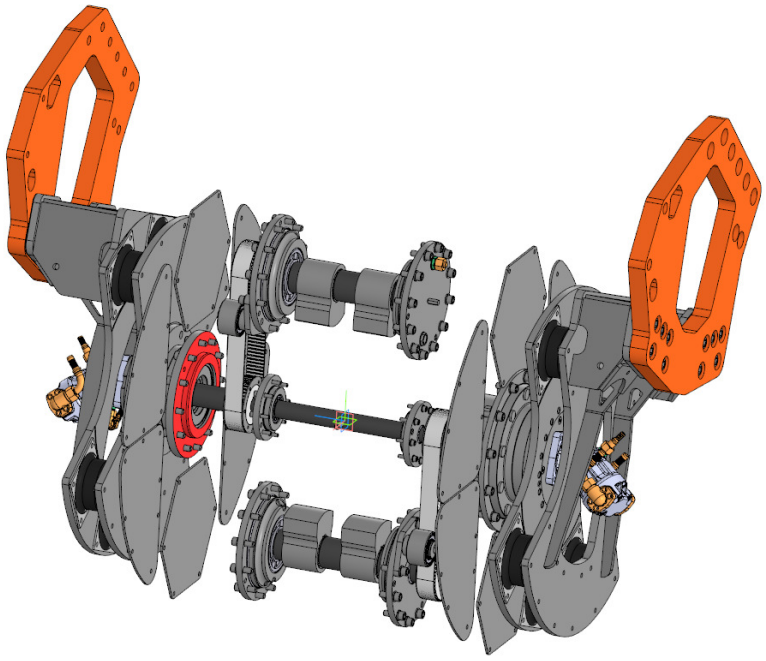


Рис. 1. Разработанная 3D-модель первого в России осцилляторного вальца

В этом случае уплотнение материала происходит за счет повторяющихся реверсивных сдвиговых деформаций материала при одновременном постоянном действии вертикальной нагрузки от силы тяжести асфальтового катка.

Уплотнение осцилляторными катками может производиться на мостах и путепроводах (где запрещено использование вибрации), в непосредственной близости к зданиям, подверженным повышенной чувствительности к шумам и вибрациям. Это свойство катков также немаловажно при текущем ремонте улиц, где производится лишь замена

старого асфальтобетонного покрытия, под которым остаются старые инженерные сети, которые могут быть повреждены воздействием вертикальных вибрационных сил при уплотнении асфальтобетонного покрытия.

Учитывая растущий спрос на осциллирующие вальцы, их преимущества в определенных условиях работы и тенденцию к импортозамещению, ООО «Завод «Дорожных машин» планирует представить на выставке CTTExpo 2026 первый в России асфальтовый каток модели DM-10-VDc осцилляторным вальцем.

В настоящее время продолжаются работы над беспилотными моделями дорожных катков с автопилотом, которые смогут самостоятельно контролировать режимы работы и увеличат производительность и безопасность на стройплощадках.

Во время участия в Международном транспортно-логистическом форуме, проходившем с 1 по 3 апреля 2026 в Санкт-Петербурге, ООО «Завод «Дорожных машин» представил свою новую разработку – каток дорожный ДМ-7,7-ВВ (Вальцовый, вибрационный) с системой беспилотного управления (рис. 2) [1].

Рис. 2. Беспилотный каток ДМ-7,7-ВВ.

Модель оснащена интеллектуальным ПО, обеспечивающим высокую точность выполнения работ. В составе оборудования — FPV-камеры, камеры переднего и заднего вида, а также датчик температуры асфальта для точного контроля технологических параметров укладки асфальта. Особое внимание при разработке было уделено безопасности: система предусматривает аварийную остановку по радиоканалу, а также аварийный стоп при потере связи.

Уровень локализации комплектующих достигает 80%, что обеспечивает независимость от внешних поставок запасных частей и устойчивость сервисного обслуживания.

Разработка беспилотных машин является важным шагом в развитии отечественного дорожно-строительного машиностроения, направленным на повышение эффективности строительства, снижение влияния человеческого фактора и улучшение качества укладки дорожного покрытия.

Новая модель ДМ-7,7-ВВ с системой беспилотного управления способна работать в различных условиях, включая сложные участки и ограниченные пространства, сохраняя требуемые высокие параметры уплотнения. На текущем этапе управление катком осуществляется дистанционно оператором с пульта (на расстоянии до 250 метров) по радиоканалу. Модель также оснащена системами для работы в автономных режимах: с удаленного рабочего места или полностью в автоматическом режиме.

ООО «Завод «Дорожных машин», осознавая сложности и важности задачи достижения требуемого уплотнения, акцентирует внимание на минимизации влияния человеческого фактора. Освоение технологий беспилотного управления требует значительных усилий в разработке программного обеспечения, систем навигации и управления, что способствует развитию компетенций в этих областях, но говорить о полноценном «российском беспилотном катке» пока преждевременно, так как главная задача создания беспилотного катка – минимизация влияния человеческого фактора на качество уплотнения.

Уплотнение дорожно-строительного материала - процесс, требующий высокой точности (соблюдения режимов вибрации, количества проходов, перекрытия полос прохода, скорости и др.) и соблюдения технологических параметров. Человеческий фактор, включающий усталость, невнимательность и недостаточную квалификацию оператора, негативно влияет на равномерность и степень уплотнения. Это приводит к нарушению технологии и, как следствие, к сокращению срока службы дорожного покрытия. «Автоматизировать управление» – это необходимый, но недостаточный шаг. Беспилотный каток должен самостоятельно оптимизировать процесс уплотнения, определяя оптимальное количество проходов, контролируя скорость и траекторию движения, регулировать параметры вибрации в зависимости от типа асфальта, температуры и других факторов.

С точки зрения эволюционного развития, на первоначальном этапе внедряются в конструкцию катка конструктивные решения, которые позволят автоматизировать процесс уплотнения. Это позволит создать основу для «интеллектуального катка», способного оценивать параметры уплотняемого материала, оптимально регулировать частоту и вынуждающую силу, а также корректировать параметры в зависимости от текущих условий.

Все эти шаги направлены на повышение качества, надежности и конкурентоспособности дорожных катков производства ООО «Завод «Дорожных машин», способствуя развитию отечественного производства и снижению зависимости от импортных технологий. Перспективным направлением для дальнейшего совершенствования является разработка беспилотных катков. Для успешного внедрения данной технологии необходимо разработать четкие стандарты и методы испытаний для проверки соответствия катков требуемым стандартам безопасности, а также законодательно закрепить соответствующую нормативную базу. В настоящее время ведется активная работа по накоплению знаний в области автономных систем, что позволит в дальнейшем успешно решать задачи по их разработке и интеграции в дорожно-строительную технику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ДМ-7,7-ВВ с беспилотным управлением. - URL: https://dormashina.ru/news/dm-77-vv-s-bespilotnym-upravleniem.html (дата обращения: 10.04.2026).

УДК 631.365.22

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА УСТАНОВКИ ДЛЯ АКТИВНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ ЗЕРНА

С.Я. Тихомиров

Научный руководитель – **А.С. Ключников**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается актуальная проблема агропромышленного комплекса, связанная с сохранением качества зерна и семенного вороха в период послеуборочной обработки, особенно в условиях повышенной влажности и ограниченного времени до закладки на хранение. В качестве эффективного технического решения предложен накопитель аэрожёлобного типа, совмещающий функции приёма, активного вентилирования (консервации) и транспортировки сыпучих материалов. Целью работы является разработка и практическая реализация методики технологического расчёта накопителя аэрожёлобного типа, позволяющей установить взаимосвязь геометрических, механических и технологических параметров установки с её эксплуатационными характеристиками. В ходе исследования проведён системный анализ конструкции, определены ключевые расчётные параметры: производительность аэрожелоба, длина транспортирования, угол наклона воздухораспределительной решётки и аэродинамическое сопротивление решётки. Обосновано, что предложенная методика позволяет скомпоновать математическую модель устройства и гарантировать корректную и предсказуемую работу установки.

Ключевые слова: *накопитель аэрожёлобного типа; буферная ёмкость; активное вентилирование зерна; послеуборочная обработка; воздухораспределительная решётка; сыпучие материалы*

DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR TECHNOLOGICAL CALCULATION OF A PLANT FOR ACTIVE VENTILATION OF GRAIN

S.Ya. Tikhomirov

Scientific Supervisor – **A.S. Klyuchnikov,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses an urgent problem of the agro-industrial complex related to maintaining the quality of grain and seed piles during post-harvest processing, especially in conditions of high humidity and limited time before storage. An aerobic storage device is proposed as an effective technical solution, combining the functions of reception, active ventilation (preservation) and transportation of bulk materials. The purpose of the work is to develop and practically implement a method for the technological calculation of an aerobatic type storage device, which makes it possible to establish the relationship between the geometric, mechanical and technological parameters of the installation and its operational characteristics. In the course of the study, a system analysis of the design was carried out, key design parameters were determined: the performance of the air duct, the length of transportation, the angle of inclination of the air distribution grid and the aerodynamic resistance of the grid. It is proved that the proposed technique makes it possible to put together a mathematical model of the device and guarantee the correct and predictable operation of the installation.

Keywords: *aerobic type storage; buffer tank; active ventilation of grain; post-harvest treatment; air distribution grid; bulk materials*

Введение

Одной из ключевых проблем современного агропромышленного комплекса является сохранение качества зерна и семенного вороха в период ожидания послеуборочной обработки. Несмотря на высокую урожайность зерновых, до сих пор не найдены технические решения, обеспечивающие сохранность зерна во время его временного и длительного хранения. Сохранность зерна могут обеспечивать устройства, обладающие способностью аэрировать и вентилировать зерновой материал [4].

Свежеубранное зерно в ворохе, как правило, обладает повышенной влажностью и температурой, что при отсутствии своевременной сушки и аэрации приводит к развитию

патогенных микроорганизмов, самосогреванию и, как следствие – потере всхожести. По данным исследований, при влажности вороха 25-28% всхожесть семян уже за три дня снижается на 20% [1].

Особенно остро эта проблема стоит в условиях ограниченного времени между уборкой и отправкой на хранение, а также при ограниченных мощностях зерносушильных комплексов. Таким образом, актуальность исследований в данной области определяется необходимостью комплексного повышения энергоэффективности и производительности процессов послеуборочной обработки, снижения уровня травмирования зерна в процессе его транспортировки, а также внедрением технологий долгосрочного хранения, позволяющих сохранять семенные и продовольственные качества зерна на протяжении продолжительного времени.

В качестве такого технического решения предлагается накопитель аэрожёлобного типа – устройство, совмещающее функции приёма, активного вентилирования (консервации) и транспортировки сыпучих материалов (рис. 1). Подобные решения обладают высокой эксплуатационной надежностью, минимальным количеством движущихся частей, просты и компактны [2]. Кроме того, внедрение данного решения позволяет существенно снизить потери зерна, повысить гибкость послеуборочной логистики и сократить затраты на последующую сушку за счёт предварительной аэрации.

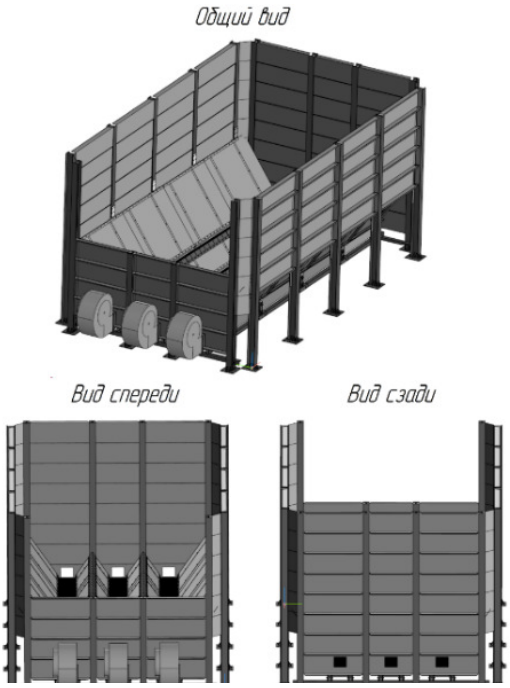


Рис. 1. Общий вид накопителя аэрожёлобного типа

Очевидно, что данная установка является сложной технической системой с большим количеством варьируемых параметров, для качественной, предсказуемой и надёжной реализации которой требуется проведение расчётов.

Целью данной работы является разработка и реализация методики технологического расчёта устройства накопителя аэрожёлобного типа для получения возможности точного понимания взаимосвязи значений различных геометрических, механических и технологических параметров, а также эксплуатационных характеристик и их комплексного влияния на эффективность, стабильность и надёжность работы устройства.

Для достижения поставленной цели предполагается проведение системного анализа конструкции с целью выявления перечня расчётных параметров; анализ существующих методик расчёта данных параметров; разработка методики технологического расчёта установки; проведение расчёта установки.

Разработка методики технологического расчёта и проведение расчёта

Рассмотрим принцип работы накопителя (рис. 2) подробнее.

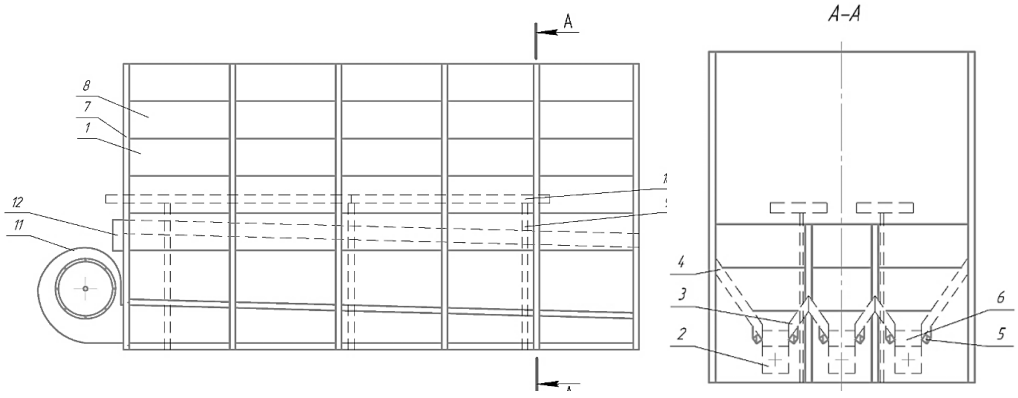


Рис. 2. Эскиз проектируемого изделия

Накопитель аэрожёлобного типа в основе представляет собой бункер (1), днище которого формируется тремя основными транспортирующими воздухораспределительными каналами (2), рассекателями (3) и боковыми скатами (4), закреплёнными на раме (5). Канал (2) оснащён перфорированными решетками (6), которые смонтированы на раме (5). Стены бункера (1) состоят из размещённых через фиксированное расстояние опорных колонн (7), между которыми закреплены листовые несущие элементы (8). Внутри бункера (1) через равное расстояние установлены опорные колонны эстакады (9), сверху которых закреплены модули площадки эстакады (10). Снаружи конструкции установлены вентиляторы (11), подающие воздух в каналы (2).

Исходя из вышесказанного, мы видим, что для реализации проектного расчёта конструкции необходимо определить конкретные исходные данные, определяющие как габаритно-геометрические, так и технологические параметры. Основными параметрами, в данном случае, является:

1. Производительность аэрожелоба W, т/ч;
2. Длина транспортирования L, м;
3. Угол наклона воздухораспределительной решетки α, град;
4. Физико-механические свойства транспортируемого материала;
5. Аэродинамическое сопротивление воздухораспределительной решетки.

Накопители обычно устанавливают в полностью или частично крытых зданиях или цеховых помещениях, где опорой для кровли и основным несущим элементом служат колонны, расположение, шаг и высота которых, является стандартизированными размерами. Как пишет в своей работе [6] В.П. Вороненко, стандартный шаг колонн t в цеховых помещениях составляет 6 или 12 метров, длина пролёта L – 18, 24, 30 или 36 метров, а высота колонн h обычно 6 или 12 метров (рис. 3).

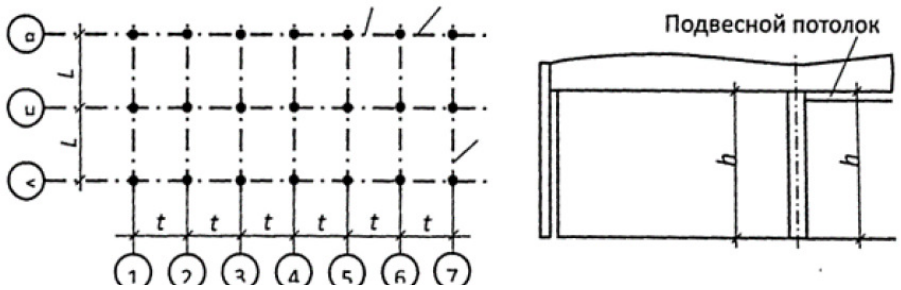


Рис. 3. Схема объёмных строительных параметров здания [6]

В связи с вышеназванными стандартными размерами, принимаем ширину проектируемого накопителя равной 5,5 метров.

Высоту пшеницы в аэрожёлобе рассчитываем по формуле [2]:

$$h_{\text{пш}} = H_{\text{зд}} - h_{\text{с}} - h_{\text{зап}} + h_{\text{к}}; \quad (1)$$

где $h_{\text{пш}}$ – высота пшеницы в аэрожёлобе;

$H_{\text{зд}}$ – высота от чистого пола до перекладины кровли здания ($H_{\text{зд}}$ = 11 м);

$h_{\text{с}}$ – высота самосвала с поднятым кузовом ($h_{\text{с}}$ = 7,5 м);

$h_{\text{зап}}$ – высота от верхней точки кузова до перекладины кровли здания ($h_{\text{зап}}$ = 0,5 м);

$h_{\text{к}}$ – высота пшеницы, выходящей за пределы аэрожёлоба ($h_{\text{зап}}$ = 1 м);.

$$h_{\text{пш}} = 11 - 7{,}5 - 0{,}5 + 1 = 4 \text{ м}. \quad (2)$$

Далее рассчитаем объём и длину накопителя. Исходя из того, что 1 м^3 пшеницы имеет массу 0,75 тонн, мы определяем объём пшеницы массой 150 тонн, откуда получаем 200 м^3 пшеницы. Из полученного значения объёма определяем длину:

$$L = \frac{V}{B \cdot H} = \frac{V}{B \cdot h_{\text{пш}}}; \quad (3)$$

где V – объём пшеницы; B – ширина аэрожёлоба,

$$L = \frac{V}{B \cdot h_{\text{пш}}} = \frac{200}{5{,}5 \cdot 4} = 9 \text{ м}.$$

В зависимости от вида и влажности транспортируемого материала значение условной скорости фильтрации воздуха и величина удельной производительности аэрожелоба изменяются (табл. 1).

Таблица 1. Примерные значения условной скорости фильтрации воздуха и удельной производительности аэрожелоба при транспортировании зерна различных культур и сухой измельченной массы [5]

Транспортируемый материал	Влажность (не более), %	Условная скорость фильтрации воздуха, $\upsilon\phi$, м/с	Удельная производительность, g_y, т\ч на 1 см решетки при α = 0
Пшеница, ячмень, рожь	14	1,3…1,4	1,5…1,6
То же То же	22 30	1,7…1,8 1,9…2,0	1,4…1,5 1,3…1,4
Просо	14	1,0	1,0…1,1
Гречиха	14	1,1	1,0…1,1
Горох, кукуруза	14	2,1	1,5…1,6
Травяная масса с длиной частиц до 30 мм.	18	1,3…1,8*	0,3...0,6*

* - большее значение параметров принадлежит для толстостебельных трав

Теперь находим значение удельной производительности аэрожёлоба при принятом уклоне воздухораспределительной решетки по формуле [5]:

$$g_y(\alpha) = K_\alpha g_y, \quad (4)$$

где K_α - коэффициент, учитывающий уклон (подъем) решетки.

Таблица 2. Значения коэффициента K_α[5]

α, град.	Уклон						Подъём	
	1	2	3	4	5	6	1	2
K_α	1,07	1,18	1,30	1,32	1,39	1,45	0,81	0,57

Угол уклона решётки в нашем случае принимаем 1 градус, поэтому коэффициент K_α, по таблице 2, принимается 1,07. А удельная производительность g_y, по таблице 1, принимается 1,4.

$$g_y(\alpha) = 1 \cdot 1{,}4 = 1{,}4.$$

Определяем минимальную ширину воздухораспределительной решетки $B_{тр}$ (транспортирующего канала на уровне решетки), по формуле [5]:

$$B_{\text{тр}} = \frac{W}{g_y(\alpha)}, \tag{5}$$

где W - производительность аэрожёлоба в режиме разгрузки, т/ч.

На основе анализа существующих конструкций и практических рекомендаций, оптимальная ширина аэрожёлоба принимается 300-400 мм. При этом важно, чтобы живое сечение чешуйчатого сита составляло 9-10%, а высота отверстий сита находилась в пределах 1,0-1,2 мм для предотвращения залипания влажным материалом [2, 3]. Принимаем ширину 0,4 м. Следующим шагом находим площадь воздухораспределительной решетки по формуле [5]:

$$F_p = B_{\text{тр}} \cdot L. \tag{6}$$

По формуле [5] определяем расход воздуха на транспортирование Q_1 , м³/с и Q , м³/ч

$$Q_1 = F_p \upsilon_ф = 2{,}7 \cdot 1{,}7 = 4{,}59 \text{ м}^3/\text{с}; \tag{7}$$

$$Q = 3600,\ Q_1 = 3600 \cdot 4{,}59 = 16524 \text{ м}^3/\text{ч};$$

При выборе вентилятора расчетную величину расхода воздуха Q увеличивают на 10-15% с учетом возможных утечек воздуха. В таком случае Q будет равняться 19000 м^3/ч.

Определяем аэродинамическое сопротивление незагруженной воздухораспределительной решетки H_p из следующего выражения [5]:

$$H_p = \varepsilon \cdot H_a \cdot \frac{\upsilon_щ^2}{2}, \tag{8}$$

где ε - коэффициент местного сопротивления; H_a - атмосферное давление, Па; $\upsilon_щ$ - средняя скорость движения воздуха из щели решетки, м/с.

$\upsilon_щ$ определяется по формуле [5]:

$$\upsilon_щ = \frac{Q_1}{\Sigma S_щ}, \tag{9}$$

где $\Sigma \cdot S_щ$ - общая площадь щелей, м²;

ε можно найти по следующему выражению [5]:

$$\varepsilon = \lambda_p \frac{\Sigma l_щ}{D_{эк.р.}}; \tag{10}$$

где λ_p - коэффициент сопротивления воздухораспределительной решетки; $\sum l_щ$ – суммарная длина щелей, м; $D_{эк.р.}$ - эквивалентный диаметр решетки.

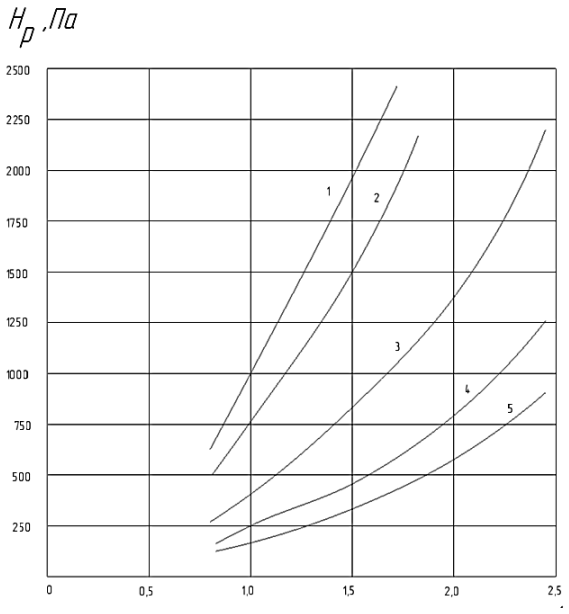


Рис. 4. Аэродинамическое сопротивление воздухораспределительных решеток из чешуйчатых сит (зиг) в зависимости от условной скорости фильтрации воздуха при высоте отверстий решетки: 1 – 0,8; 2 – 1,0; 3 – 1,2; 4 – 1,4; 5 – 1,9 мм [5]

λ_p можно определить по универсальной формуле Альтшуля А [2]:

$$\lambda_p = 0{,}11\left(\frac{0{,}68}{Re_к} + \frac{\eta_к}{D_{эк.р.}}\right), \tag{11}$$

где $\eta_к$ - относительная шероховатость стенок канала.

Определим аэродинамическое сопротивление незагруженной воздухораспределительной решетки. В зависимости от условной скорости фильтрации воздуха, которая равна 1,7 м/с, и при высоте отверстий решетки, равной 1 мм, мы получаем $H_р = 1950$ Па.

Величина полного давления воздуха под решеткой зависит от многих факторов: условной скорости фильтрации воздуха, коэффициента живого сечения решетки, высоты слоя транспортируемого материала и его физико-механических свойств, сечения воздухоподводящего канала и других факторов.

По обобщенным литературным и экспериментальным данным полное давление воздуха $Н_п$ под решеткой определяется по выражению [5]:

$$H_П = H_к + H_р, \tag{12}$$

где $H_к$ - местные потери давления в канале, Па.

При этом $H_к$ можно рассчитать по следующей формуле Дариси – Вейсбаха [2]:

$$H_к = \lambda_р \frac{L}{D_{эк.р.}} H_а \frac{\upsilon_{ср}^2}{2}, \tag{13}$$

где $\upsilon_{ср}$ - средняя скорость воздуха в аэрожёлобе, м/с.

Зимин Е.М. предложил следующую формулу [2]:

$$H_к = \lambda_р H_а \frac{L(h_{аэр} + B_{тр})}{4h^3_{аэр} B^3_{тр}} \upsilon_{ср}^2;$$

где $h_{аэр}$ - высота аэрожёлоба в сечении, м; $B_{тр}$ - ширина транспортирующего канала, м.

С допустимой погрешностью полное давление воздуха $H_П$ под решеткой определяется по выражению [6]:

$$H_П = 1{,}2 H_р. \quad (14)$$

Далее находят аэродинамическое сопротивление аэрожёлоба, Па:

$$H_ж = H_П K_П, \quad (15)$$

где $K_П$ - коэффициент, учитывающий потери давления в сети на участке «вентилятор – аэрожёлоб»; в среднем $K_П$ =1,1…1,2.

По величине подачи воздуха (Q_1) и аэродинамического сопротивления аэрожёлоба ($H_ж$), по характеристикам производят выбор вентилятора (тип, номер, частоту вращения). Следует выбрать вентилятор с максимальным КПД ($\eta_в$).

Определяем минимальную суммарную мощность вентиляторов в режиме разгрузки [5]:

$$N_в = \frac{Q_1 \cdot H_ж}{1020 \cdot \eta_в}. \quad (16)$$

Проектируемый аэрожёлоб трёхканальный, т.е. в конструкции установлено три вентилятора. Таким образом, минимальная мощность одного вентилятора – 5,6 кВт.

Для удобства дальнейшего проектирования все вычисленные параметры, габаритные и присоединительные размеры, а также модель покупного оборудования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Свод расчётных величин

Величина		Размерность	Значение
Вместимость		т	150
Производительность аэрожёлоба *W*		т/ч	30
Объём пшеницы *V*		м3	200
Габаритные размеры	*L*	м	9
	B	м	5,5
	H	м	4
Ширина транспортировочных решёток *B*		м	0,4
Площадь решётки *F*		$м^2$	2,7
Расход воздуха *Q*		$м^3$/ч	16524
Суммарная мощность вентиляторов *Nв*		кВт	16,8

Также необходимо рассчитать и учесть профиль сечения геометрии днища. Следует отметить, что для улучшения транспортирования и исключения застойных зон, рассекатели не должны начинаться сразу от чешуйчатого сита. Между ситом и рассекателем необходимо оставлять вертикальный участок высотой 50-75 мм [2]. Исходя из синтеза рассчитанных выше значений, практического опыта и анализа литературы, были приняты следующие наиболее эффективные значения (рис. 5).

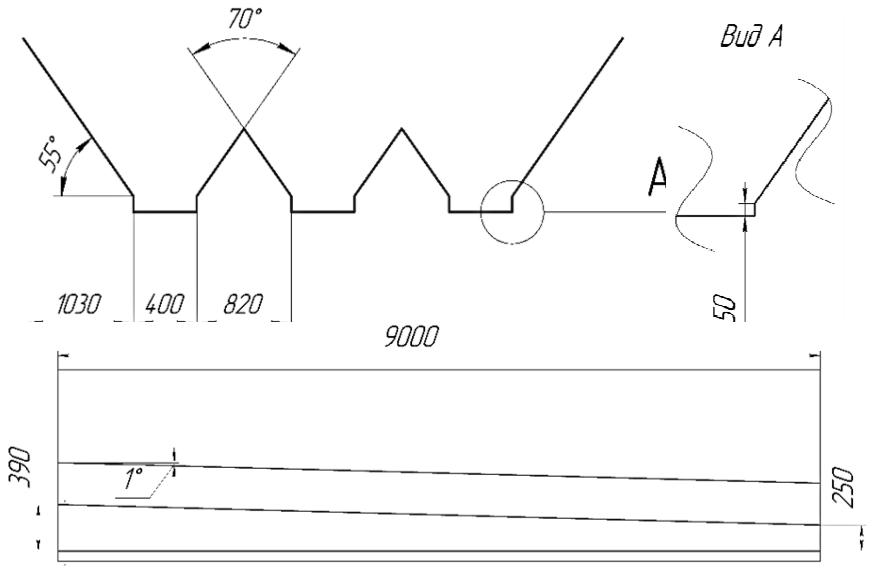


Рис. 5. Габаритные размеры профиля днища

Таким образом, полностью произведя данный расчёт, мы получим скомпонованную математическую модель проектируемого устройства и возможность гарантировать корректную работу установки.

Выводы

1. В результате проведённого научного исследования были определены ключевые конструктивные, геометрические и технологические параметры и решения, определены и обоснованы габаритные размеры накопителя, а такжеобъём накопителя под конкретный зерновой продукт и заданный объём в 150 тонн.

2. Выполнены расчёты аэродинамических параметров (расход воздуха, сопротивление, мощность вентиляторов), на основании которых определён профиль днища и основные размеры бункера. Предложенная методика может быть использована для проектирования аналогичных устройств под другие сыпучие материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Волхонов, М.С. Обоснование и совершенствование процессов и аэрожелобных устройств для послеуборочной обработки зерна: дис. … д-ра техн. наук: 05.20.01. – Кострома, 2007. – 480 с.

2) Волхонов, М.С. Повышение эффективности сушки и охлаждения зерна на базе установок активного вентилирования: монография / М.С. Волхонов, И.Б. Зимин. – Караваево: Костромская ГСХА, 2014. – 164 с.

3) Дианов, Л.В. Семенопункт с аэрожелобами и ромбическими сушилками: устройство, особенности эксплуатации и предложения по внедрению энергосберегающих приемов / Л.В. Дианов, В.А. Смелик. – Ярославль , 1994. – 72 с.

4) Устройство для активного вентилирования и пневмовыгрузки сыпучего материала / И.М. Лукьянов, М.М. Ухатюк, С.А. Ткаченко [и др.]. – URL: https://sciup.org/ustrojstvo-dlja-aktivnogo-ventilirovanija-i-pnevmovygruzki-sypuchego-materiala-140113167 (дата обращения: 09.04.2026).

5) Нуруллин, Э.Г. К методике расчета аэродинамических транспортеров сыпучих материалов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-metodike-rascheta-aerodinamicheskih-transporterov-sypuchih-materialov (дата обращения: 30.05.2025).

6) Проектирование автоматизированных участков и цехов : учеб. для машиностроит. спец. вузов / В.П. Вороненко, В.А. Егоров, М.Г. Косов [и др.]; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 272 с. – URL: https://disk.yandex.ru/i/x-_AnxQ7wlgsvA (дата обращения: 09.04.2026).

УДК 621.878/.879

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО НОЖА ПЛЯЖЕУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Н.А. Тихонов

Научный руководитель – **Л.М. Шамахов**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В работе представлены результаты конечно-элементного моделирования напряжённо-деформированного состояния эксцентрикового ножа пляжеуборочной машины. Целью исследования являлось снижение прогиба режущей кромки путём изменения формы усиливающего элемента. Результаты проведены в среде КОМПАС-3D.

Ключевые слова: *пляжеуборочная машина, эксцентриковый нож, метод конечных элементов, напряжённо-деформированное состояние, оптимизация конструкции*

OPTIMIZATION OF THE ECCENTRIC KNIFE DESIGN OF A BEACH CLEANING MACHINE BASED ON FINITE ELEMENT ANALYSIS

N.A. Tikhonov

Scientific Supervisor – **L.M. Shamakhov**, Senior Lecturer.

Yaroslavl State Technical University

The paper presents the results of finite-element modeling of the stress-strain state of the eccentric knife of a beach-cleaning machine. The goal of the study was to reduce the deflection of the cutting edge by changing the shape of the reinforcing element. The results were obtained using the КОМПАС-3D environment.

Keywords: *beach cleaning machine, eccentric knife, finite element method, stress-strain state, design optimization*

Пляжеуборочные машины предназначены для очистки песчаных территорий от мусора, водорослей и посторонних включений [1]. Рабочим органом является эксцентриковый нож, который срезает верхний слой песка и подаёт его на просеивающий конвейер [2]. В процессе работы нож испытывает значительные нагрузки: усилие резания, вес транспортируемого песка, а также при наезде на камни, коряги и другие препятствия.

Целью данной работы является оценка жёсткости существующей конструкции эксцентрикового ножа и разработка усовершенствованной формы усиливающего элемента, обеспечивающей снижение прогиба режущей кромки.

Объектом исследования является нож пляжеуборочной машины, выполненный в виде совка. Базовая конструкция включает режущий лист толщиной 4 мм и усиливающую накладку V-образного типа толщиной 15 мм, расположенную с внешней стороны днища. Материал конструкции – сталь 10ХСНД.

При движении машины нож срезает слой песка. Ширина ножа составляет 2,6 м. Глубина срезаемого слоя принята равной 0,3 м с учётом возможных максимальных нагрузок при работе на плотных участках пляжа или при наличии препятствий. Усилие резания составляет 3120 Н. Вес транспортируемого песка, находящегося на внутренней поверхности ножа, принят равным 1000 Н с учётом запаса, обеспечивающего моделирование условий эксплуатации с повышенными нагрузками. Нагрузки прикладывались следующим образом: усилие резания равномерно распределено по режущей кромке ножа, вес песка равномерно распределён по внутренней поверхности днища. Закрепление модели осуществлялось по цилиндрическим поверхностям отверстий под пальцы и валы эксцентрикового механизма. Приложение нагрузок и закрепление ножа представлено на рис. 1.

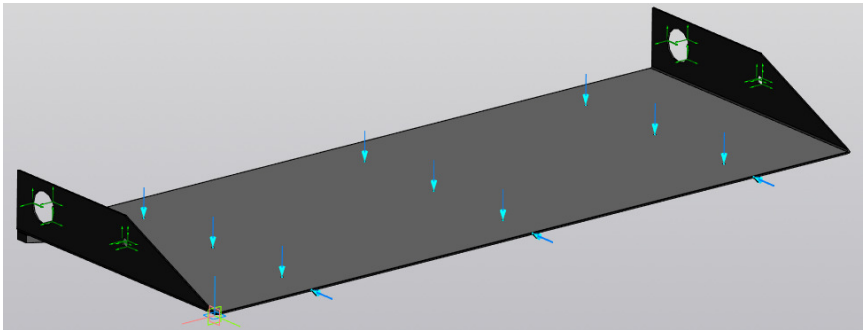


Рис. 1. Приложение нагрузок и закрепления

Исследование проводилось в модуле прочностного анализа системы КОМПАС-3D. Анализировались максимальные перемещения (прогиб) ножа и коэффициент запаса по прочности.

Исследование выполнялось в несколько этапов: расчёт базовой конструкции (нож 4 мм + накладка 15 мм), расчёт варианта с увеличенными толщинами (нож 5 мм + накладка 20 мм), разработка и расчёт модифицированной конструкции с изменённой формой усиливающего элемента.

Результаты расчёта первого этапа показали, что максимальный прогиб режущей кромки составляет 1,02 мм, масса конструкции равна 111,1 кг. Напряжения при этом не превышают допустимых значений, однако величина прогиба вызывает опасения, т.к. такой прогиб может привести к неравномерному срезу песка и повышенному износу конструкции, резкльтаты представлены на рис. 2 и 3.

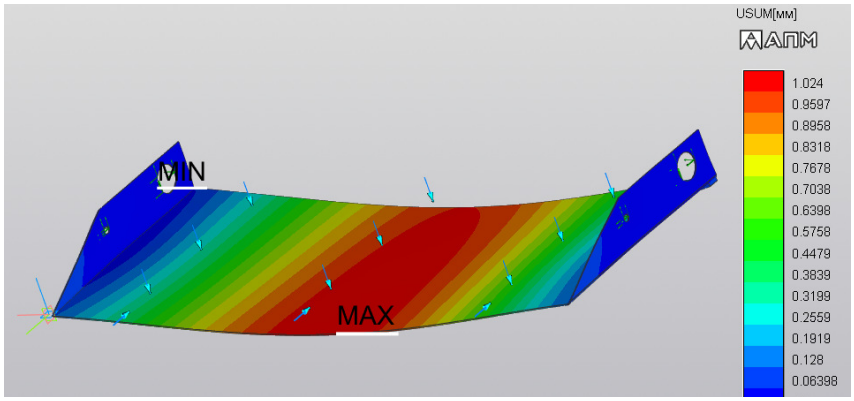


Рис. 2. Карта распределения перемещений ножа для варианта 1

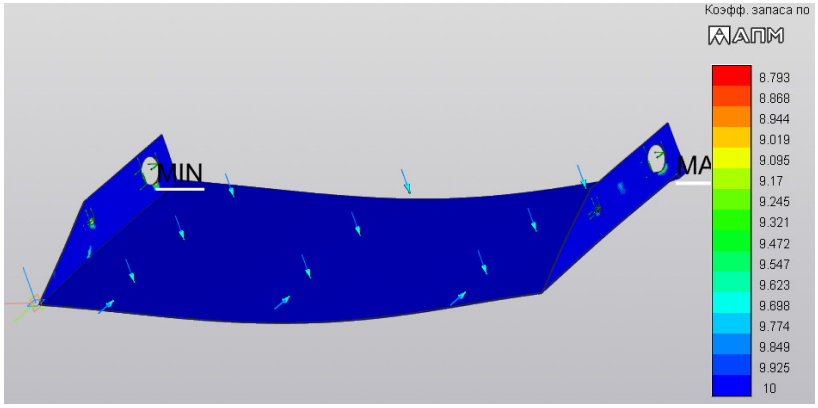


Рис. 3. Карта распределения коэффициента запаса для варианта 1

Результаты второго этапа, представленные на рис. 4 и 5, показали, что прогиб снизился незначительно - до 0,99 мм, однако масса конструкции увеличилась до 207,1 кг, что на 86,5% больше базового варианта.

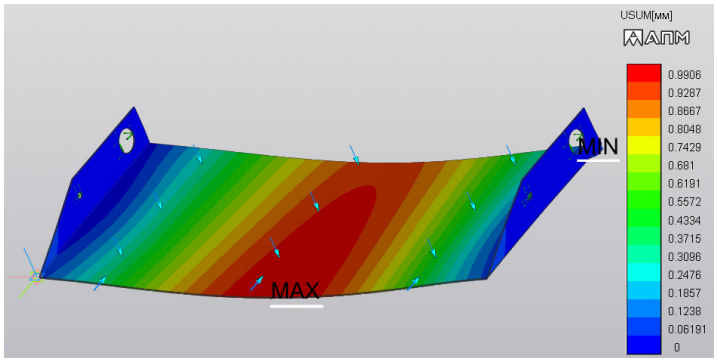


Рис. 4. Карта распределения перемещений ножа для варианта 2

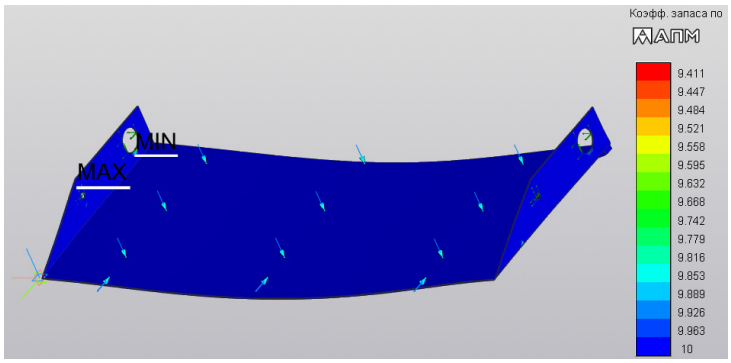


Рис. 5. Карта распределения коэффициента запаса для варианта 2

Анализ перемещений базовой конструкции показал, что максимальный прогиб наблюдается в средней части ножа, между точками крепления. На основании этого было принято решение изменить форму усиливающего элемента: вместо сплошной накладки V-образного типа, которая показана на рис. 6, предложена рама с двумя поперечными рёбрами, установленными в зоне наибольшего прогиба, представлена на рис. 7. Такая форма позволяет усилить нож именно в проблемной зоне, сохранить общую массу узла на приемлемом уровне и повысить жёсткость за счёт рационального распределения материала.

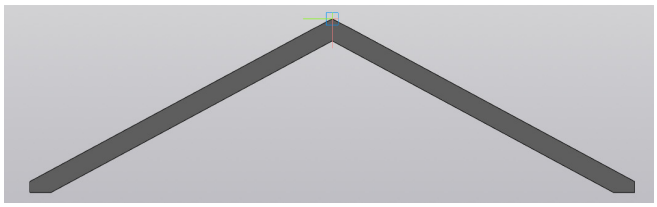


Рис. 6. Изначальная форма усиливающей накладки

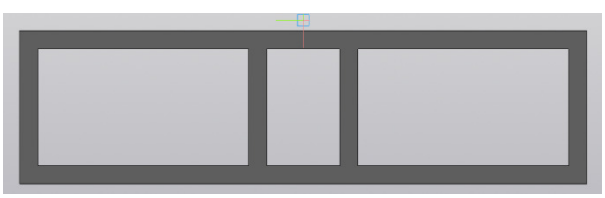


Рис. 7. Измененная форма усиливающей накладки

Результаты расчёта модифицированной конструкции, представленные на рис. 8 (нож 4 мм, усиливающая рама 15 мм), показали: максимальный прогиб снизился до 0,65 мм, что почти в два раза меньше по сравнению с базовой конструкцией, а масса составила 150,6 кг, что незначительно больше.

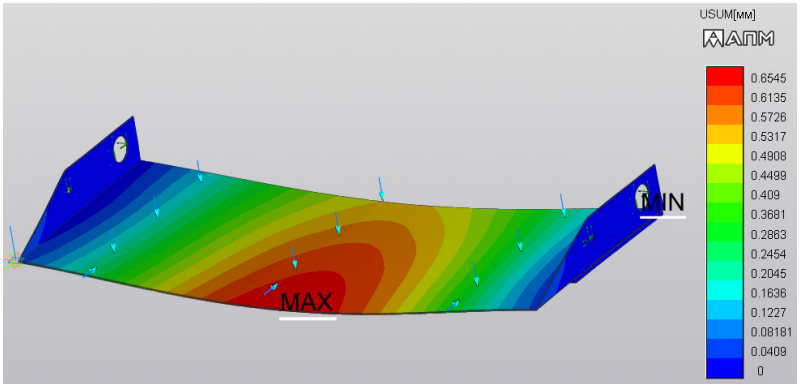


Рис. 8. Карта распределения перемещений для варианта 3

Вариант 2 показал, что увеличение толщины ножа на 25% и накладки на 33% дало снижение прогиба всего на 3% при значительном росте массы - более 86%.

Вариант 3 продемонстрировал, что изменение формы с V-образной накладки на раму с поперечными рёбрами позволило снизить прогиб на 36% при увеличении массы всего на 35,6% (что значительно эффективнее варианта 2). Эффект достигнут благодаря установке поперечных рёбер в зоне максимального прогиба, что перераспределило нагрузки и уменьшило деформацию режущей кромки при более рациональном использовании материала.

В результате проведённого конечно-элементного анализа установлено: базовая конструкция эксцентрикового ножа с усиливающей накладкой V-образного типа при расчётных нагрузках имеет максимальный прогиб режущей кромки 1,02 мм и массу 111,1 кг; простое увеличение толщины элементов не даёт существенного эффекта - прогиб снижается лишь на 3% при увеличении массы на 86,5%; наиболее эффективным способом повышения жёсткости является изменение формы усиливающего элемента; предложенная конструкция в виде пространственной рамы с двумя поперечными рёбрами, установленными в зоне максимального прогиба, позволяет снизить прогиб до 0,65 мм при незначительном увеличении массы. Данное решение обеспечивает требуемую жёсткость рабочего органа и повышает надёжность машины в условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Тихонов, Н.А. Техника для очистки пляжей в России: актуальные вызовы и потенциал развития / Н.А. Тихонов // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы: Сборник материалов 29-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 23 апреля 2025 года. – Москва: Межрегиональная общественная организация содействия развитию культуры образования, спорта "Стратегия объединения", 2025. – С. 163-166. – EDN QJVZBJ.

2) Тихонов, Н.А. Выбор просеивающего оборудования для пляжеуборочной техники / Н.А. Тихонов, Л.М. Шамахов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в машиностроительной, дорожной и строительной отраслях - 2025: Материалы Международной научно-практической конференции, Белгород, 25–26 сентября 2025 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 201-206. – EDN AUMJQX.

УДК 517.925

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ НАСТРОЙКИ, ИСПЫТАНИЯ И РЕМОНТА ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Н.А. Трескин

Научный руководитель – **А.В. Оборин,** канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается стенд для настройки и испытания пневмопривода токоприёмников, чтобы оценить техническое состояние устройства и выявить неисправности.

Ключевые слова: *пневмопривод, расчет на прочность, кинематические схемы.*

DEVELOPMENT OF A STAND FOR SETTING UP, TESTING, AND REPAIRING THE CURRENT COLLECTORS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

N.A. Treskin

Scientific Supervisor – **A.V. Oborin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

A stand for setting up and testing the air drive of current collectors is being considered in order to assess the technical condition of the device and identify malfunctions.

Keywords*: pneumatic drive, strength calculation, and kinematic diagrams.*

Пневмопривод токоприёмников проверяют, чтобы оценить техническое состояние устройства и выявить неисправности [1]**.** Это необходимо, так как пневмопривод обеспечивает подъём и опускание токоприёмника, и его работа влияет на надёжность работы устройства.

Некоторые задачи проверки:

– Контроль герметичности – проверка, не происходит ли утечка сжатого воздуха в привод;

– Проверка статической характеристики – нажатия полоза неподвижного токоприёмника на контактный провод. Статическое нажатие создаётся рабочими (подъёмными) пружинами, на его значение влияют силы трения в шарнирах подвижной системы при движении полоза вниз;

– Проверка времени подъёма и опускания – измерение времени от момента начала вертикального движения полозов вверх из опущенного положения токоприёмника до момента их достижения максимальной рабочей высоты. При отклонении параметра от нормы необходимо отрегулировать время подъёма и опускания;

– Проверка ресурса пневматического привода – испытания на стенде, где токоприёмник совершает подъёмы и опускания в пределах всего рабочего диапазона.

Необходимо разработать стенд для настройки, испытания и ремонта токоприемников электровозов, всех типов, используемых в России, такие как ЧС 200, ЧС2, ЧС 7, ТАсС 16, 6ТС.

Методика проверки токоприемников

Для проверки пневмопривода токоприёмников используют:

– Автоматизированные стенды – для определения статической характеристики токоприёмника, где токоприёмник устанавливают на испытательный стол, подключают пневмомагистраль и подают сжатый воздух.

– Стенд для ресурсных испытаний – в пневмосистему подъёма токоприёмника подают рабочее давление воздуха, и токоприёмник совершает подъёмы и опускания в

автоматическом режиме. Число циклов работы пневматического привода определяют с помощью счётчика импульсов, подключённого к концевому выключателю, расположенному на минимальной рабочей высоте.

Согласно ГОСТ 32204-2013 [2] общие требования к методам испытаний:

1. Испытуемый токоприемник должен быть установлен в помещении с температурой от 15 до 30 °С и влажностью окружающего воздуха не более 95% на неподвижном горизонтальном основании.

2. Значение параметров срабатывания и снятие характеристик токоприемника следует контролировать по результатам не менее трех измерений. Полученные данные всех измерений усредняют и округляют в соответствии с точностью измерений.

Кинематическая схема снятия статических характеристик представлена на рис. 1.

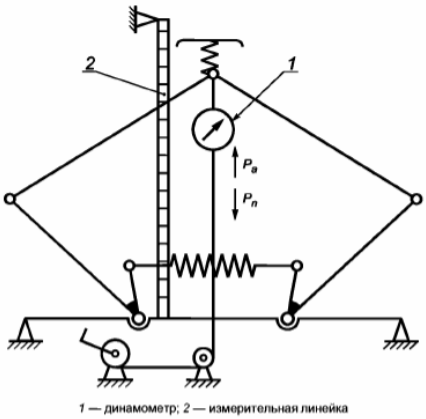


Рис. 1. Кинематическая схема снятие статических характеристик [2]

Характеристик должны быть в определённых границах: активное нажатие (подъём): 60–90 Н, пассивное нажатие (опускание): 100–130 Н.

Кинематическая схема для определения поперечной жесткости представлена на рис. 2.

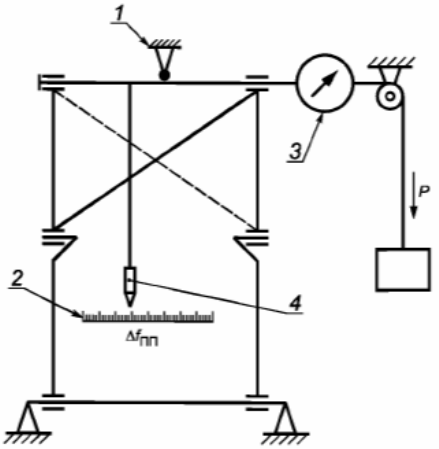


Рис. 2. Кинематическая схема для определения поперечной жесткости [2]

Горизонтально смещение отвеса (4) не должно превышать 0,5 мм.

При обрыве линии подачи тока, должно срабатывать устройство аварийного опускания.

Пневмопривод токоприемника должен поднимать полоз на определенную высоту, при определенном давлении и за точный промежуток времени.

Таким образом, необходимо разработать универсальный стенд для настройки, испытания и ремонта токоприемников 5-ти типов, имеющих разные характеристики подъема, усилия подъема, габаритные размеры.

Анализ требуемой конструкции

Необходимо разработать стенд такой конструкции, чтобы была возможность надежного закрепления 5 видов токоприемников разных габаритов на столе.

Каждый из токоприемников имеет разные габаритные и присоединительные размеры, а также разные высоты подъема полоза. Необходимо разработать стол для установки таким образом, что бы центр симметрии полоза у всех токоприемников находился в одном месте. На рис. 3 представлены присоединительные размеры и центры симметрии полоза токоприемников.

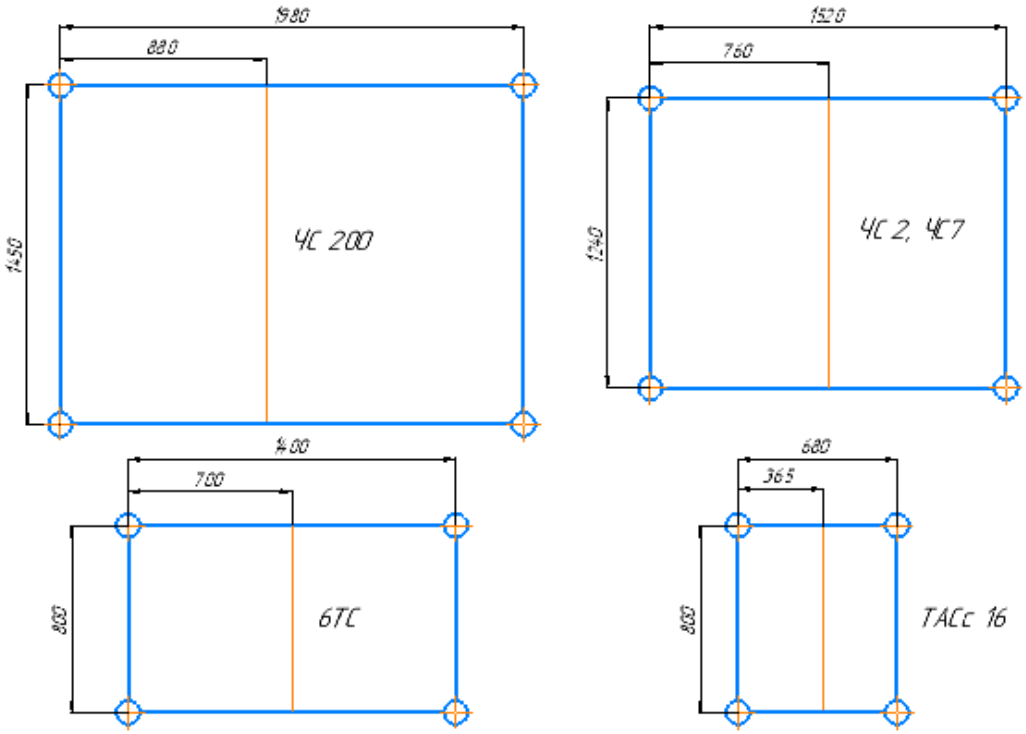


Рис. 3. Присоединительные размеры токоприемников

Требуется спроектировать стойку, в которую будет упираться полоз токоприемника, симулирующего контактный провод. Стойка должна иметь поворотный механизм, для установки на столе токоприемника краном. Каждый токоприемник имеет разные значения подъема полоза (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики подъема полоза

Токоприемник	Максимальная высота подъема полоза, мм
ЧС-200	2460
ЧС-2	2470
ЧС-7	2260
6ТС	2260
ТАСс 16	2520

Минимальная высота полоза 1800 мм, исходя из данных параметров, нужно обеспечить подъем крюка стойки от 1800 до 2600 мм, с гарантированным запасом.

Получившаяся конструкция

Исходя из данных параметров, был разработан стол, позволяющий установить все типы токоприемников так, что бы центр симметрии полоза находился у всех токоприемников в одном месте (рис. 4).

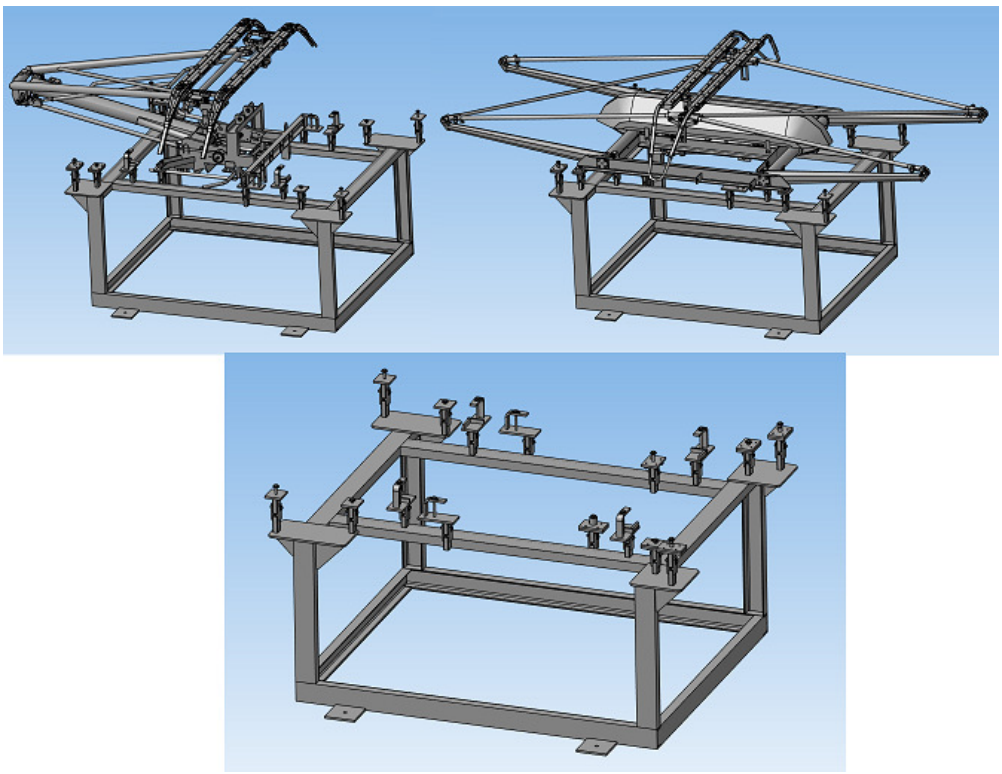


Рис. 4. Конструкция стола

Разработана конструкция стойки (рис. 5), состоящая из каркаса (сваренного из профильной трубы) и узла подъема с поворотом.

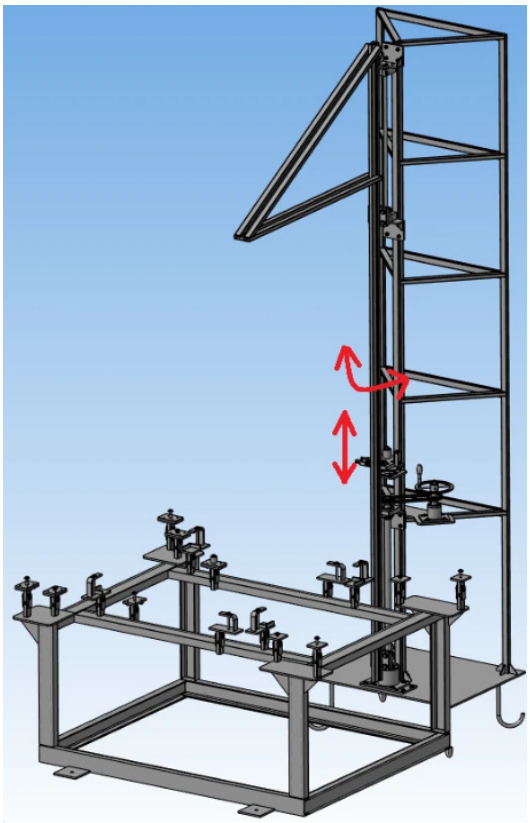


Рис. 5. Конструкция стойки

Функцию подъема в данной конструкции выполняет винт, который закреплен неподвижно, но за счет подшипников может вращаться (рис. 6), к крюку неподвижно закреплена опора, с нарезанной резьбой, за счет вращения винта происходит подъем. Для вращения винта будет установлен мотор-редуктор NMRV30 [3] (рис. 7). Вращение винту будет передаваться через зубчатую передачу соединению приводной цепью ПР-15.875-23.

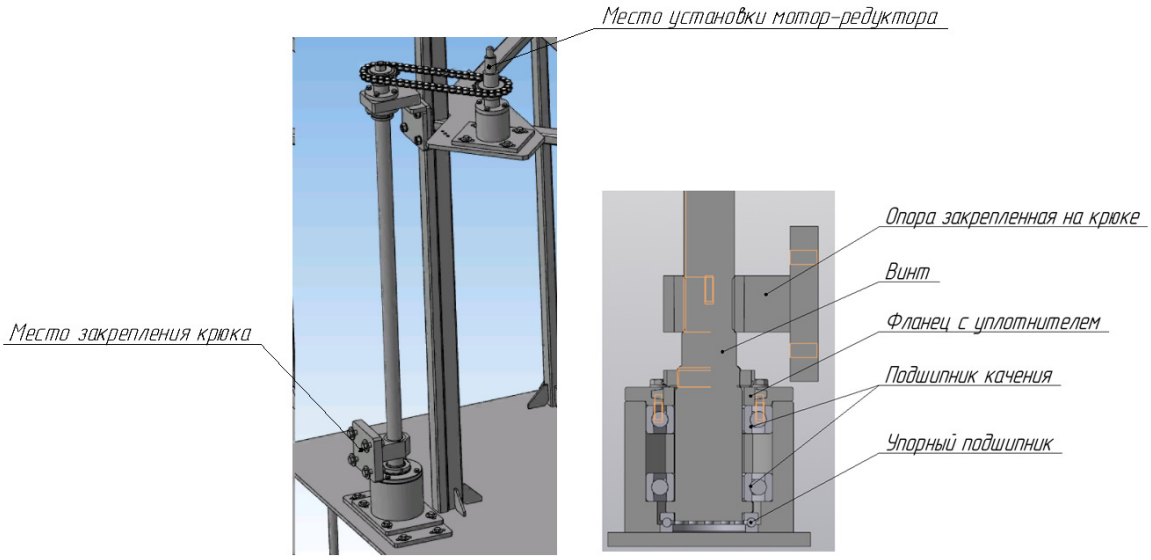


Рис. 6. Конструкция винта

Рис. 7. NMRV50 [3]

В целях безопасности рабочего необходимо разместить кожух, закрывающий приводную цепь (рис. 8).

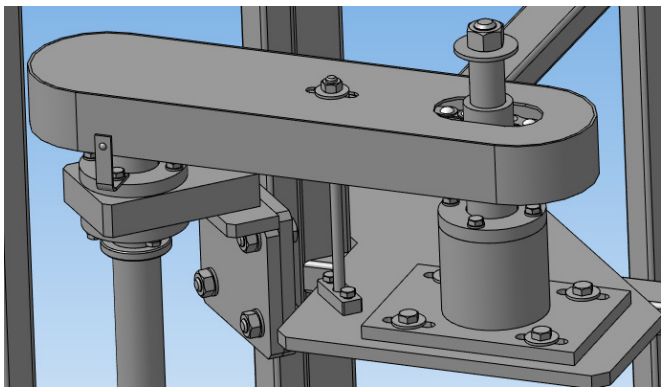


Рис. 8. Кожух

На рис. 9 представлен общий вид конструкции стенда.

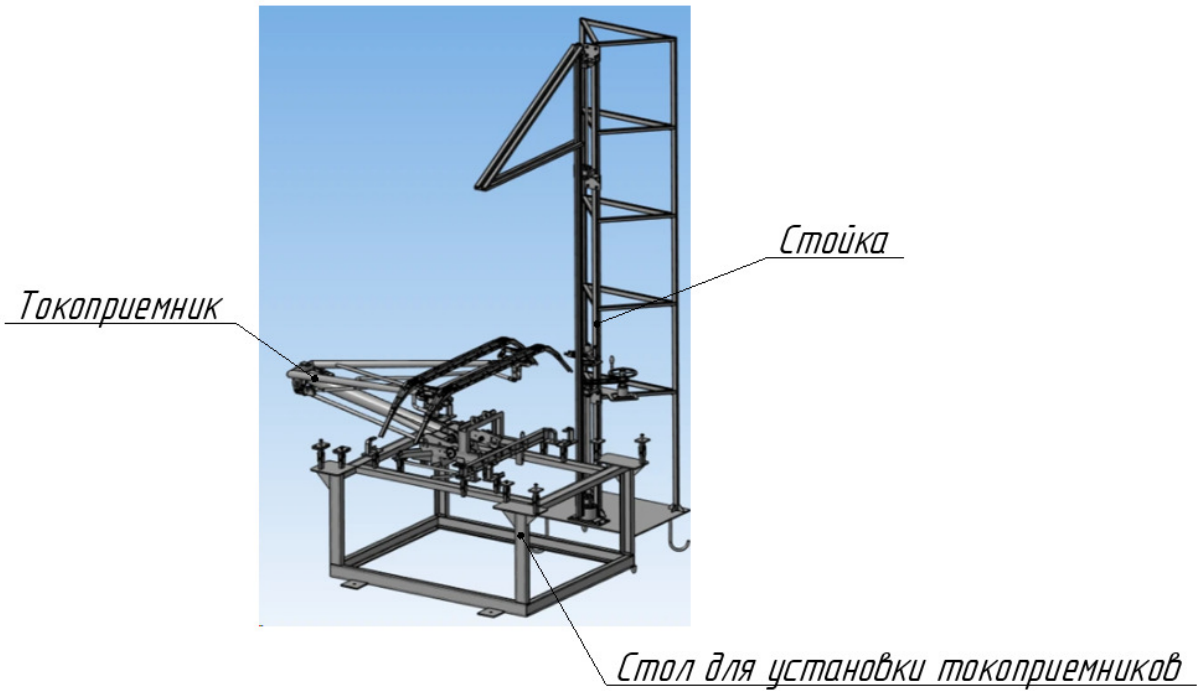


Рис. 9. Общий вид стенда

Из данной конструкции нам необходимо рассчитать коэффициент запаса прочности и суммарное линейное перемещение на конце крюка, где будет установлен трос, для этого воспользуемся встроенным CAM модулем APMFEM [4].

Суммарное линейное перемещение на конце крюка не должно превышать 2 мм. Коэффициент запаса прочности должен быть не менее 7. Схема нагружения показана на рис. 10.

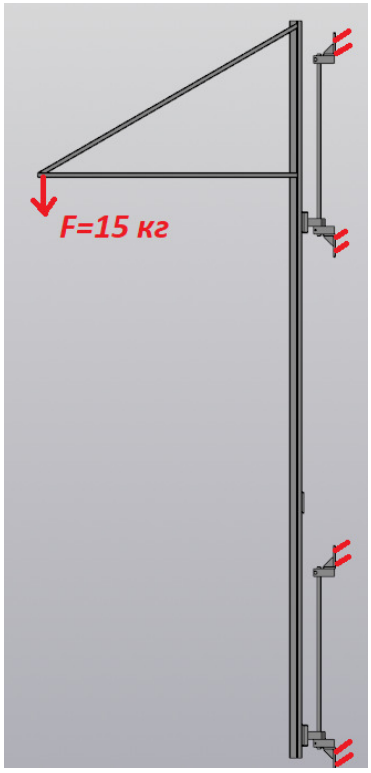


Рис. 10. Схема нагружения модели

В результате расчета был получен коэффициент запаса равный 11,04 (рис. 11) и суммарное линейное перемещение ровное 3,807 мм (рис. 12). Полученные данные не удовлетворяют требование к конструкции. Изменим конструкции, усилив стойки и добавив ещё 1 горизонтальную трубу на расстоянии 150 мм и вертикальные распорки, расположенные через 500 мм (рис. 13).

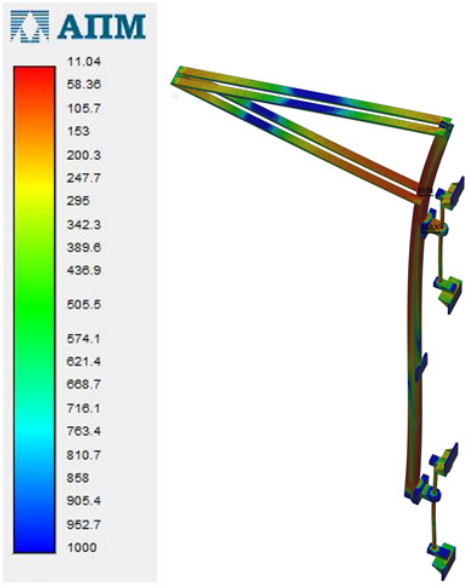


Рис. 11. Коэффициент запаса прочности

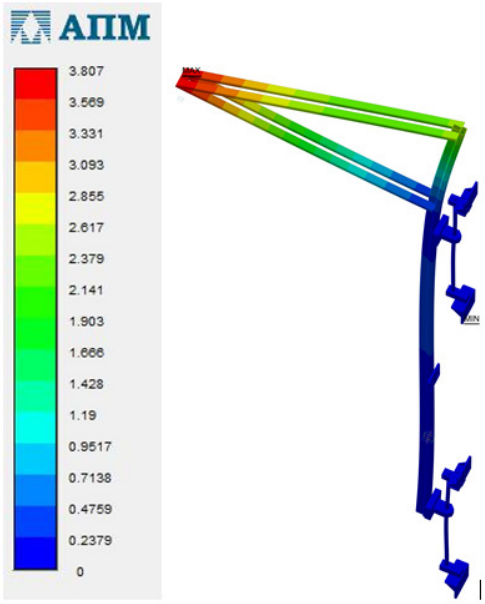


Рис. 12. Суммарное линейное перемещение

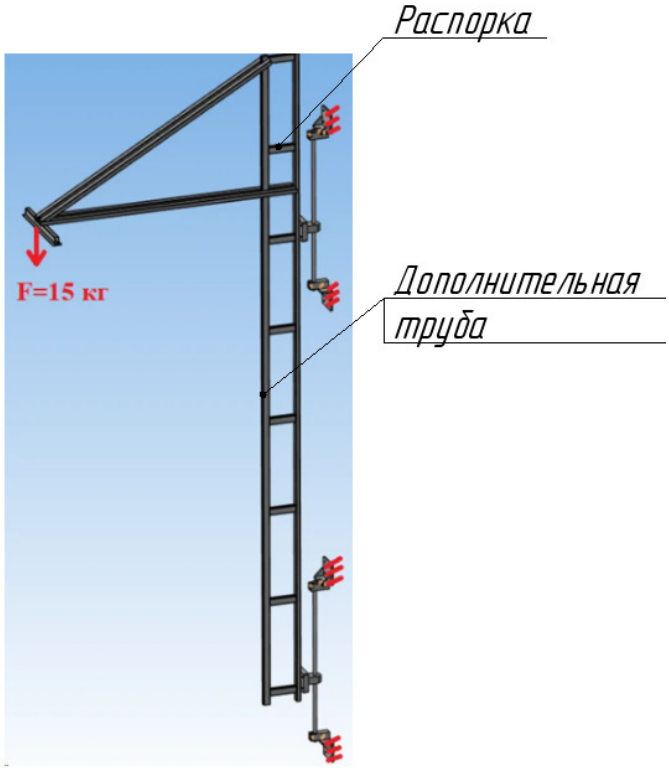


Рис. 13. Измененная конструкция

В результате расчета новой конструкции коэффициент запаса прочности получился равный 22,89 (рис. 14), а суммарное линейное перемещение равное 1,252 мм (рис. 15), что удовлетворяет требованиям.

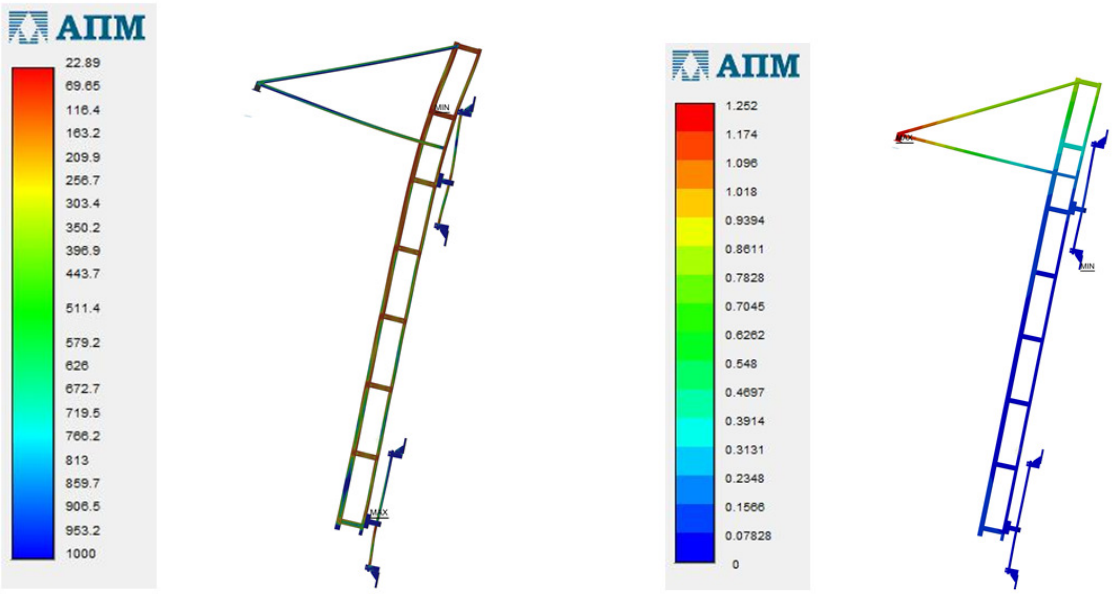


Рис. 14. Коэффициент запаса прочности **Рис. 15. Суммарное линейное перемещение**

Для испытания пневмопривода токоприемника нам необходимо разместить оборудование для подачи сжатого воздуха, в зависимости от вида токоприемника нам нужно подавать в цилиндр разное давление, от 4 до 9 атмосфер. Так же необходимо разместить приборы для измерения силы растяжения.

Сжатый воздух будет поступать из компрессора, проходить через фильтр-регулятор EW-4000-04 [5], который представляет собой комбинацию двух устройств в одном корпусе, фильтра и регулятора давления, что позволит сэкономить рабочее пространство. Далее воздух попадает в пнемомодуль ПМ-01-05, снятый с локомотива, для которого испытывают токоприемник. После подачи сжатого воздуха с определенным давлением в пневмоцилиндр, полоз токоприемника должен подняться на определенную высоту, за отведенный участок времени.

Для снятия статических характеристик установлен динамометр ДПУ-0,02-2 с червячным редуктором и электродвигателем. Для бесперебойной работы установлен частотный преобразователь.

На рис. 16 представлено оборудование для испытания токоприемника.

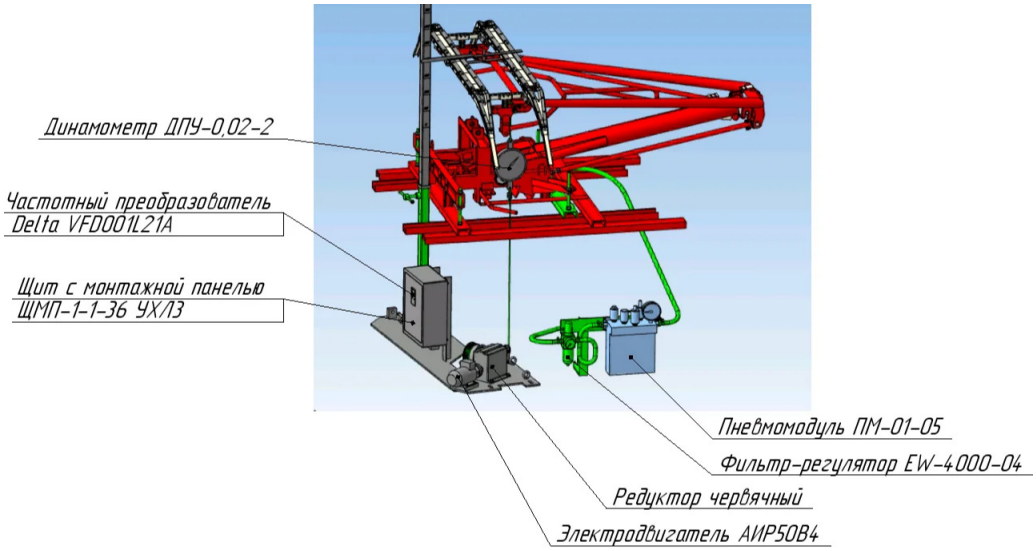


Рис. 16. Оборудование для испытания токоприемника

Таким образом, в ходе работы был разработан универсальный стенд для настройки, испытания и ремонта токоприемников, позволяющий испытывать 5 видов токоприемников. Смоделирована конструкция стола и стойки, рассчитана на прочность конструкция крюка, подобрано оборудование для испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Токоприемник ассиметричный. Руководство по эксплуатации. – URL: https://rcit.su/techinfoX80.html (дата обращения: 05.01.2026)

2) ГОСТ 32204-2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. – URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1766255191&tld=ru&lang=ru&name=4293773142.pdf&text=гост%20испытания%20токоприемников& (дата обращения: 10.02.2026)

3) Редукторы и мотор-редукторы. Европривод. Каталог товаров. – URL: https://evroprivod.ru/catalogue/nmrv_drv/descriptions (дата обращения: 10.02.2026)

4) Руководство пользователя APMFEM. – URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1775491622&tld=ru&lang=ru&name=APM-FEM-2022.pdf& (дата обращения: 04.04.2026)

5) Пневматическое, гидравлическое, смазочное и фильтрующее оборудование. Каталог товаров. – URL: https://pnevmocilindr.ru/filtr-regulyator-ew-4000-04?ysclid=mnpsrzo0gx551616529

УДК 62-752.2

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ОСЦИЛЛЯТОРНОГО КАТКА

А.И. Тюремнов, Д.Н. Тихонов

Научный руководитель – **И.С. Тюремнов**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Представлены описание экспериментального стенда, методика и результаты определения резонансной частоты колебаний виброизоляторов осцилляторного катка. Рассмотрены особенности определения колеблющейся массы и статического момента вибровозбудителя колебаний на характер колебаний и результаты определения их резонансной частоты.

Ключевые слова: *каток осцилляторный, осцилляция, виброизоляторы, характеристики виброизоляторов, колебания вынужденные, частота резонансная*

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF OSCILLATING TROLLEY VIBROISOLATORS

A.I. Tyuremnov, D.N. Tikhonov

Scientific Supervisor – **I.S. Tyuremnov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The paper presents a description of the experimental stand, the methodology, and the results of determining the resonant frequency of the vibration isolators of the oscillating roller. The paper discusses the features of determining the oscillating mass and the static moment of the vibration exciter on the nature of the oscillations and the results of determining their resonant frequency.

Keywords: *oscillating roller, oscillation, vibration isolators, characteristics of vibration isolators, forced oscillations, resonant frequency*

Вибрационные катки – это спецтехника, применяемая для уплотнения грунта, асфальта и других материалов за счёт двух факторов: веса и вибрации. Такое взаимодействие способствует повышению плотности, прочности и продлению срока службы готового покрытия. Повышение эффективности уплотнения дорожных покрытий является одной из ключевых задач современного дорожного строительства. В последнее время значительное распространение получили осцилляторные катки, принцип действия которых основан на создании крутильных колебаний вальца относительно горизонтальной оси. По сравнению с традиционными вибрационными машинами, осцилляторные обеспечивают меньшую пористость асфальтобетонной смеси и снижают динамические нагрузки на близко расположенные сооружения и подземные коммуникации. Отличия в конструкции вальцов, реализующих круговые и осцилляторные колебания, показаны на рис. 1.

Осцилляторные катки не производятся в России, и в связи со сложностями закупки зарубежной техники возникает необходимость разработки отечественных машин.

На работу осцилляторного катка большое влияние оказывают характеристики виброизоляторов, информация по которым в технических характеристиках катков не приводится. В статье [2] приведены суммарные значения коэффициентов жёсткости c и вязкости b для виброизоляторов осцилляторного катка HAMMHD+90VO ($c = 4 \cdot 10^6$ Н/м, $b = 3 \cdot 10^3$ Н·с/м.). Однако не указано является ли значение жесткости динамическим или статическим. Поэтому целью исследования стало определение динамических характеристик виброизоляторов HAMM модели 01487116.

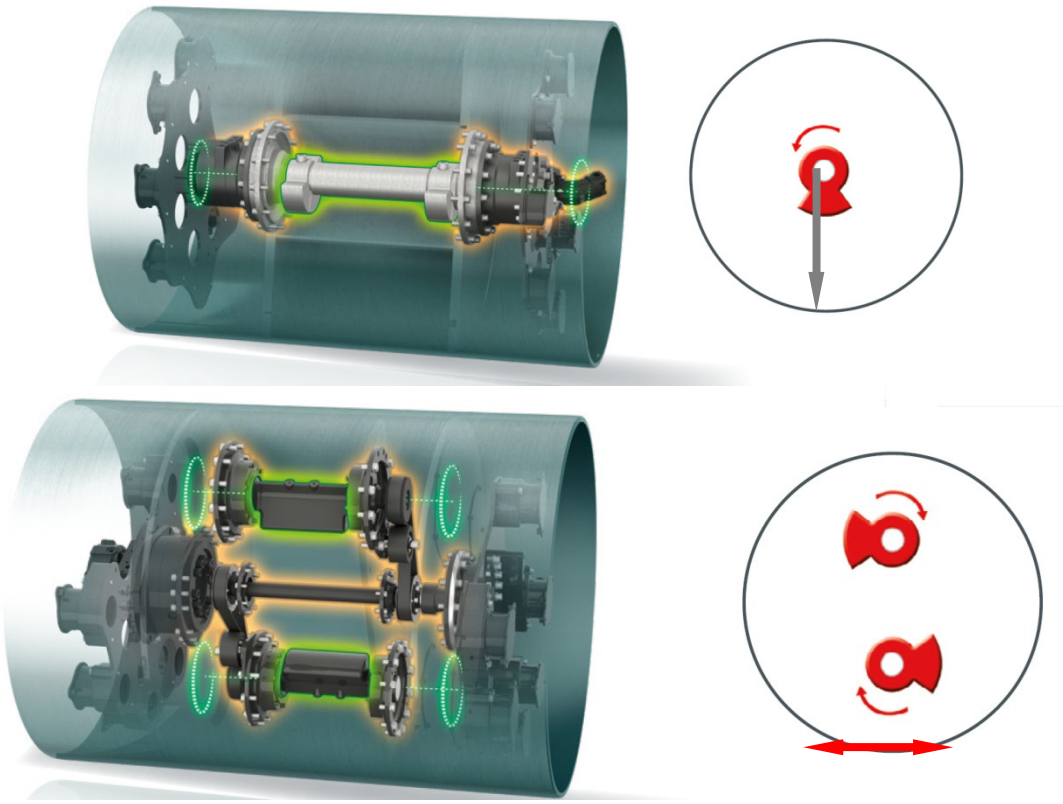


Рис. 1. Конструкция вальцов с круговыми (верхнее изображение) и осциллирующими (нижнее изображение) колебаниями [1]

Исследования проводились на экспериментальном стенде (рисунок 2), позволяющем реализовать затухающие и вынужденные колебания [3].

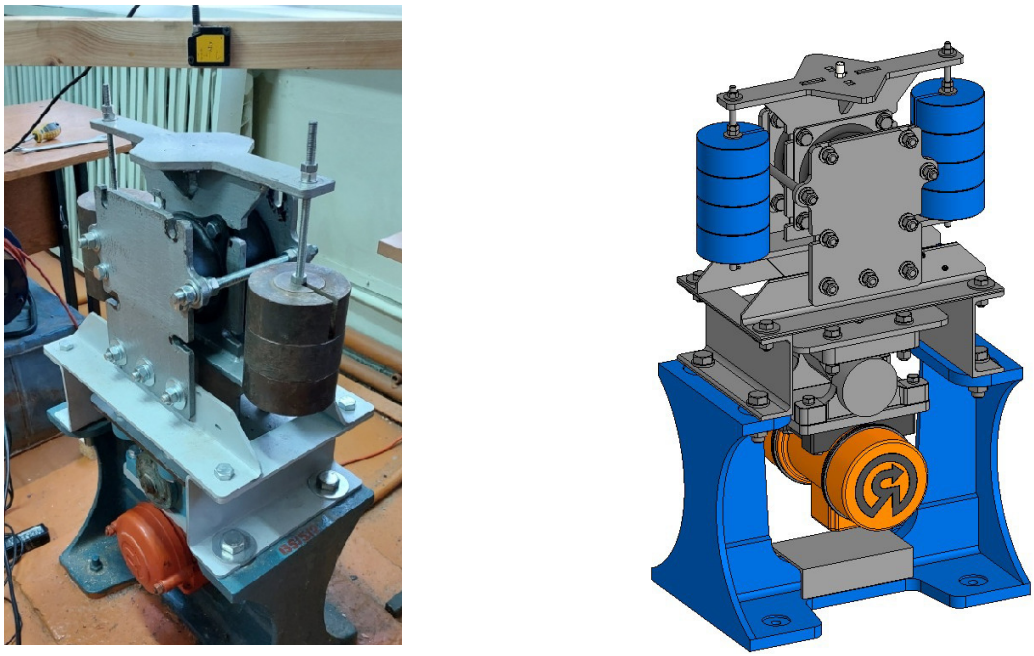


Рис. 2. Экспериментальный стенд для испытания виброизоляторов с использованием вынужденных колебаний

Конструкция стенда обеспечивает испытания виброизоляторов при чистом сдвиге, без поперечных колебаний.

Амплитуда колебаний измерялась лазерным датчиком перемещения BAUMEROADM 13U6480/S35A, показания которого регистрировались анализатором спектра ZET 017-U8 для следующей обработки. Частота колебаний задавалась частотным преобразователем РУСЭЛКОМ RI100-004G-4 и контролировалась по показаниям датчика перемещения (посредством разложения сигнала датчика перемещения в спектр). Стенд предусматривает возможность добавления дополнительных грузов, а также изменение вынуждающей силы посредством разведения или сведения дебалансов вибровозбудителя. Благодаря шарниру, гасящему поперечные колебания, на испытываемые виброизоляторы передается только вертикальная вынуждающая сила вибровозбудителя (модели ИВ-99Б У2).

Испытания проводились с различными значениями колеблющейся массы и вынуждающей силы (определяемой статическим моментом дебалансов вибровозбудителя). Сначала проводились испытания при среднем(из трёх возможных) значении статического момента вибровозбудителя. При испытаниях с дополнительными грузами 24 кг, на частотах, близких к резонансным, наблюдались биения, затрудняющие определение резонансной амплитуды и частоты колебаний (рис. 3).

Например, при уменьшении колеблющихся масс шарнир переставал справляться с гашением горизонтальной составляющей круговой вынуждающей силы, и установка начинала совершать горизонтальные колебания, затрудняющие проведение измерений. После перебора вариантов с разными массами и статическими моментами дебалансов вибровозбудителя, были подобраны условия проведения испытаний, обеспечивающие достаточно высокую амплитуду резонансных колебаний при отсутствии биений (рис. 4).

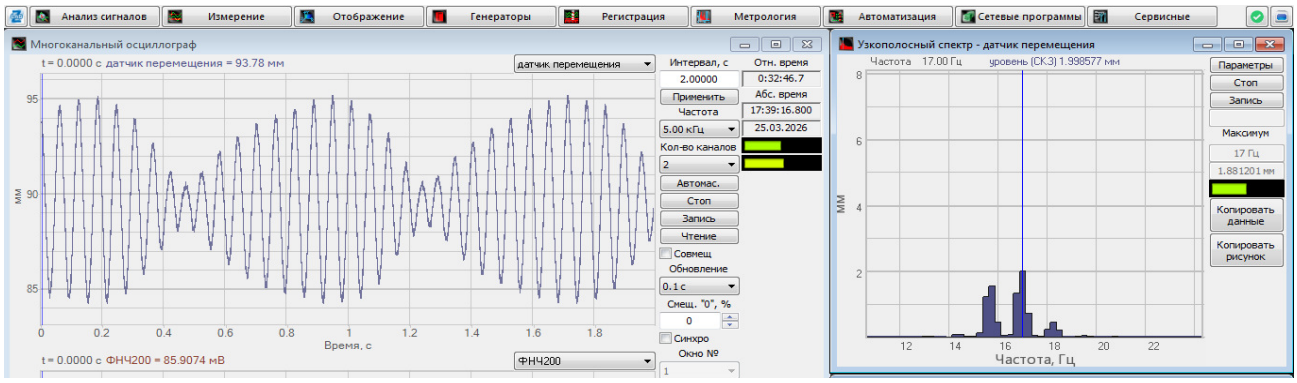


Рис. 3. Биения при испытаниях с дополнительными грузами 24 кг при среднем значении статического момента вибровозбудителя

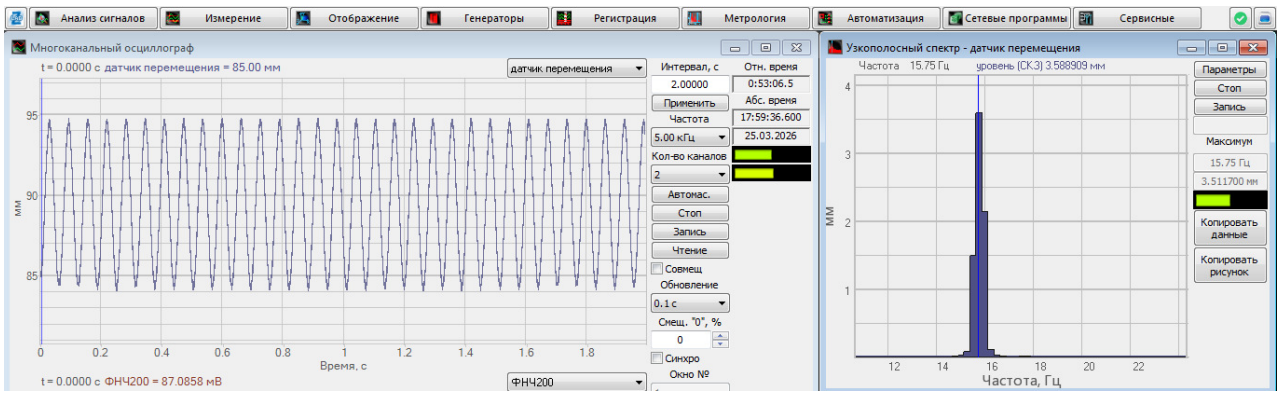


Рис. 4. Характерная осциллограмма колебаний

После проведения испытаний проводился расчёт резонансной частоты виброизоляторов по зависимостям [4]:

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2h^2}, \quad (1)$$

где ω_0 – угловая скорость собственных колебаний, рад/с; h - коэффициент демпфирования Н·с/(м·кг).

Значение ω_0 может быть определено [4]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (2)$$

где c – динамическая жесткость виброизоляторов, Н/м; m - колеблющаяся масса, кг.

Коэффициент демпфирования [4]:

$$h = b/(2m), \quad (3)$$

где b – коэффициент вязкого сопротивления виброизоляторов, Н·с/м.

В результате испытаний значение резонансной частоты виброизоляторов HAMM модели 01487116 составило 15,75 Гц, что близко к рассчитанной (по зависимостям (1) и (2)) резонансной частоте, равной 15,7 Гц. Следовательно, значения жесткости, указанные в статье [2], являются значениями динамической жесткости виброизоляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Intelligent compaction. OSCILLATION / HAMM AG 2024 – No. 913553 EN-02/24 – V3. – URL: https://www.wirtgen-group.com/ (дата обращения: 08.04.2026)

2) Paulmichl, I., Adam, C. & Adam, D. Analytical modeling of the stick-slip motion of an oscillation drum // Acta Mech. – 2019. – Vol. 230. – P. 3103–3126. – https://doi.org/10.1007/s00707-019-02454-3.

3) Методы экспериментального определения значений коэффициента вязкого сопротивления амортизаторов вальца вибрационных катков / А.И. Тюремнов, Д.Н. Тихонов, Д.А. Шорохов, И.С. Тюремнов // Семьдесят седьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. 17-18 апреля 2024 г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 1. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2024. – С. 681-685 – 1 CD-ROM.

4) Бауман, В.А. Вибрационный машины и процессы в строительстве: Учебное пособие для студентов строительных и автомобильно-дорожных вузов / В.А. Бауман, И.И. Быховский. – М., Высшая школа, 1977. – 255 с.

УДК 621.86

ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НАГРУЗКИ К ИЗМЕНЕНИЮ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРАНА МОСТОВОГО ТИПА

А.В. Федотов

Научный руководитель – **С.Д. Иванов**, канд. техн. наук, доцент

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Оценено отклонение нагрузки, воспринимаемой тензометрическим датчиком нагрузки механизма подъема крана мостового типа, от внешних факторов: компоновки, раскачки груза на гибком подвесе, массы грузового каната. Приведены количественные зависимости нагрузки, воспринимаемой датчиком, от параметров системы. Результаты позволяют повысить качество информации, регистрируемой датчиком нагрузки для ее использования приборами безопасности крана.

Ключевые слова: *мостовой кран, тензометрический датчик, датчик силы*

ASSESSMENT OF STRAIN GAUGE LOAD CELLSENSIVITY TO VARIATIONS IN THE STRUCTURAL DESIGN PARAMETERS OF AN OVERHEAD CRANE

A.V. Fedotov

Scientific Supervisor – **S.D. Ivanov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

The deviation of the load perceived by the strain gauge sensor of an overhead crane hoisting mechanism from external factors, such as layout, load fluctuations on a flexible suspension, and the weight of the hoisting wire rope, has been assessed. Quantitative relationships between the load sensed by the strain gauge load cell and the system parameters are established. The findings enable to enhance the quality of the information recorded by the load sensor for use in crane safety devices.

Keywords: *overhead crane, strain gauge load cell, force sensor*

Эффективность и безопасность работы современных грузоподъемных кранов связана с внедрением перспективных способов управления и повышением степени автоматизации. Качество работы приборов безопасности, являющихся неотъемлемой частью современных кранов, определяется качеством получаемой ими первичной информации [1]. Основным источником первичной информации для ограничителя грузоподъемности и регистратора параметров работы кранов мостового типа является тензометрический датчик силы, определяющий уровень нагрузки на кран. Сигнал датчика, содержащий ошибку, приводит к нарушению работы механизма подъема: запрету подъема номинального груза или недопустимой перегрузке. Другим следствием является определение нагрузки регистратором параметров с отклонением от фактического значения.

Работы кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана содержат данные о разработке и сравнении программного обеспечения ограничителей грузоподъемности [2, 3], оценку влияния отклонений внутренних параметров тензометрического датчика силы на его выходной сигнал [4-6]. Но нагрузка, преобразуемая датчиком в сигнал, может иметь отклонения, вызванные внешними факторами (рис. 1), которые связаны с конструкцией механизма или условиями работы крана: компоновкой механизма подъема, колебаниями груза на гибком подвесе, массой грузового каната. В

работе дана количественная оценка влияния указанных факторов на воспринимаемую датчиком силы нагрузку.

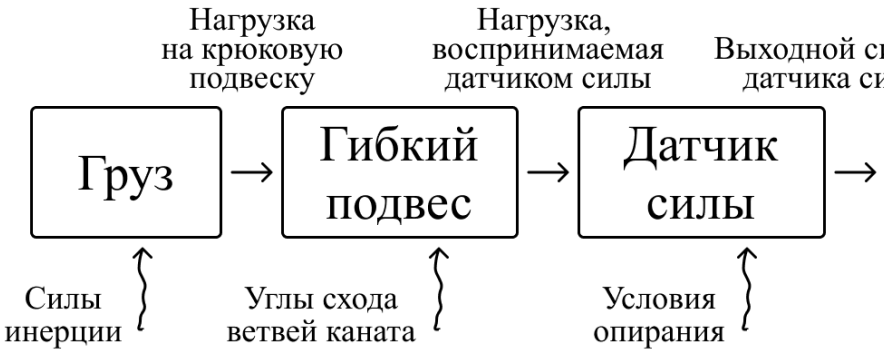


Рис. 1. Преобразование информации в системе

Конструкция гибкого подвеса кранов мостового типа позволяет использовать для анализа простые геометрические расчетные схемы. За основу для анализа взята конструкция сдвоенного полиспаста механизма подъема грузовой тележки Worldhoists K3 (рис. 2, *а*), в которой датчик силы совмещен с осью уравнительного блока (рис. 2, *б*). При анализе не учтены динамические факторы, обусловленные податливостью системы и зазором в механизме.

а *б* *в*

Рис. 2. Пример анализируемого механизма подъема:
а – конструкция грузовой тележки; *б* – схема установки датчика силы;
в – расчетная схема с основными размерами

Компоновочная схема механизма подъема влияет на величину силы, воспринимаемой датчиком силы, F_i (рис. 2, *в*) в результате изменения угла α в ходе подъема. Относительное отклонение ΔF_iзначения силы, учитывающей влияние компоновочной схемы, F_i от значения силы, не учитывающего его, F_0 :

$$\Delta F_i(H) = \frac{F_i(H) - F_0}{F_0} = F_0\left(\frac{1}{\cos\alpha\,(H)} - 1\right), i = 1,2,3,\# \qquad (1)$$

где H – высотная координата подвески. При варьировании компоновочных размеров зависимость $\Delta F_i(H)$ будет меняться. Зависимости $\Delta F_i(H)$ выведены (рис. 3) для трех случаев компоновки (см. рис. 2, *в*): $\Delta F_1(H)$для тележки с минимально допустимыми нормативной документацией диаметрами канатных блоков d_1 и d_2; $\Delta F_2(H)$ – с блоками стандартной конструкции, подобранными по расчету несущей способности подшипников; $\Delta F_3(H)$ – при V-образной запасовке каната ($b = 0{,}45$ м для $F_1(H)$ и $F_2(H)$, $b = 1$ м для $F_3(H)$).

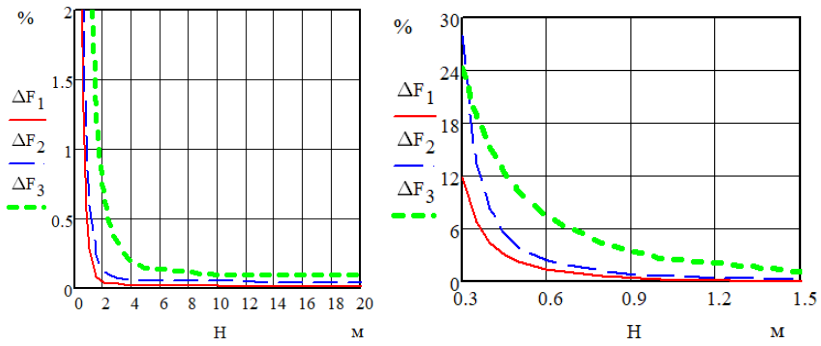


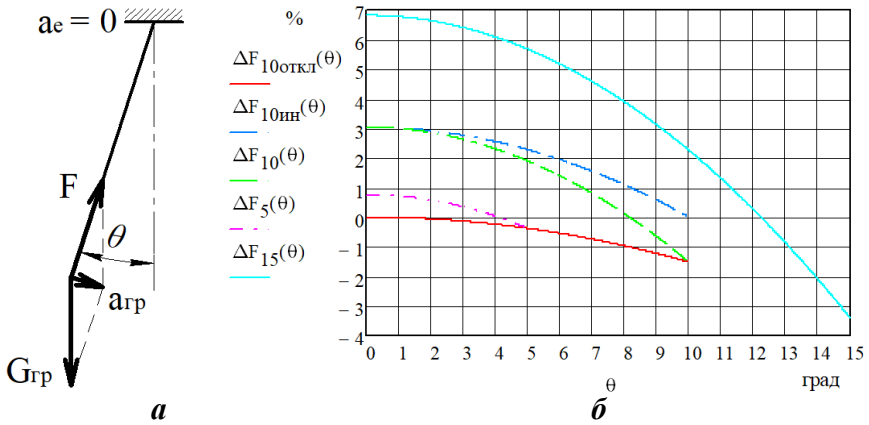
Рис. 3. Влияние компоновки на силу, воспринимаемую датчиком силы

Зависимости $\Delta F_i(H)$ имеют гиперболический характер при подъеме в крайнее верхнее положение: $\Delta F_3(0{,}5) = 10\%$ для компоновки с разнесенными друг от друга барабаном и уравнительным блоком. Варьированием размеров компоновки можно снизить $\Delta F_i(H)$ до 2-4% и ниже при условии $b \approx d_1 + D$, то есть наиболее вертикальном положении ветвей каната.

При свободном колебании (раскачке) груза силы инерции изменяют значение нагрузки в канате. Зависимость относительного силы при раскачивании груза на гибком подвесе от угла отклонения θ (рис. 4) может быть записана как

$$\Delta F_j(\theta) = 3 \text{ ?s}(\theta) - 2 \text{ ?s}(\theta_{max}) - 1, \theta = 0 \ldots \theta_{max}, \# \qquad (2)$$

где θ_{max} – амплитуда колебаний. При движении тележки без ускорения отклонение $\Delta F_{10}(H)$ периодически меняется от +3% до -1,5% с увеличением θ при амплитуде $\theta_{max} = 10°$, от +0,8% до -0,4% при $\theta_{max} = 5°$ ($\Delta F_5(H)$) и от +6,8% до -3,4% при $\theta_{max} = 15°$ ($\Delta F_{15}(H)$). На рис. 4 показаны составляющие отклонения ΔF_{10}, обусловленные отклонением ветвей канатов от положения равновесия $\Delta F_{10\text{откл}}$ и силами инерции $\Delta F_{10\text{ин}}$. Периодическое изменение нагрузки требует применения учитывающих этот фактор алгоритмов обработки сигнала или снижения амплитуды их колебаний управляющим воздействием.



а *б*

Рис. 4. Влияние раскачки груза на силу, воспринимаемую датчиком силы:
а – расчетная схема; *б* – зависимость (2)

Дополнительная сила от веса грузового каната, воспринимаемая датчиком, практически линейно зависит от высоты подъема. Допускаемый по разрывному усилию типоразмер каната, следовательно, и его погонная масса, определяются интенсивностью работы механизма подъема: сила возрастает при опускании подвески (см. рис. 2, *в*) на 0,4% для группы классификации режима работы М5 и на 0,6% для группы М8 каждые 10 метров (рис. 5). Фактор влияет на сохраняемые регистратором параметров данные, искажая их при больших высотах подъема.

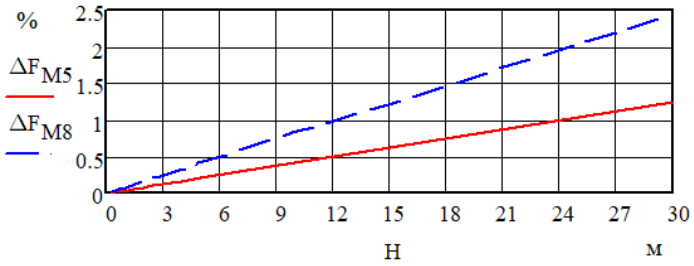


Рис. 5. Влияние веса каната на силу, воспринимаемую датчиком силы

При модернизации крана сигнал датчика нагрузки целесообразно корректировать программной обработкой, но наиболее полный учет потребует информации от дополнительных датчиков. При проектировании механизмов и системы управления часть факторов может быть снижена конструктивными мерами и функциями системы управления. При совместном действии рассмотренных факторов диапазон изменения усилия, воспринимаемого датчиком в цикле работы крана, можно снизить с ≈ +13…-3% до ≈ +2…0 %.

Учет рассмотренных факторов целесообразен не всегда. Так, учет массы каната (см. рис. 5) целесообразен при большой высоте подъема или массивных канатах (козловые краны, краны с интенсивным режимом работы механизма подъема); учет углов схода каната (см. рис. 3) – при *V*(*W*)-образной запасовке каната, при приближении подвески к верхнему положению; учет раскачки груза (см. рис. 4) – при сильных ускорениях механизмов передвижения (перегружатели).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообрабатывающих предприятий / Н.Ю. Иванова, С.Д. Иванов, С.А. Надеженков, А.Н. Назаров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2023. – № 2. – С. 81-96. – EDN MRGIFW.

2) Назаров, А.Н. Использование алгоритма весоизмерения на основе фильтра скользящего среднего в регистраторе параметров работы мостового крана / А.Н. Назаров, С.Д. Иванов // Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ", 2023. – № 20(4). – С.418-431. – EDN: CBIJMP.

3) Fedotov, A.V. Experimental verification of the load limiter operation for overhead cranes / A.V. Fedotov. – DOI: 10.34660/conf.2025.47.68.033 // Proceedings of the International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» (Beijing, PRC, December 30, 2025). – Beijing, China: Scientific publishing house Infinity, 2025. – P. 173-179.

4) Егоров, Г.Р. Влияние погрешности позиционирования тензорезистора на чувствительность датчика нагрузки в канате / Г.Р. Егоров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2025. – № 2. – С. 15-30.

5) Рощин, В.А. Совершенствование тензометрической оси для ограничителей грузоподъемности / В.А. Рощин, А.Н. Назаров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2025.– № 3. – С. 1-10.

6) Михалев, А.В. Оценка влияния места наклейки чувствительного элемента тензооси на её эксплуатационные характеристики / А.В. Михалев, А.Н. Назаров, С.Д. Иванов // Семьдесят пятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. 20-21 апреля 2022 г., Ярославль: сб. материалов конф. В. 3 ч. Ч. 1. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2022. – С.489-492.

УДК 62-1/-9:62-111.2:62-791.2:62-97:621.855.25:621.86/.87

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИВОДНЫХ И НАКОПИТЕЛЬНЫХ РОЛИКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ПАЛЛЕТ

Н.А. Фомин, В.П. Хлопков, А.Л. Носко

МГТУ им. Н.Э.Баумана

В статье рассмотрен универсальный экспериментальный стенд для роликовых приводных и накопительных конвейеров для паллет, приведено описание основных элементов стенда, варьируемых параметров: число приводных и неприводных роликов, скорость и ускорение паллет, масса паллет, усилие натяжения цепи, схема запасовки цепи, местоположение привода, частотное или релейное управление.

Ключевые слова: *универсальный экспериментальный стенд, роликовый приводной конвейер, роликовый накопительный конвейер, релейная система управления, частотная система управления, прибор для измерения натяжения цепи*

N.A. Fomin, V.P. Khlopkov, A.L. Nosko

Bauman Moscow State Technical University

The article considers a universal experimental stand for roller drive and storage conveyors for pallets, describes the main elements of the stand, variable parameters: the number of drive and non-drive rollers, pallet speed and acceleration, pallet weight, chain tension force, the path of the chain, drive location, frequency or relay control.

Keywords: *universal experimental stand, roller drive conveyor, roller storage conveyor, relay control system, frequency control system, chain tension measuring device*

Для проведения исследований работы цепных передач роликовых приводных и накопительных конвейеров для паллет на кафедре «Подъемно-транспортные системы и роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана создан универсальный экспериментальный стенд (рис. 1, 2), позволяющий проводить испытания в широком диапазоне основных параметров [3, 4]. Стенд позволяет работать с паллетами массой до 1500 кг и скоростью перемещения паллет в диапазоне от 0,2 до 0,4 м/с.

Основными элементами стенда (см. рис. 1) являются опоры 1, профили 2 и 3, приводные и неприводные ролики 4 стенда. Конструкция стенда предполагает возможность использования каждого ролика в качестве приводного. Для натяжения цепи используются натяжные звёзды 5, которые установлены по краям конвейера. В качестве обводных элементов могут использоваться или звёзды 6, или блоки.

Стенд позволяет проводить испытания с различной схемой запасовки цепи. Это достигается путём перемещения обводных звёзд 6, изменения количества приводных и неприводных роликов 4 и изменением положения привода. Стенд может работать как в приводном, так и в накопительном режимах работы.

Для испытания конвейера в приводном режиме привод располагается либо на приводном ролике, либо на приводном валу. В первом случае привод будет расположен на приводной ветви, а во втором — на холостой ветви цепи 8 конвейера [3].

Для испытания конвейера в накопительном режиме была изготовлена специальная муфта [1], которая позволяет использовать один привод конвейера с индивидуальным подключением на несколько паллетомест и обеспечивает работу конвейера в реверсивном режиме (рис. 3, 4). Это позволяет испытывать различные схемы запасовки цепи в накопительных режимах. При использовании муфты привод размещается под конвейером на холостой ветви цепи (см. рис. 4).

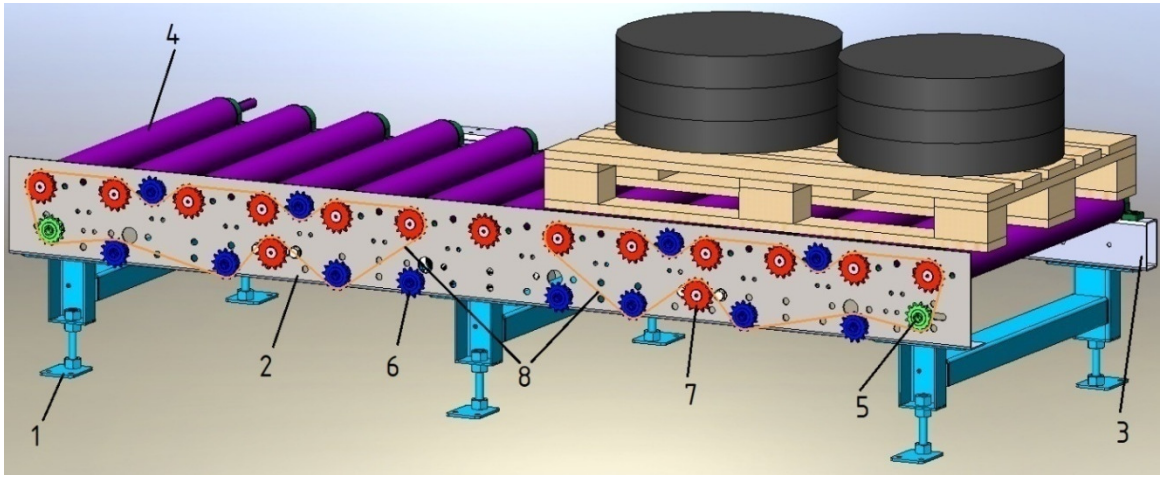


Рис. 1. Общий вид универсального экспериментального стенда
1 – опора; 2,3 – профили стенда; 4 – ролик; 5 – натяжная звезда; 6 – обводная звезда/обводной блок; 7 – приводная звезда/звезда ролика; 8 – цепь

Рис. 2. Общий вид универсального экспериментального стенда

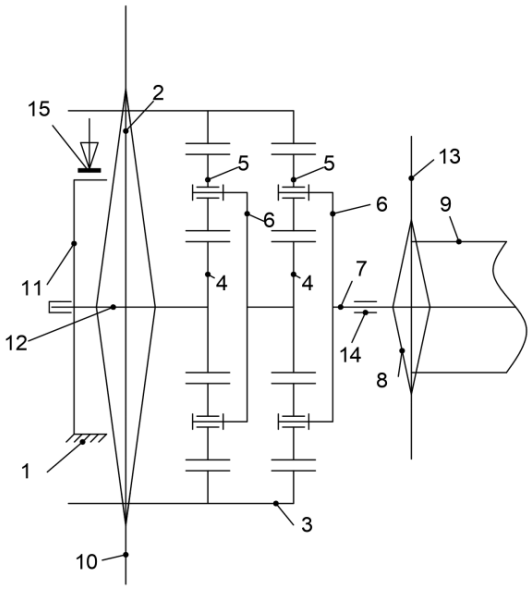


Рис. 3. Схема специальной муфты
1 – крепёжная пластина; 2 – приводная звёздочка; 3 – эпицикл; 4 – солнечное колесо; 5 – сателлит; 6 – водило; 7 – вал приводного ролика; 8 – звёздочка; 9 – приводной ролик; 10 – приводная цепь; 11 – тормозной диск; 12 – вал; 13 – цепь ведомых роликов; 14 – опора вала приводного ролика; 15 – фрикционные накладки

Рис. 4. Общий вид универсального экспериментального стенда с одним приводом и специальными муфтами

Основными элементами специальной муфты являются тормоз, двухступенчатая планетарная передача и приводной ролик. Муфта может работать в двух режимах: двигательном и холостом. В двигательном режиме тормоз замкнут, а механическая энергия передаётся от двигателя через эпицикл 3 и водило 6 к звёздочке приводного ролика 9. В холостом режиме роль тормоза выполняют сопротивления перемещению паллеты с грузом, а энергия передаётся через эпицикл 3 и солнце 4 на тормозной диск 11, который в этом случае вращается вхолостую. Для реверсивного режима работы муфты достаточно задать обратное вращение приводной звёздочке, установленной на эпицикле 3.

Система управления стенда позволяет проводить испытания при частотном и релейном регулировании (рис. 5). При нажатии кнопки запуска реализуется схема «самоподхвата», которая позволяет стенду находиться во включённом состоянии до потери напряжения или до нажатия кнопки аварийного выключения. После чего в ручном режиме выбирается частотное или релейное управление. Выбор происходит при помощи трёхпозиционного ручного переключателя, нейтральное положение которого позволяет не передавать ток на привод, но и не отключать стенд от сети.

Частотное регулирование позволяет испытать влияние динамической нагрузки разгона и торможения паллет разной массы при различных ускорениях и скоростях (до 0,2 м/с).

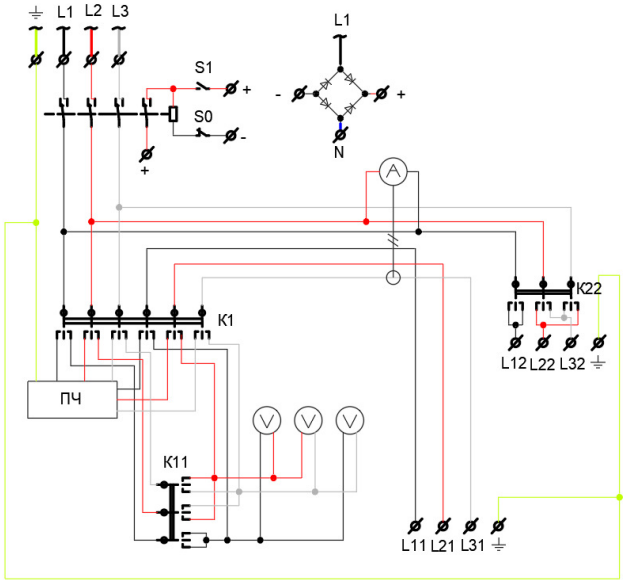


Рис. 5 . Схема управления стенда.

L1 – фаза 1; L2 – фаза 2; L3 – фаза 3; L11 – фаза 1 привода 1; L21 – фаза 2 привода 1; L31 – фаза 3 привода 1; L12 – фаза 1 привода 2; L22 – фаза 2 привода 2; L32 – фаза 3 привода 2; K1 – ручной переключатель выбора частотного и релейного управления; K11 – ручной переключатель реверса привода 1; K22 – ручной переключатель реверса привода 2; ПЧ – преобразователь частоты; S0 – кнопка аварийного отключения; S1 – кнопка запуска

На стенде установлен прибор [2] для измерения натяжения цепи в реальном времени (рис. 6, 7), схемы подключения которого приведены на рис. 8 и рис. 9. Использование прибора позволяет определить характер изменения нагрузки в различных точках запасовки цепи в разные моменты времени [4]. В качестве примера показана схема запасовки из 3-х звёздочек (рис. 10, 11) [2].

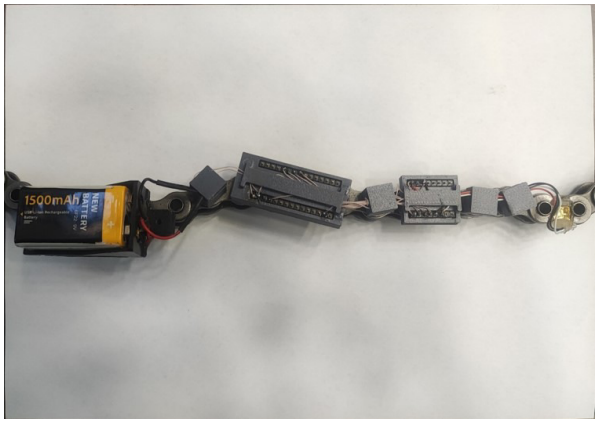


Рис. 6. Прибор для измерения натяжения цепи в реальном времени. Измерительная часть

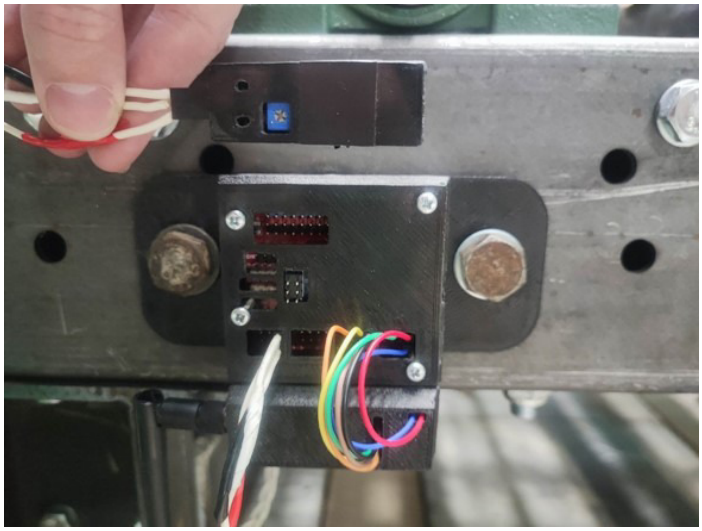


Рис. 7. Прибор для измерения натяжения цепи в реальном времени. Приёмник данных

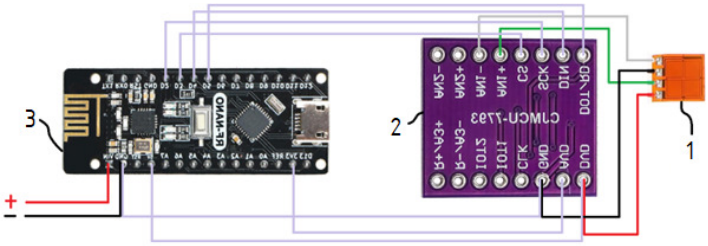


Рис. 8. Схема подключения измерительной части прибора:
1 – тензометрический датчик; 2 – плата первичной обработки сигнала;
3 – радиопередатчик

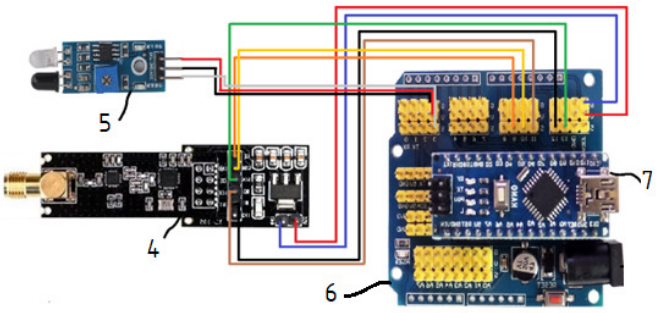


Рис. 9. Схема подключения приёмника данных:
4 – радиоприёмник; 5 – датчик пути; 6 – плата расширения; 7 - ArduinoNano

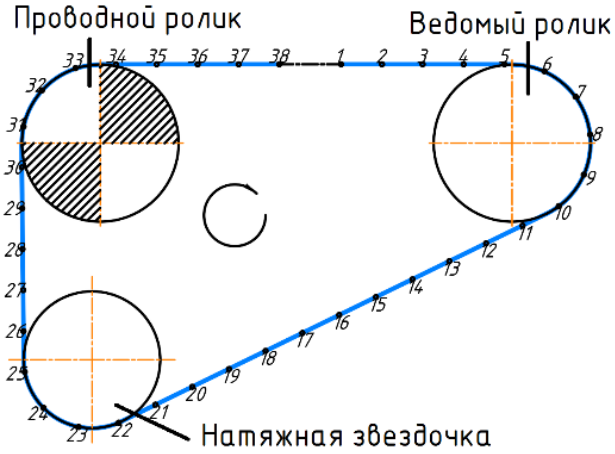


Рис. 10. Типовое расположение точек съема данных с частотой 10 Гц для первого оборота цепи по часовой стрелки

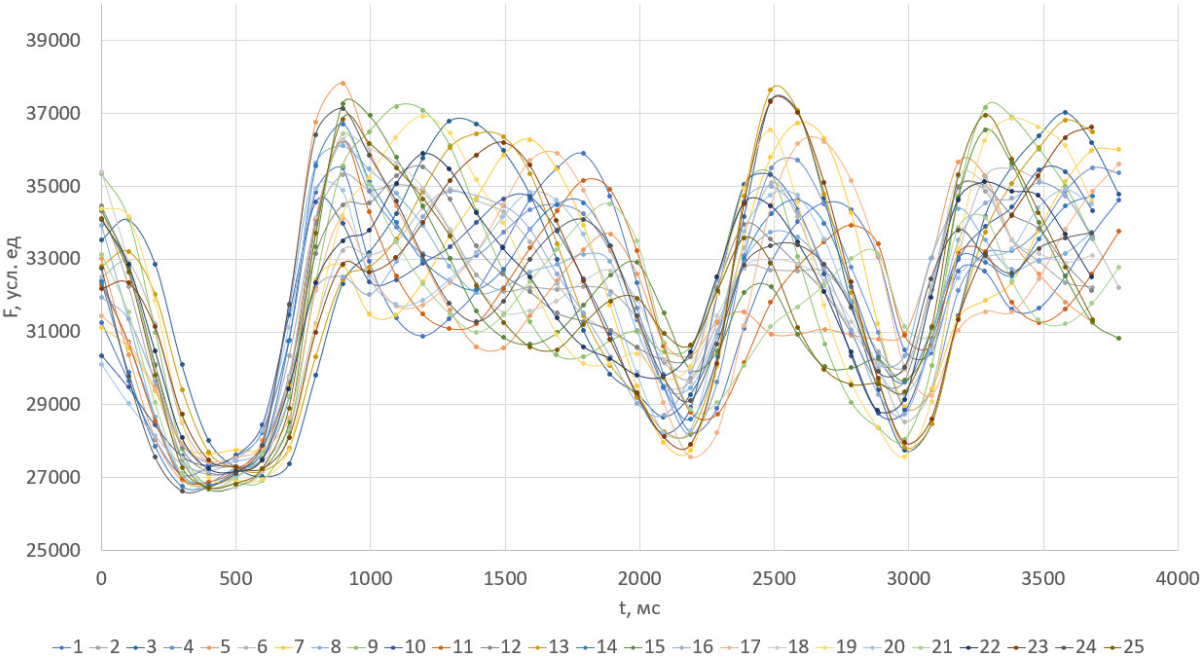


Рис. 11. Исходные данные 25-ти оборотов по часовой стрелке с частотой съема данных 10 Гц

Для увеличения количества варьируемых параметров в стенде предусмотрена установка интеллектуального реле с датчиками положения паллет для реализации автоматического процесса накопления паллет в реверсивном режиме работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Патент № 217286U1 Российская Федерация, СПК B65G 17/30 (2023.02); F16D 11/00 (2023.02); F16D 67/00 (2023.02); F16H 3/60 (2023.02); F16H 19/02 (2023.02). Муфта разъемная управляемая накопительного роликового конвейера реверсивного режима работы: № 2023102758: заявл. 07.02.2023: опубл. 24.03.2023 / Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А.

2) Результаты испытаний прибора для измерения нагруженности приводной роликовой цепи конвейера для паллет / Н.А. Фомин, В.П. Хлопков, А.Л. Носко, Е.В. Сафронов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2025. - № 3. - С. 312-321.

3) Хлопков, В.П. Испытательный стенд для исследования динамичности цепной передачи в приводном роликовом конвейере для паллет / В.П. Хлопков, Н.А. Фомин // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы: Сборник материалов 29-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – М.: Межрегиональная общественная организация содействия развитию культуры образования, спорта "Стратегия объединения", 2025. – С. 179–182.

4) Исследование динамичности цепной передачи в приводном роликовом конвейере для паллет / В.П. Хлопков, Н.А. Фомин, А.Л. Носко, Е.В. Сафронов // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении (FRITME-2025): Научные труды IX Международной научной конференции, посвященной 135-летию со дня рождения профессора Хрущова Михаила Михайловича. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2025. – С. 338–340.

УДК 004.896

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГУСЕНИЧНОГО БУКСИРА НА ДИСТАНЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ ДЛЯ МАЛЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

М.В. Шмелев, Л.М. Шамахов

Научный руководитель - **Л.М. Шамахов**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В данной работе приведено описание схемы дистанционного управления гусеничным буксиром малых воздушных средств. Также рассмотрены отдельные блоки работы программы управления.

Ключевые слова: *система управления, дистанционное управление, движитель гусеничный, блок-схема*

ENGINEERING OF REMOTELY CONTROLLED CRAWLER TUG FOR DSMALL AIRCRAFT

M.V. Shmelev, L.M. Shamakhov

Scientific Supervisor – **L.M. Shamakhov,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

This paper describes the remote control circuit for a crawler tug for small aircraft. Individual control program modules are also discussed.

Keywords: *control system, remote control, tracked mover, block diagram*

В настоящее время одним из наиболее востребованных видов перевозки, как грузов, так и пассажиров является авиация. Часто малая авиация это единственный способ достичь труднодоступных мест. Существует множество видов малой авиатехники, но всех них есть общее – необходимость доставки на место взлета или разгона. Способов доставить воздушное средство на взлетно-посадочную полосу или площадку два: свой ход или буксировка.

Самолет можно доставить на место взлета своим ходом, но этот способ используется редко, в частности из-за рисков больших экономических потерь, которые могут быть связаны, как и с повреждением различных элементов шасси, двигателей или обшивки, так и с повышенным расходом топлива. Наибольшее распространение получила буксировка [2].

На сегодняшний день в большое распространение в различной технике получает электропривод [1]. Буксиры воздушных судов не являются исключением. Уже сегодня появляются полностью переведенные на электропривод варианты с применением дистанционного управления. Такие компактные варианты позволяют существенно сократить расходы на содержание и топливо за счет своих небольших габаритов и малой стоимости электроэнергии в сравнении с ископаемым топливом.

Наличие дистанционного управления дает возможность оператору самостоятельно выбирать свое местонахождение. Это позволяет оценивать различные риски, находясь в непосредственной близости или отбуксировать воздушное средство в безопасное место при резких изменениях погодных условий без опасности для человека [3].

Для функционирования дистанционного управления необходимо спроектировать систему управления буксиром и провести ее отладку.

Работа разрабатываемой конструкции будет осуществляться при помощи джойстика FlySky, на самом буксире будет установлен приемник 1. В качестве платы управления будет использоваться микроконтроллер Arduino Mini 2, который соединена с драйвером 3. Питание

электродвигателей будет осуществляться при помощи блока питания 4. Питание микроконтроллера осуществляется с помощью дополнительной батареи 5

Для отладки системы управления использовалась лабораторная установка, представленная на рис. 1.

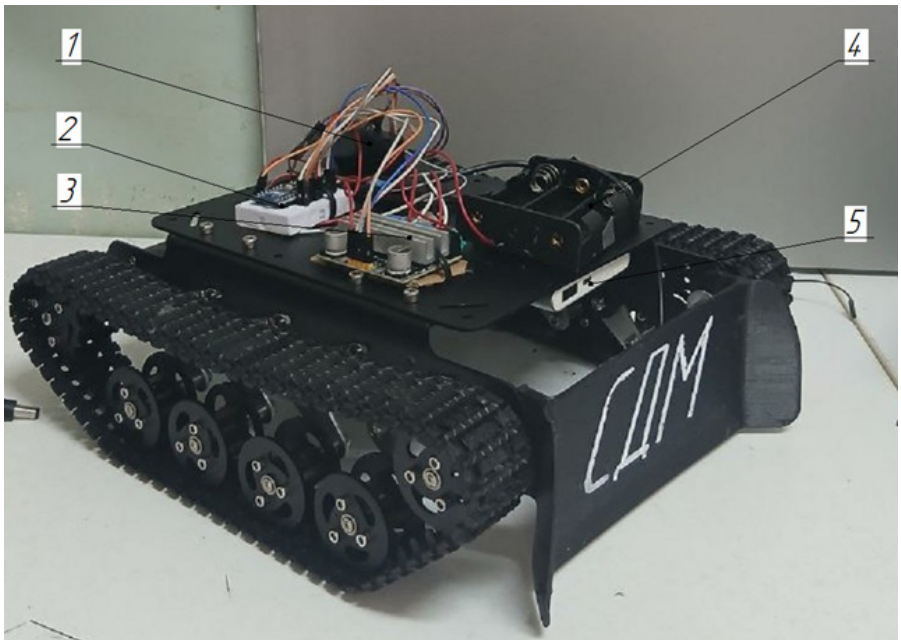


Рис. 1. Компоновка дистанционной системы управления

Управление движением буксира осуществляется при помощи джойстика на пульте управления. В разработанном коде заложено пропорциональное управление – скорость буксира будет изменяться в зависимости от угла и направления наклона джойстика. Сигнал, поступающий с джойстика, через приемник 1 попадает на плату управления 2. Программа, загруженная в плату, сравнивает положение джойстика по 2-м критериям: первый отвечает за движение, второй отвечает за поворот. Далее сигнал кодируется в общий и через драйвер 3 поступает на каждый электродвигатель. Верхнее положение джойстика отвечает за движение назад, нижнее положение за движение вперед. Крайнее правое положение отвечает за поворот направо, крайнее левое, соответственно, за поворот налево.

Один из тумблеров на пульте управления отвечает за режим движения. Буксир имеет 2 режима управления: скоростной для движения без самолета и обычный для использования при транспортировке.

Второй тумблер отвечает за положение механизма фиксации захвата передней стойки шасси. Данный механизм приводится в действие за счет установленного серводвигателя. Нижнее положение – фиксатор свободен. Данное положение используется при загрузке и разгрузке буксира. Верхнее положение – механизм захвата зафиксирован. Данное положение используется при движении, как загруженного буксира, так и загруженного.

Общий принцип работы буксира представлен на рис. 2. Данный принцип управления не зависит от конкретного джойстика и платы управления и может быть реализован с другими компонентами данного типа.

В ходе работы была разработана принципиальная схема дистанционного управления мобильным буксиром для малых воздушных судов. Представленная схема может быть реализована на реальных устройствах

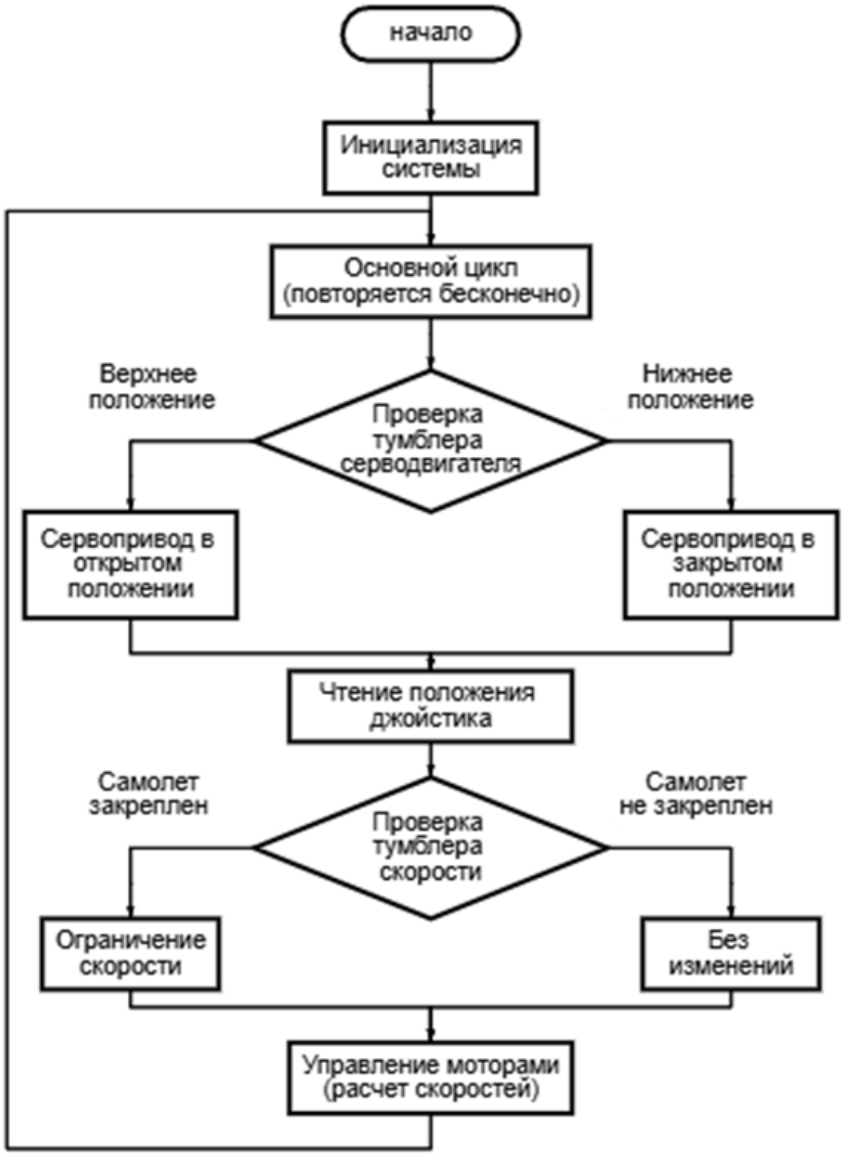


Рис. 2. Общий принцип управления буксиром

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) 5 Types of Aircraft Tugs // mototok: [site]. – URL: https://www.mototok.com/blog/5-types-of-aircraft-tugs (дата обращения: 15.08.2025).

2) Павлов, С.А. Буксировка воздушных судов: учебное пособие / С.А. Павлов, В.Б. Сердобов. - М.: МАДИ, 2018. - 104 с.

3) Шмелев, М.В. Виды транспортеров малых воздушных судов / М.В. Шмелев, Л.М. Шамахов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в машиностроительной, дорожной и строительной отраслях - 2025: материалы Международной научно-практической конференции. - Белгород: БГТУ, 2025. - С. 234-238.

Секция 3. Энерго- и ресурсосберегающие процессы и аппараты химической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности

УДК 621.929.6

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СЫПУЧЕЙ СМЕСИ

А.А. Воронцов, В.С. Егоров, А.Б. Капранова

Научный руководитель – **А.Б. Капранова**, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В статье представлена условная классификация основных направлений развития методов оценки качества сыпучей смеси с разделением на экспериментальное, аналитическое и компьютерное.

Ключевые слова: *сыпучий материал, смесь, коэффициент неоднородности, качество смеси*

METHODS FOR ASSESSING THE QUALITY OF A LOOSE MIXTURE

A.A. Vorontsov, V.S. Egorov, A.B. Kapranova

Scientific Supervisor - **A.B. Kapranova**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The article presents a conditional classification of the main directions of development of methods for assessing the quality of bulk mixtures with a division into experimental, analytical and computer.

Keywords*: bulk material, mixture, coefficient of heterogeneity, quality of the mixture*

При проектировании смесительного оборудования основной задачей является инженерный расчёт параметров аппарата, обеспечивающих выпуск смеси заданного регламентом качества. На практике это означает, что инженер-конструктор обязан заранее предусмотреть степень равномерности распределения ключевого компонента по всему объёму готовой продукции. Методов оценки качества сыпучей смеси известно несколько, и выбор конкретного метода определяет как трудоёмкость исследований, так и достоверность результатов.

На сегодняшний день в современной науке сложились три основных направления совершенствования методов оценки качества сыпучей смеси.

Первое – экспериментальное, с применением специальных приборов. К данному направлению можно отнести гравиметрический, химический, кондуктометрический, потенциометрический, полярографический, оптический и радиометрический анализы проб. Каждый вариант даёт объективную картину по качеству сыпучей смеси, но требует откалиброванного оборудования, квалифицированного персонала и заметных временных затрат.

Второе – аналитическое, опирающееся на статистический подход. Оценка однородности получаемой смеси может осуществляться либо на основе эмпирических данных, либо с применением математической модели. Использование математической модели позволяет варьировать технологические параметры смесителя без проведения экспериментов. При этом достоверность модели ограничена достоверностью исходной информации о физико-механических свойствах компонентов смеси [1, 2, 4, 5, 9].

Третье – компьютерное. Обработка опытных данных осуществляется специализированными программными продуктами. Здесь главное преимущество – скорость

и возможность визуализации распределения частиц, но итоговая погрешность зависит от дискретизации измерений и корректности алгоритмов [6].

Сравнение направлений показывает: 1) экспериментальное – наиболее ресурсоёмкое; 2) аналитическое – требует существенной базы экспериментальных измерений, либо модели, способной рассчитать неоднородность по заданным характеристикам компонентов и режимным параметрам смесителя [1, 2, 4, 5, 9]; 3) компьютерное – является наиболее оперативным методом, однако его точность не превышает точности входных данных.

Кратко рассмотрим классический метод, соответствующий второму направлению. Данный подход основан на использовании выборочного среднеквадратического отклонения S содержания ключевого компонента в пробах, отобранных из смеси [4]. Расчёт выполняется по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(C_i - \bar{C})^2},$$

где C_i – массовая или объёмная доля компонента в i-й пробе; $\bar{C}$ – среднее содержание по всем пробам, n – число проб.

Практическая ценность расчёта среднеквадратического отклонения S проявляется при сравнении разных конструкций смесителей или режимов перемешивания. Чем ближе S к нулю, тем выше однородность. Критический недостаток метода – значительная зависимость результата от места и способа отбора проб, а также от объёма единичной пробы. Недостаточная масса навески не позволяет зафиксировать реальные отклонения величины концентрации от среднего значения, а избыточная – усредняет локальные градиенты, снижая чувствительность к неоднородностям.

Остановимся на примере описания методологии количественной оценки неоднородности сыпучих смесей на основе анализа по оттенкам серого цвета. В лабораторной практике при исследовании неоднородных смесей распространённым подходом является фотофиксация образцов в фиксированных режимах съёмки (выдержка, диафрагма, цветовая температура) и при стабильных внешних условиях (освещённость, относительная влажность, температура окружающей среды). Типичный пример – оценка степени смешения трудноразделимых компонентов, различающихся по цвету, где ключевым этапом выступает цифровая обработка полученных изображений [5].

Для автоматизации данного анализа разработаны специализированные программы. В частности, программа mixan, которая позволяет произвести анализ пиксельной структуры снимка: для каждого компонента смеси строится гистограмма распределения пикселей по градациям серого. По оси абсцисс (рис. 1) откладывают яркость E (диапазон 0-255 усл. ед.), по оси ординат – доля пикселей, имеющих соответствующую градацию, от общего числа пикселей в пробе. Затем вычисляется коэффициент неоднородности смеси при использовании известного значения концентрации ключевого компонента. Данная концентрация определяется как отношение количества пикселей *Npi*, соответствующих данному компоненту, к общему количеству пикселей в анализируемой пробе *Np*.

Другими примерами реализации компьютерного направления совершенствования методов оценки качества сыпучей смеси являются запатентованные способы [3, 6, 7, 10]. Однако ни один из трёх методов не является универсальным. Для смесителей периодического действия чаще выбирают аналитический метод с последующей проверкой по контрольным опытам. В промышленных условиях, где важна скорость анализа, предпочитают компьютерный метод с обработкой сигналов датчиков (оптических, ёмкостных). Экспериментальный метод остаётся эталонным — именно его используют при сертификации оборудования или разрешении технологических споров.

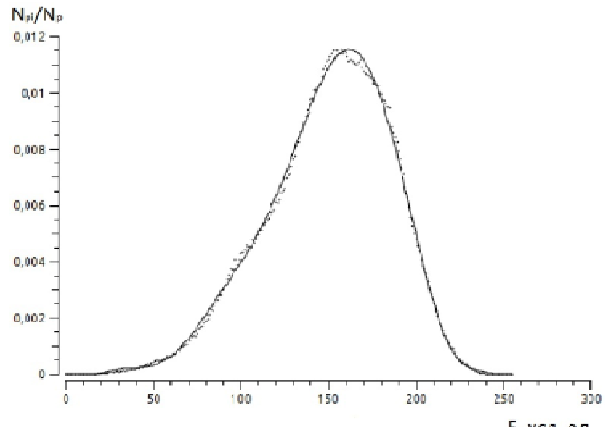


Рис. 1. Пример распределения пикселей изображения сыпучего материала по оттенкам серого цвета

В области оценки качества сыпучих смесей перспективным направлением является интеграция статистического моделирования и компьютерного анализа. Статистические модели дополняются параметрами быстрых компьютерных измерений с последующей калибровкой полученных данных по результатам химического или гравиметрического анализа. Инженерное проектирование смесителя должно предусматривать не менее двух независимых методов контроля, что является единственным способом обеспечения достоверности расчёта рабочих параметров установки в соответствии с регламентированными требованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Иванец, В.Н. Интенсификация процесса смешивания высокодисперсных материалов с направленной организацией потоков: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. – Одесса, 1989. – 268 с.

2) Капранова, А.Б. Деаэрация сыпучих сред в совмещенных со смешением процессах: дис. … д-ра физ.-мат. наук: 05.17.08 / Капранова Анна Борисовна. – Иваново, 2009. – 336 с.

3) Конструктивное обеспечение экспресс-анализа твердой дисперсной смеси / Д.Д. Бахаева, Д.В. Стенько, Д.В. Федорова, А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев // 76–я всеросс. науч.-техн. конф. ЯГТУ студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием (19-20 апреля 2023 г.): сб. материалов конф. : В 3 ч. Ч. 2 [Электронный ресурс]. – Ярославль : Издательство ЯГТУ, 2023. – С. 86-87. – 1 CD-ROM. – Текст: электронный.

4) Макаров, Ю.И. Аппараты для смещения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

5) Оценка качества смеси сыпучих материалов на основе анализа их цифровых изображений / О.В. Дёмин, Д.О. Смолин, В.Ф. Першин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 157–157.

6) Пат. № 2690539 Российская Федерация. Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету: опубл.: 04.06.19; Бюл. № 16 / М.Ю.Таршис, С.Н.Черпицкий, Л.В. Королев, А.Б. Капранова.

7) Пат. № 2819489 Российская Федерация, МПК B01F 23/60. Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету: опубл. 21.05.2024; Бюл. № 15 / М.Ю. Таршис, П.М. Смирнов, Л.В. Королев, А.Б. Капранова.

8) Першин, В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В.Ф. Першин, В.Г. Однолько, С.В. Першина. – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.

9) Таршис, М.Ю. Теоретические основы и методология создания эффективных аппаратов с эластичными рабочими элементами для смешивания сыпучих материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Таршис Михаил Юльевич. – Ярославль, 2009. – 286 с.

10) Экспресс-методы оценки технических параметров промышленного оборудования: Монография / А.Е. Лебедев, ДВ. Лебедев, М.Ю. Таршис, А.Б. Капранова, Д.Б. Шмулевский. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2017. – 172 с.

УДК 62-531.3

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ В РЕГУЛИРУЮЩИХ КЛАПАНАХ

А.В. Грызунов, И.И. Верлока, А.Б. Капранова

Научный руководитель – **А.Б. Капранова**, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Представлен обзор современных подходов к описанию процесса зарождения кавитационных пузырей. Рассмотрены детерминированные, стохастические и комбинированные группы методов. Выделены особенности, преимущества и ограничения каждого подхода, а также их применимость для осевых конструкций клапанов. Проанализированы зарубежные публикации последних лет, отражающие развитие CFD-технологий, методов крупных вихрей и гибридных подходов. Показано, что для осевых клапанов с продольным делением потока перспективным является применение энергетического метода Климонтовича в рамках случайного процесса Орнштейна-Уленбека.

***Ключевые слова**: гидродинамическая кавитация, методы моделирования, стохастический подход, детерминированный подход, CFD, регулирующие клапаны*

MODERN DIRECTIONS IN MODELING THE PHENOMENON OF HYDRODYNAMIC CAVITATION IN CONTROL VALVES

A.V. Gryzunov, I.I. Verloka, A.B. Kapranova

Scientific Supervisor – **A.B. Kapranova**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

An overview of modern approaches to describing the process of cavitation bubble nucleation is presented. Deterministic, stochastic, and combined groups of methods are considered. The features, advantages, and limitations of each approach, as well as their applicability to axial valve designs, are highlighted. Foreign publications of recent years reflecting the development of CFD technologies, large eddy simulation methods, and hybrid approaches are analyzed. It is shown that for axial valves with longitudinal flow division, the application of Klimontovich's energy method within the framework of the Ornstein-Uhlenbeck stochastic process is promising.

***Keywords:** hydrodynamic cavitation, modeling methods, stochastic approach, deterministic approach, CFD, control valves*

Гидродинамическая кавитация в регулирующей трубопроводной арматуре представляет собой сложное физическое явление, сопровождающееся образованием, ростом и последующим схлопыванием парогазовых пузырей при резком падении локального давления ниже давления насыщенного пара рабочей среды. Негативные последствия кавитации – эрозия поверхностей, вибрации, повышенный шум и преждевременный выход оборудования из строя – обусловливают необходимость детального изучения механизмов её зарождения и развития на ранних стадиях.

Проектирование современных регулирующих клапанов, в том числе осевых конструкций [1, 9], требует применения адекватных математических моделей, позволяющих прогнозировать условия возникновения кавитации и оценивать интенсивность пузырькообразования. Сложность этой задачи связана с вероятностным характером движения кавитационных пузырей, многофакторностью процесса и необходимостью учёта как физико-механических свойств рабочей среды, так и конструктивно-режимных параметров устройства.

Цель настоящей работы – обоснование выбора и применимости стохастического метода [2] для запатентованной авторами конструкции осевого клапана с продольным

делением потока [9]. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: систематизация современных подходов к моделированию ранней стадии гидродинамической кавитации; анализ их применимости для осевых клапанов; обоснование выбора стохастического метода [2] для конструкции [9].

В настоящей работе на основе принципов системно-структурного анализа и обзора отечественных и зарубежных источников выделены три основные группы методов, применяемых для описания исследуемого процесса: детерминированные, стохастические и комбинированные. Эти группы различаются по способу учёта случайного характера зародышеобразования, по масштабу рассматриваемых процессов и по степени детализации моделируемой системы.

К детерминированным относят методы, в основе которых лежит решение уравнения радиального движения одиночного кавитационного пузыря. Наиболее распространена форма Рэлея-Ламба (Рэлея-Плессета) [16]. Такой подход позволяет достаточно точно описать эволюцию сферической полости в безграничной несжимаемой жидкости и учесть инерционные, тепловые и диффузионные эффекты, однако его применение к реальным регулирующим клапанам ограничено. Во-первых, детерминированные модели не отражают статистическую природу зародышеобразования: они не описывают систему множества взаимодействующих пузырей и не дают распределения пузырьков по размерам. Во-вторых, сложная геометрия проточных частей, в частности, в осевых клапанах [1], делает решение уравнений Рэлея-Ламба крайне трудоёмким вычислительным процессом.

В группе стохастических методов зарождение кавитационных пузырей трактуется как случайный процесс, подчиняющийся законам статистической физики [10]. Здесь макросистема пузырей считается энергетически замкнутой по ансамблю Гиббса, а её состояние задаётся функцией распределения, которая удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка [4]. Достоинство таких моделей - возможность получать дифференциальные функции распределения числа пузырьков по размерам с учётом как гомогенной, так и гетерогенной нуклеации [13]. Для регулирующей арматуры важным оказался энергетический метод, предложенный Ю.Л. Климонтовичем [4]. В нём процесс зародышеобразования моделируется как случайный процесс Орнштейна-Уленбека с использованием стационарного решения уравнения Фоккера-Планка [2, 3]. Это позволяет связать число образующихся пузырьков с физическими свойствами среды и конструктивно-режимными параметрами клапана. Для осевых конструкций, в том числе с продольным делением потока [1, 9], указанный метод даёт аналитические выражения для функций распределения пузырей по удельным диаметрам в зависимости от степени открытия [2].

Стохастические подходы позволяют учесть вероятностную природу зародышеобразования и получить распределения пузырьков по размерам, что важно для оценки эрозионной опасности, а также установить аналитические зависимости между параметрами процесса. К их ограничениям можно отнести необходимость определения эмпирических параметров модели и сложность учёта сложной геометрии проточной части.

Комбинированные подходы сочетают детерминированное описание несущей фазы (жидкости) в переменных Эйлера со стохастическим или лагранжевым описанием дисперсной фазы (пузырьков) [6]. В таких моделях совместно решаются уравнения сохранения массы, импульса и энергии для жидкости и кинетические соотношения для концентрации и размеров пузырьков. Один из активно развиваемых вариантов - метод, в котором жидкость моделируется как континуум в переменных Эйлера, а дисперсная фаза представляется совокупностью частиц, движущихся в переменных Лагранжа [12]. Для каждой частицы решается уравнение Рэлея-Ламба [16], а обратное влияние пузырьков на поток жидкости учитывается через источниковые члены в уравнениях сохранения.

В рамках комбинированной группы выделяется использование CFD-моделирования кавитационных течений в клапанах. В таких пакетах, как ANSYS Fluent, OpenFOAM и STAR-CCM+, реализованы модели кавитации, построенные на решении уравнений для объёмной доли пара (например, Singhal, Zwart–Gerber–Belamri, Schnerr–Sauer) [15]. Для учёта

турбулентности при кавитации в этих программах применяют методы крупных вихрей (LES), которые позволяют непосредственно вычислять крупномасштабные вихревые структуры, влияющие на динамику пузырей [15, 17]. В то же время интегрированные CAD-решения, такие как Solid Works Flow Simulation и Kompas Flow (на базе FlowVision), обладают более узким набором моделей кавитации и ограниченными возможностями LES, что снижает достоверность их результатов при расчётах сложных кавитационных режимов в арматуре.

В последние годы зарубежные исследователи всё чаще применяют гибридные схемы, комбинирующие Эйлер-Эйлер и Эйлер-Лагранжев подходы для моделирования кавитационных течений [14]. Эйлер-Эйлер метод эффективен для описания крупных кавитационных структур, тогда как Эйлер-Лагранжев даёт более детальную картину зарождения пузырей. Для гидравлических клапанов показано, что LES-моделирование в связке с моделью кавитации Zwart-Gerber–Belamri хорошо воспроизводит экспериментально наблюдаемые кавитационные зоны [17].

Комбинированные подходы дают возможность учитывать сложную геометрию проточной части, детально описывать течение жидкой среды, что позволяет применять их для реальных конструкций клапанов. Вместе с тем они требуют значительных вычислительных ресурсов, нуждаются в верификации на экспериментальных данных и чувствительны к выбору эмпирических констант.

Для осевого клапана с продольным делителем потока [9], характеризующимся сложной геометрией дросселирующего узла (продольные ручьи переменного сечения, цилиндрические выступы на дисковом затворе), целесообразно сочетать детерминированный и стохастический подходы. При этом в работе авторов [2] для указанной конструкции [9] использован стохастический подход на основе случайного процесса Орнштейна-Уленбека. Полученные дифференциальные функции распределения числа кавитационных пузырей позволили установить, что с увеличением степени открытия клапана от 20 до 100% условные диаметры пузырей сокращаются в 1,29 раза, а максимальная концентрация пузырей снижается с 36 до 30% от их общего числа. Работоспособность этого стохастического метода ранее показана для осевого регулирующего клапана с поперечным делителем потока [8] в работах [3, 7], по результатам которых получено удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных результатов (относительная погрешность 9-13%). В качестве дополнительного инструмента полезным может быть CFD-моделирование потока среды в проточной части (например, для верификации стохастической модели, подготовка прототипа для физических стендовых экспериментов), что продемонстрировано в статье [5] при анализе конструкции [8].

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы. Детерминированные модели (уравнение Рэлея-Ламба) пригодны для оценки динамики одиночного пузыря в локальных зонах проточной части, но они не учитывают статистическую природу зародышеобразования и не дают распределения пузырьков по размерам. Стохастический подход в форме энергетического метода Климонтовича [4] даёт аналитические зависимости для функций распределения числа пузырей по удельным диаметрам и по степени открытия клапана - это ценно для инженерных расчётов [2]. Комбинированные методы, включающие CFD-симуляцию, позволяют детально исследовать гидродинамику в сложных геометриях и верифицировать результаты стохастического моделирования [5, 15, 17]. Для осевого клапана с продольным делением потока [16] в настоящей работе обоснован выбор стохастического метода на основе энергетического подхода Климонтовича (стационарное решение уравнения Фоккера-Планка) [2, 4]. Адекватность этого подхода для осевых конструкций ранее была подтверждена на примере клапана с поперечным делителем потока [1] путём сопоставления с экспериментальными данными [5, 7], что позволяет уверенно применять его и к рассматриваемой конструкции [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Анализ разновидностей современных антикавитационных решений в конструкциях регулирующих клапанов / А.В. Грызунов, И.И. Верлока, А.Б. Капранова, Е.Ф. Скурыгин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – Вып. 3 (55). – С. 223-234. – DOI: 10.25699/SSSB.2024.55.3.030.

2) Стохастическое моделирование ранней стадии кавитации в прямоточном клапане / А.Б. Капранова, А.В. Грызунов, И.И. Верлока, Е.Ф. Скурыгин, Е.А. Есин, М.Ю. Таршис // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – Вып. 6 (58). – С. 322-328. – DOI: 10.25699/SSSB.2024.58.6.032.

3) Стохастическая модель процесса образования кавитационных пузырей в проточной части регулирующего клапана / А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев, А. М. Мельцер, С. В. Неклюдов // Вестник ИГЭУ. – 2016. – № 4. – С. 24 29. – DOI: 10.17588/2072 2672.2016.4.024 029.

4) Климонтович, Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.

5) Изучение влияния размеров отверстий делителей потока осесимметричных регулирующих клапанов на гидродинамику потока / А.Е. Лебедев, А.А. Ватагин, И.С. Гуданов, Д.С. Долгин, А.И. Холодкова // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 12. – URL: https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2025/10565 (дата обращения: 10.04.2026).

6) Маркина, Н.Л. Исследование кавитационных процессов в канале переменного сечения / Н.Л. Маркина, Д.Л. Ревизников, С.Г. Черкасов // Известия РАН. Энергетика. – 2012. – № 1. – С. 109-118.

7) Неклюдов, С.В. Процесс гидродинамической кавитации при осесимметричном дросселировании потоков жидкости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2018. – 17 с.

8) Патент № 2647933 Российская Федерация, МПК F16K 1/12 Осевой регулирующий клапан: опубл. 21.03.2018. Бюл. № 9 / А.Е. Лебедев, А.Б. Капранова, А.М. Мельцер, Д.В. Воронин, С.В. Неклюдов, Е.М. Серов

9) Патент № 2826467 Российская Федерация, МПК F16K 1/12. Клапан осевой. – № 2024107816; заявл. 25.03.2024; опубл. 11.09.2024, Бюл. №25 / А.Е. Лебедев, Д.А. Крутилов, И.С. Гуданов, Е.А. Есин, Т.Н. Новиков, А.Б. Капранова, А.В. Грызунов, М.Н. Романова, М.М. Чигирев, А.В. Лебедева, Е.А. Виноградова, И.С. Шеронина.

10) Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Наука, 1975. – 592 с.

11) Alamgir, Md. Correlation of pressure undershoot during hot water depressurization / Md. Alamgir, J.H. Lienhard // Journal of Heat Transfer. – 1981. – Vol. 103, № 1. – P. 52-55. – DOI: 10.1115/1.3244429.

12) Chen, F. Fluid dynamics analysis and optimized throttling design of L-shaped multi-stage high pressure reducing valve / F. Chen, Zh.-J. Jin // Flow Measurement and Instrumentation. – 2022. – Vol. 89. – 102296. – DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2022.102296.

13) Hsu, Y.Y. On the size range of active nucleation cavities on a heating surface / Y.Y. Hsu // Journal of Heat Transfer. – 1962. – Vol. 94. – P. 207-212. – DOI: 10.1115/1.3684339.

14) Ji, B. Cavitation research with computational fluid dynamics: From Euler-Euler to Euler-Lagrange approach / B. Ji, Z.Y. Wang, R. Bensow // Journal of Hydrodynamics. – 2024. – Vol. 36. – P. 1-23. – DOI: 10.1007/s42241-024-0001-2.

15) Osterland, S. CFD prediction and experimental visualisation of cavitation and its erosion in hydraulic valves / S. Osterland, J. Weber // Flow. - 2025. – No. 5. – DOI: 10.1017/flo.2025.12. – URL: https://www.researchgate.net/publication/391766443_CFD_prediction_and_experimental_visualisation_of_cavitation_and_its_erosion_in_hydraulic_valves

16) Plesset, M.S. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighborhood of a solid boundary / M.S. Plesset, R.B. Chapman // Journal of Fluid Mechanics. – 1971. – Vol. 47. – P. 283-290. – DOI: 10.1017/S0022112071001058.

17) Wang, B.L. Fundamental mechanism and multiscale simulations of hydrodynamic cavitating flows / B.L. Wang, Y.Q. Liu // Advances in Mechanics. – 2025. – Vol. 55, no. 4. – P. 819-853. – DOI: 10.6052/1000-0992-25-012.

УДК 621.646

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА В КЛАПАНЕ С ПРУЖИННЫМ ЗАПИРАЮЩИМ ОРГАНОМ

Д.В. Дышлевой, А.Е. Лебедев, И.С. Гуданов

Научный руководитель – **А.Е. Лебедев**, д-р техн. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В данной статье проведен анализ работы регулирующего клапана с запирающим органом в виде цилиндрической пружины сжатия прямоугольного сечения. Анализ работы клапана проводился с помощью численного моделирования гидродинамики потока рабочей среды в проточной части клапана. Моделирование проводилось при трех степенях открытия клапана, а именно при полном открытии клапана, 50% открытии клапана, и при малой степени открытия, равной 10%. В качестве результатов моделирования получены карты распределения скоростей и давлений в проточной части клапана и в области делителя потока.

Ключевые слова: *трубопроводная арматура, регулирующий клапан, конструкция клапана, осесимметричный клапан, пружинный запирающий орган, моделирование гидродинамики, кавитация*

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW HYDRODYNAMICS IN A VALVE WITH A SPRING LOCK

D.V. Dyshlevoi, A.E. Lebedev, I.S. Gudanov

Scientific supervisor – **A.E. Lebedev**, Doctor of Technical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

This article analyzes the operation of a control valve with a locking element in the form of a rectangular-section cylindrical compression spring. The valve's operation was analyzed using numerical modeling of the fluid flow in the valve's flow path. The modeling was conducted for three valve opening degrees: full valve opening, 50% valve opening, and a small opening degree of 10%. The modeling results include velocity and pressure distribution maps in the valve's flow path and the flow divider region.

Keywords: *pipeline fittings, control valve, valve design, axisymmetric valve, spring locking element, hydrodynamics modeling,cavitation*

Трубопроводная арматура и регулирующие клапаны, в частности, используются во многих отраслях промышленности на установках и агрегатах нефтехимических и химических предприятий, магистральных трубопроводах, на газораспределительных станциях [2-3].

Конструкция регулирующих клапанов осесимметричного типа, состоящего из внешнего корпуса и расположенного внутри него срединного тела с регулирующим механизмом, имеют широкое распространение, поскольку обладают рядом преимуществ в сравнении с другими видами регулирующих клапанов. Осесимметричный корпус с соосным расположением входного и выходного патрубков обеспечивает спрямленное движение потока, низкий перепад давлений внутри клапана и высокую пропускную способность рабочей среды [7].

Однако важной и не до конца решенной проблемой остается возможность возникновения кавитации, которая приводит к появлению шумов во время работы клапана, возникновению вибраций и негативно сказывается на долговечности клапана, поскольку кавитация приводит к эрозионному износу деталей и выходу клапана из строя.

Регулирующий клапан осесимметричного типа с модификацией запирающего элемента в виде цилиндрической пружины сжатия прямоугольно сечения с выступами впадинами треугольной формы препятствует турбулизации потока в зазорах между витками

пружины, изменяет его направление. Такая конструкция позволяет снизить вероятность возникновение кавитации [6].

Совершенствование конструктивных решений регулирующих клапанов является актуальной проблемой проектирования трубопроводной арматуры, в связи с необходимостью интенсификации операции управления процессом подачи рабочей среды в зависимости от ее физико-механических и химических свойств [4-7].

Снижения негативно влияния кавитации на работу клапана, путем модернизации его конструкции, в частности запирающего элемента, является актуальной задачей современного проектирования в области трубопроводной арматуры [1].

Учитывая ключевую роль осевых регулирующих клапанов в трубопроводных системах, практическое и прикладное значение имеет проведения численного анализа гидродинамики потока, его характеристик и изучение на основе этого анализа возможностей оптимизации конструкции клапана, направленных на повышение его эффективности работы регулирующего клапана в частности и трубопроводной системы в общем.

Для оценки работоспособности и эффективности клапана с запирающим элементов в виде цилиндрической пружины сжатия необходимо провести численно моделирование гидродинамики рабочего потока.

В данном исследовании основная задача заключается в изучении характеристик потока рабочей среды осевого клапана регулирования потока с пружинным запирающим органом, чтобы дать теоретическую основу для анализа и улучшения его работы. Осуществление данной задачи производится за счет проведения численного моделирования гидродинамики потока рабочей среды.

В качестве результата исследования требуется получить изображение облака давления, скорости рабочей среды внутри клапана, на основании чего можно сделать вывод о работоспособности и эффективности модификации конструкции.

Для проведения численного моделирования построена упрощенная модель клапана, с использованием продуктов Компас-3Dv23, данная модель представлена на рис. 1.

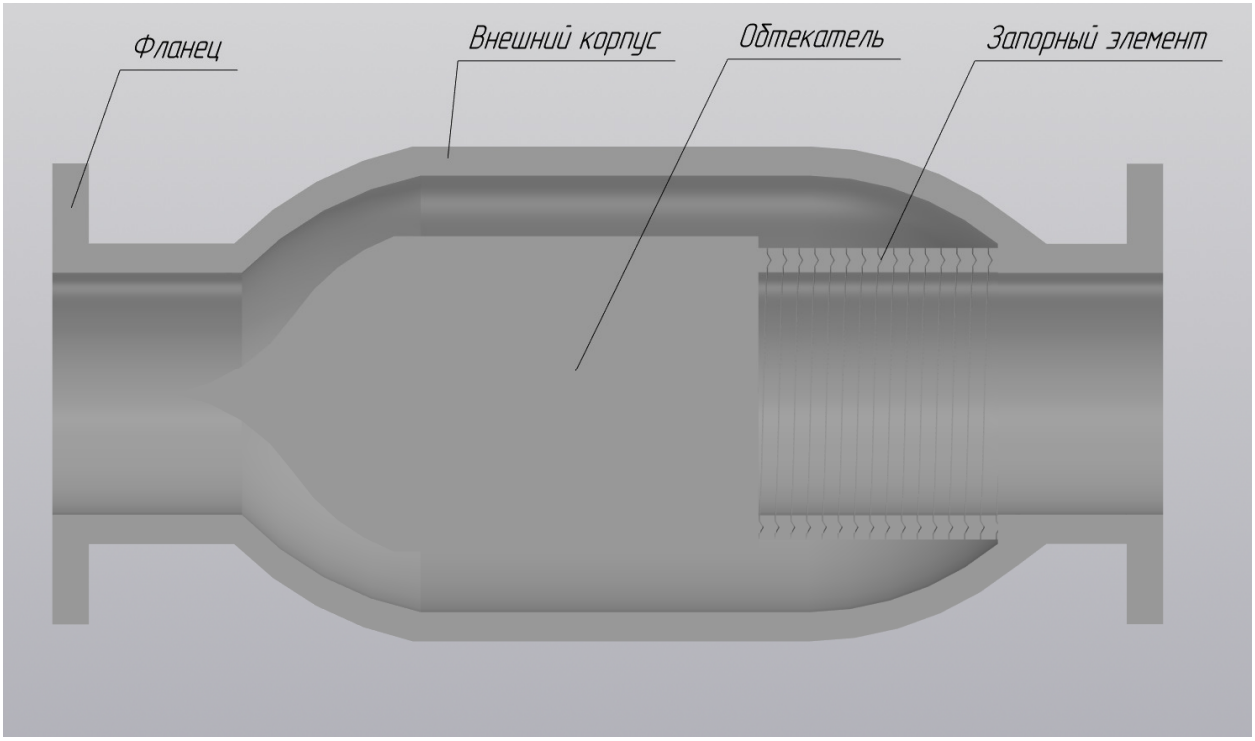


Рис. 1 . Упрощенная модель клапана с пружинным запирающим органом

Модель клапана с основными геометрическими размерами представлена на рис. 2.

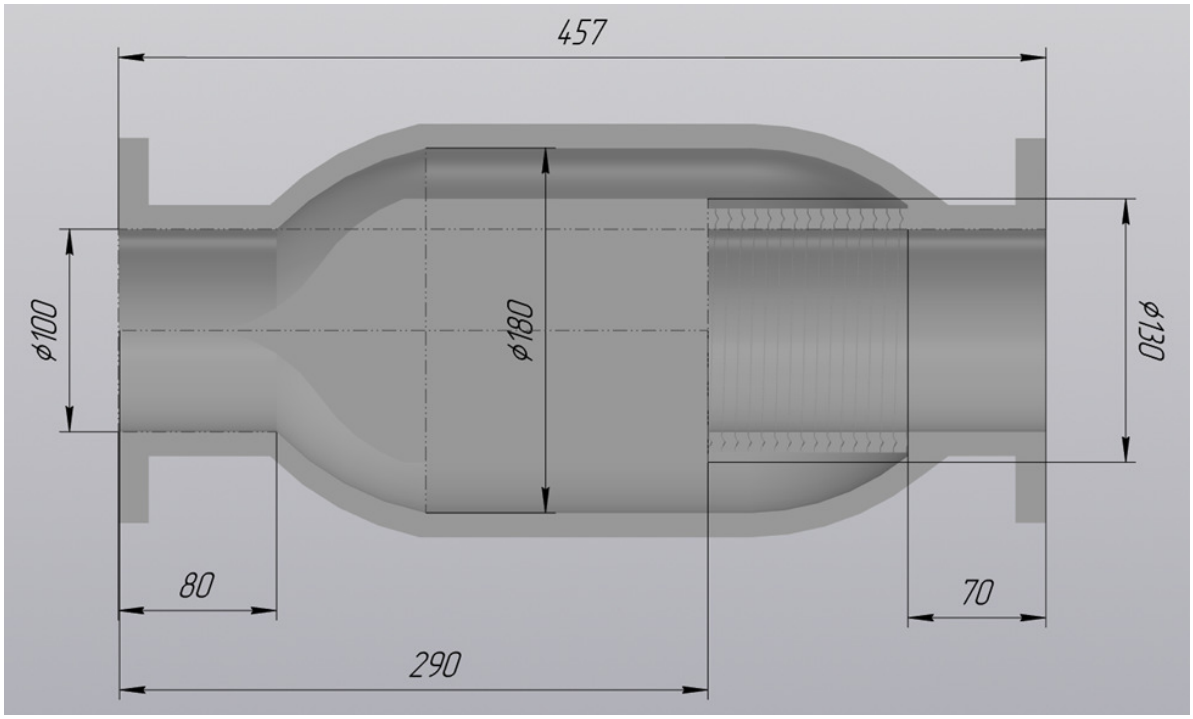


Рис. 2. Упрощенная модель осевого клапана с основными размерами

Расчет гидродинамики потока рабочей среды осуществляется в системе KompasFlow.

Поскольку в системе KompasFlow для расчета гидродинамики используется не сама твердотельная модель клапана, а объем рабочей среды внутри конструктивных элементов, при помощи стандартных инструментов Компас-3D была выделена проточная часть клапана. Тело, представляющее объем внутренних полостей клапана представлено на рис. 3.

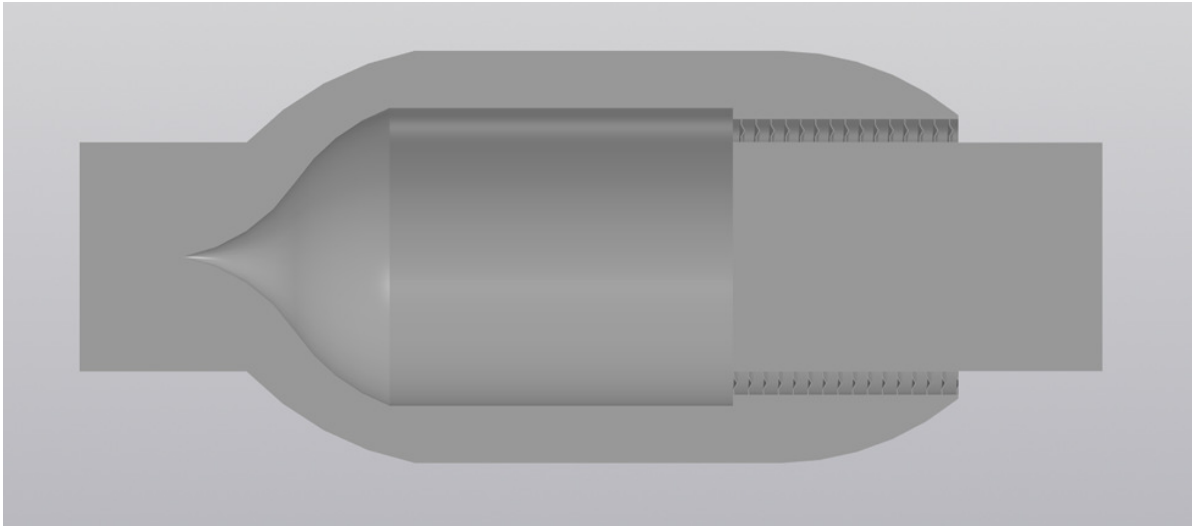


Рис. 3. Сечение геометрии проточной части клапана

Для окончательного формирования геометрической модели были добавлены элементы выдавливания длиной 500 мм для области выхода и для области входа.

Условный проход участков области входа и выхода соответствуют по геометрическим размерам условному проходу клапана. Модель расчетной области в сечении представлена на рис. 4.

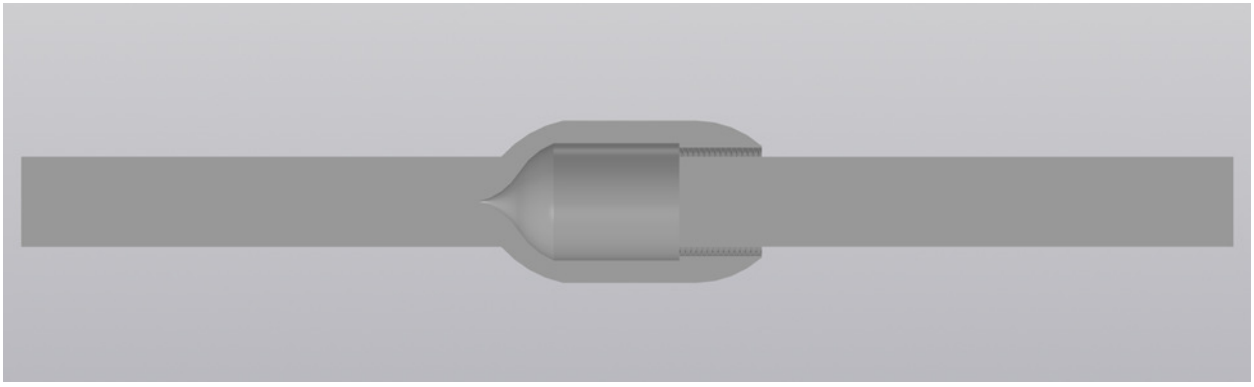


Рис. 4. Сечение модели расчетной области

Для регулирующего клапана осевого потока, установленного с делителем потока в виде цилиндрической пружины сжатия прямоугольного сечения с выступами-впадинами треугольной формы, были проведены численные моделирования в водосборной зоне клапана при трех рабочих условиях: 100% открытия, 50% открытия, 10% открытия клапана. Для всех условий открытия граничные условия задавались как вход с заданным объемным расходом и выход под давлением, при этом предполагалось, что рабочая температура среды равна 20°C, а влияние гравитации не учитывалось.

Численное моделирование клапана производилось в программном продукте KompasFlow со следующими исходными данными: использовалась модель k-ε; модельная жидкость – вода; объемный расход на входе – 250 м^3/ч; статическое давление на выходе – *P*ст = 0,6 МПа; интенсивность турбулентности – 3%.

Результаты численных исследований (картины распределения скорости и давления) течения жидкости через клапан при полном открытии, где вероятность возникновения кавитации невелика, поскольку отсутствуют значительные скорости течения, представлены на рис. 5-6.

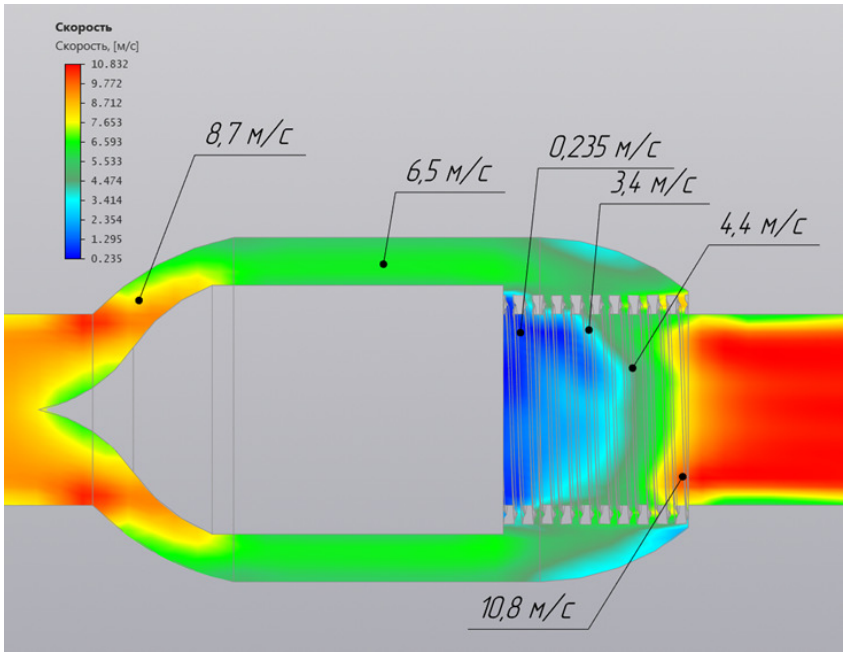


Рис. 5. Распределение скоростей при 100% открытии клапана

Из рисунка видно, что в отверстиях делителя потока наблюдается небольшое возрастание скоростей и, соответственно, приводит к незначительному снижению давления.

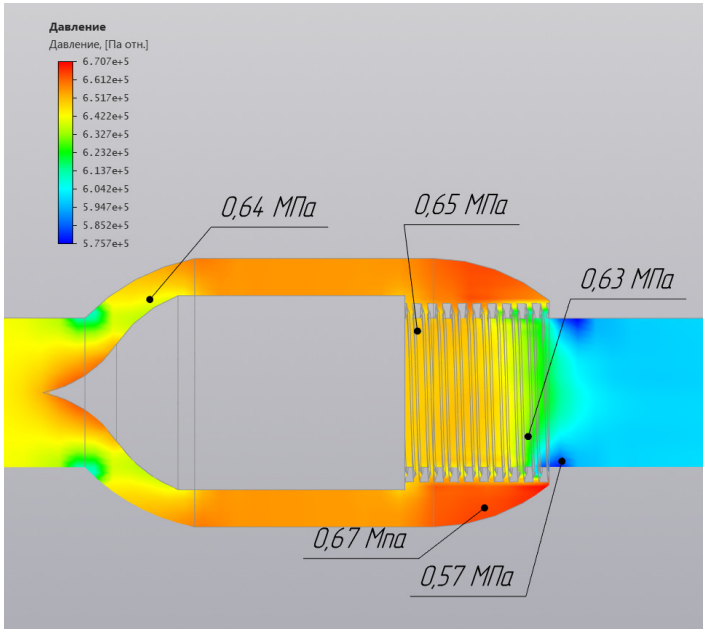


Рис. 6. Распределение давлений при 100% открытии клапана

В целом в клапане наблюдается относительно плавное изменение давлений и скоростей, также наблюдается незначительное снижение давления во внутренней области делителя потока в виде цилиндрической пружины сжатия.

Вблизи срединного тела наблюдается снижение скорости потока. Это может быть связанно с геометрией клапана и особенностями движения потока.

В данной области может возникать циркуляционное движение жидкости с невысокой скоростью. В данном случае это не должно вероятно оказать значительного влияния на движение потока рабочей среды и работу клапана. Однако при уменьшении степени открытия клапана, которая приведет к возрастанию скоростей, данная особенность может сказаться на движении потока. Так как циркуляция жидкости может привести к искажению направления движения струи рабочего потока жидкости.

Следующие результаты распределения скоростей и давлений (рис. 7-8) получены для клапана с делителем потока, имеющем меньший процент открытия, равный 50%.

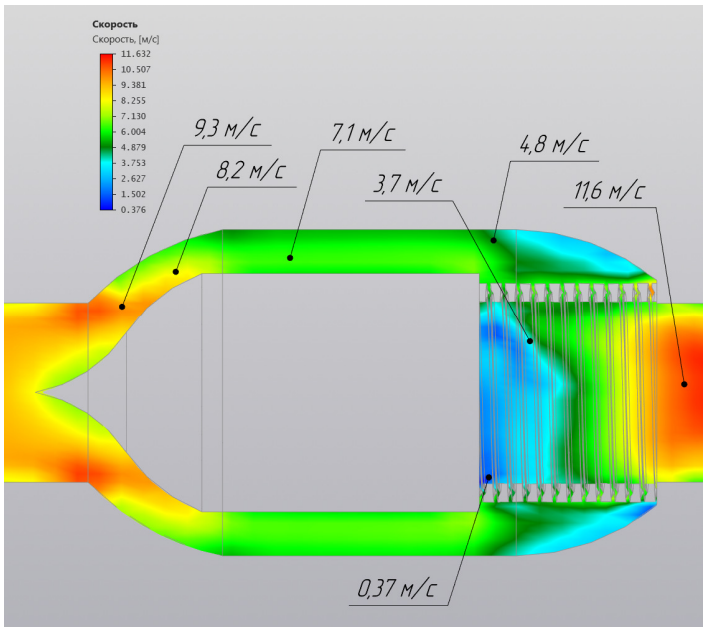


Рис. 7. Распределение скоростей при 50%-ном открытии клапана

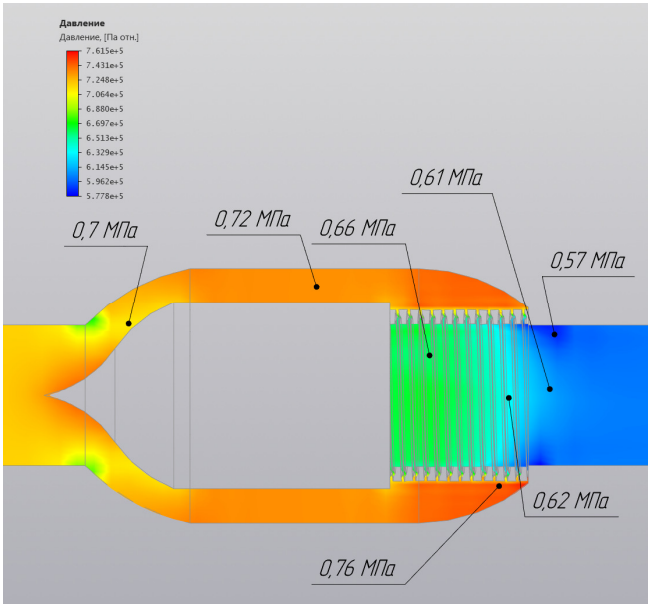


Рис. 8. Распределение давлений при 50%-ном открытии клапана

В этом случае также наблюдается плавное падение скорости и давления, как и в случае с полным открытием клапана. Общие величины скорости потока рабочей среды немного возрастают, это связано с уменьшением размера проходов в делителе потока, из-за уменьшения зазора между витками пружины. Однако вблизи срединного тела также присутствуют зоны циркуляции жидкости внутри делителя потока, но области этих завихрений меньшего размера, чем при полном открытии клапана.

Скорость в области делителя потока так же, как и давление, немного возрастает в сравнении с 100%-ной степенью открытия клапана. В целом вероятность возникновения кавитации невелика.

На рис. 9-10 изображено распределение скоростей и давления жидкости для клапана с 10%-ной степенью открытия. Результаты численных исследований течения жидкости через клапан на начальных фазах открытия, представляют наибольший интерес в исследовании гидродинамики потока в регулирующем клапане, поскольку на начальных степенях открытия имеет место максимальные скорости течения и наибольшая вероятность возникновения кавитации [5].

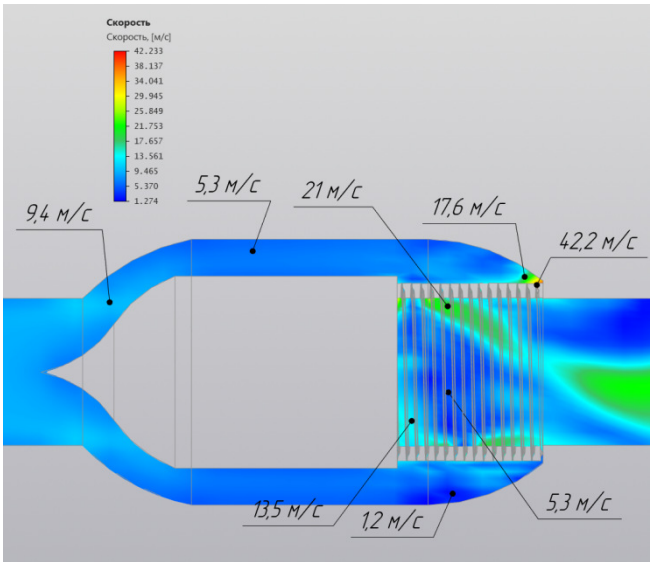


Рис. 9. Распределение скоростей при 10% открытии клапана

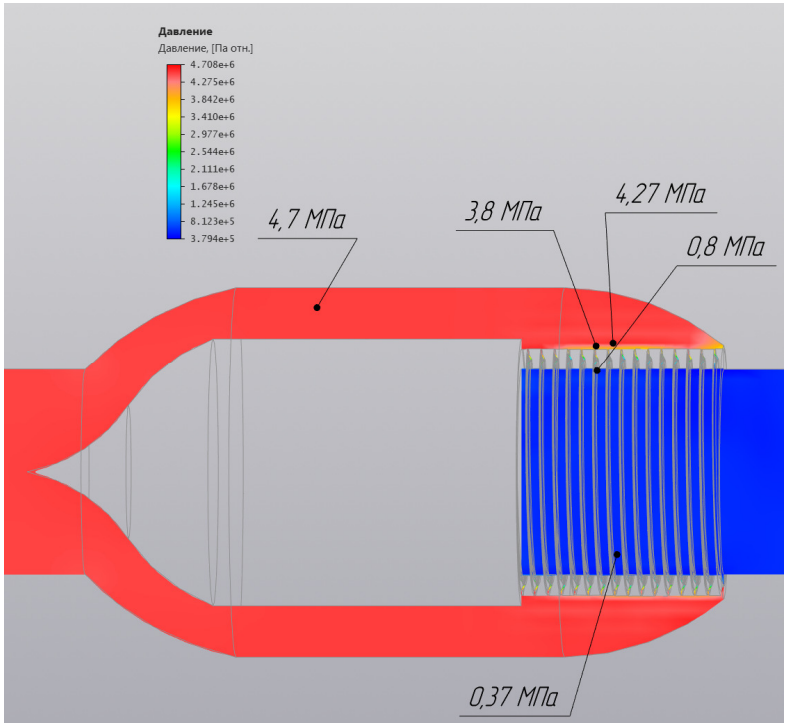


Рис. 10. Распределение давлений при 10% открытии клапана

Из полученных картин распределения скорости видно, что между витками делителя потока наблюдается резкое возрастание скоростей, особенно в начале, в зазорах между витками пружины, которые находятся ближе к выходному отверстию. Это может привести к возникновению кавитации.

Также наблюдается относительно плавное снижение давления.

Однако в области делителя потока наблюдаются циркуляционные завихрения потока рабочей среды, что может отрицательно сказаться на работе клапана.

Это может отрицательно сказаться на гидравлическом сопротивлении клапана. А также приводит к искажению радиального направления струй [5].

Таким образом, численное моделирование показывает, что в клапане происходит относительно плавное изменение скоростей и давлений, особенно при высоких степенях открытия клапана, что позволяет эффективно снижать вероятность возникновения кавитации.

Однако при низком значении открытия клапана, равного 10%, выявлена возможность возникновения кавитации при прохождении рабочего потока через зазоры между витками пружины, расположенными ближе к выходному отверстию клапана, поскольку там наблюдается резкое возрастание скоростей.

Помимо этого, при низкой степени открытия клапана наблюдается возникновение вихревых течений внутри области делителя потока, вблизи срединного тела клапана. Это в свою очередь может отрицательно сказаться на работе регулирующего клапана.

Проведенный анализ является основанием для дальнейшей модернизации конструкции запирающего элемента, с цель снижения возможностей возникновения негативных явлений в работе клапана при низких степенях открытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Анализ разновидностей современных антикавитационных решений в конструкциях регулирующих клапанов / А.В. Грызунов, И.И. Верлока, А.Б. Капранова, Е.Ф. Скурыгин // Южно-сибирский научный вестник. – 2024. – № 3. – С. 223-224.

2) Гуревич, Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. – Изд. 5-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.

3) Гуревич, Д.Ф. Трубопроводная арматура справочное пособие. – Изд. 2-е. – Л.: Машиностроение, 1981. – 312 с.

4) Конструктивные особенности новых регулирующих клапанов прямоточного типа / А.Е. Лебедев, А.Б. Капранова, А.М. Мельцер, С.В. Неклюдов, Е.М. Серов, Д.В. Воронин // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №2. – С. 102.

5) Изучение влияния размеров отверстий делителей потока осесимметричных регулирующих клапанов на гидродинамику потока / А.Е. Лебедев, А.А. Ватагин, И.С. Гуданов, Д.С. Долгин, А.И. Холодкова // Инженерный вестник Дона. – 2025, № 12; URL: IVD_34N12y25_lebedev_vatagin.pdf_ab50f9dade.pdf

6) Патент № 2681871 РФ, МПК F16K47/04. Регулирующий клапан: опубл. 13.03.2019 / Лебедев А.Е., Капранова А.Б., Мельцер А.М., Воронин Д.В., Неклюдов С.В., Серов Е.М.

7) Солопов С.А. К вопросу проектирования регулирующих клапанов / С.А. Солопов, А.М. Мельцер, А.Б. Капранова // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – С. 140.

УДК 621.762.4

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВЫХ СРЕД

В.С. Егоров, Д.В. Фёдорова, А.А. Воронцов

Научный руководитель - **А.Б. Капранова,** д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Рассмотрены основные методы оценки фильтрационных характеристик порошковых сред на основе определения коэффициента проницаемости порошковых сред.

Ключевые слова: *фильтрация, порошковые среды*

METHODS FOR ASSESSING FILTRATION CHARACTERISTICS OF POWDER MEDIA

V.S. Egorov, D.V. Fedorova, A.A. Voroncov

Scientific Supervisor **– A.B. Kapranova,** Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The main methods for assessing the filtration characteristics of powder media based on the determination of the permeability coefficient of powder media are considered.

Keywords: *filtration, powdermedia*

На процесс уплотнения порошковых материалов значительное влияние оказывает истечение газа через данный материал.

При проектировании механических уплотнителей порошковых сред особый интерес представляют собой физико-механические свойства однородных смесей из порошкообразных компонентов, в том числе особенности фильтрации воздуха из пор указанных сред. Так как на процесс уплотнения дисперсных материалов значительное влияние оказывает истечение газа через данный материал [1, 4].

Для количественной оценки этого явления используется коэффициент газопроницаемости k, который является одним из основных параметров в уравнениях фильтрации, таких как закон Дарси [1] в различных его представлениях

$$\overrightarrow{w_1} = -(k/\tilde{\mu})gradP_1, \quad (1)$$

где $\tilde{\mu}$ – вязкость газа; $\overrightarrow{w_1}$ – диффузионная скорость несущей фазы; P_1 – давление газа в порах. В общем случае коэффициент k зависит от пористости порошковой среды.

Единицей измерения коэффициента газопроницаемости k является 1D (Дарси) = 10^{-10} м^2, который зависит от пористости материала, т.е. может меняться в процессе изменения объема среды и определяется выражением

$$k = k_0(\alpha_{10}/\alpha_1)^n, \quad (2)$$

где n – некоторая константа; k_0 – проницаемость газа при начальном значении пористости α_{10} [1].

Существует несколько основных методов определения коэффициента проницаемости порошковой среды, которые отличаются между собой характером несущей фазы [1]:

1. Фильтрация жидкости

1.1. Метод Рута на основе принципа постоянной проницаемости (осадок подвергается сжатию посредством двух пористых пластин до достижения заданного уровня напряжения, после чего обеспечивается поддержание постоянного перепада давления);

1.2. Метод, в основе которого лежит идея дифференцирования интегрального соотношения по параметру стационарного состояния;

2. Фильтрация газа (метод, в основе которого лежит принцип пропускания газа сквозь измельчённый материал при давлениях, близких к атмосферному)

2.1. С постоянным расходом воздуха (прибор В.В. Товарова [1, 2]);

2.2. С переменным расходом воздуха (прибор ПСХ-2 [1, 3]).

3. Специальные методы

3.1. Ртутная порометрия (основана на зависимости между объёмом ртути, заполняющей поры, и внешним давлением);

3.2. Газовая пикнометрия (определяет объём твёрдого тела по объёму газа (обычно гелия), вытесняемого образцом из градуированной камеры. Гелий близок к идеальному газу и слабо адсорбируется);

3.3. Адсорбционные методы (включая теорию БЭТ) (основаны на измерении количества газа, адсорбированного пористым материалом. Позволяют оценить удельную поверхность и объём пор) [6].

Рассмотрим подробнее некоторые методы и приборы измерения коэффициента проницаемости.

Метод фильтрации газа через измельчённый материал с постоянным расходом воздуха применяется в приборе В.В. Товарова (рис. 1). Постоянство расхода воздуха поддерживается при помощи склянки Мариотта 1, заполненной водой, небольшое количество которой, равное объему воздуха в системе, вытекает до начала эксперимента. Пробу исследуемого материала загружают в кювету и уплотняют до заданной высоты при определенном давлении. При открытом кране 3 измеряется объем вытекающей воды и время фильтрации. Получив эти данные, можно, по специальной, рассчитать внешнюю удельную поверхность зерен пробы материала [1, 2].

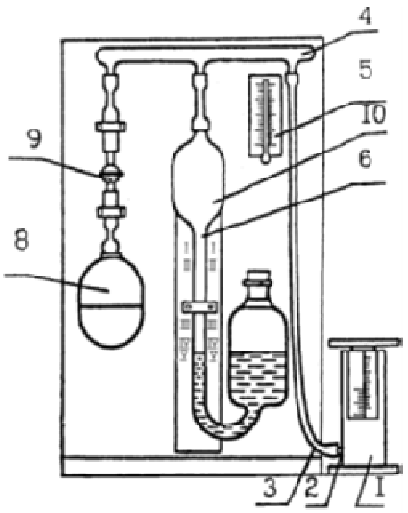


Рис. 1. Прибор для исследования фильтрации газа сквозь измельченный материал при постоянном давлении В.В. Товарова [1]:

1 – склянка Мариотта, 2 – наконечник, 3 – кран, 4 – стаканчик, 5 –одноколенный манометр, 6 – резервуар, 7 – термометр, 8 – резиновый шланг, 9 – штуцер, 10 – нижняя камера, 11 – опорная решетка, 12 – испытуемый материал, 13 – перфорированный диск, 14 – плунжер, 15 – нониус, 16 – шкала, 17 – фланец

Методом фильтрации газа с переменным расходом воздуха применятся в приборе ПСХ-2 (рис. 2). С помощью груши 8 создается разрежение воздуха под слоем исследуемого

материала, помещенного в кювету 1, так, чтобы жидкость в манометре 6 поднялась до колбочки 10. При закрытом кране 9 оценивается время опускания жидкости от одной фиксированной риски на манометре 6 до другой. Для определения удельной поверхности сыпучего материла нужно измерить время падения столба манометра между рисками 3-4 и произвести вычисления по специальной формуле [1, 3, 5].

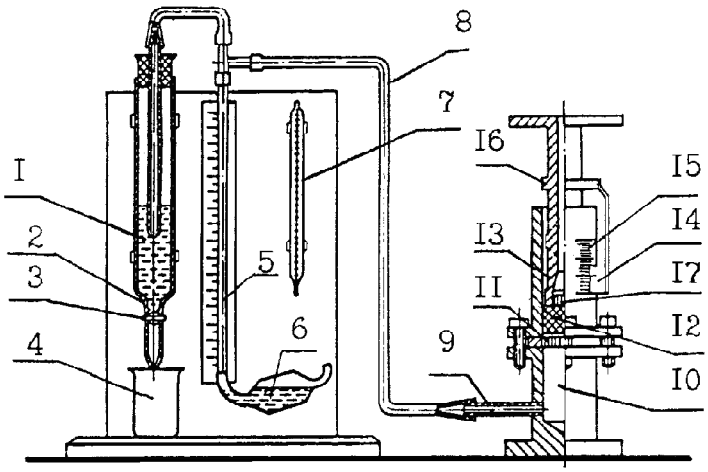


Рис. 2. Прибор для исследования фильтрации газа сквозь измельченный материал при переменном давлении ПСХ-2 [1]:
1 – кювета, 2 – штуцер, 3 – резиновый шланг, 4 – коллектор, 5 – термометр,
6 – однотрубчатый манометр, 7 – резервуар, 8 – резиновая груша, 9 – кран, 10 – колбочка

Адсорбционные методы позволяют измерить полную поверхность порошковых материалов. Одним из наиболее распространённых является метод БЭТ или метод низкотемпературной адсорбции азота, называемый методом Брунаэра, Эммета и Теллера [7].

Приборы, принцип работы которых основан на данном методе (рис. 3 [7]), работают с применением газов, таких как гелий, азот и при охлаждении пробы используется жидкий азот. Физические процессы в данных приборах при определении удельной поверхности протекают медленно, тем самым делая измерение длительным по времени.

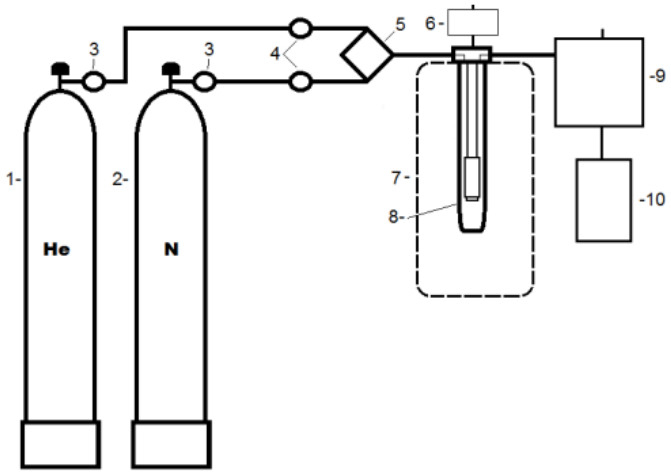


Рис. 3. Принципиальная схема прибора, основанного на методе низкотемпературной адсорбции газов [2]:
1 – баллон с гелием; 2 – баллон с азотом; 3 – редукторы; 4 – регулятор расхода газа (РРГ);
5 – смеситель газов; 6 – клапан; 7 – адсорбер (сосуд Дьюара); 8 – ампула с держателем;
9 – буфер; 10 – датчик

При постепенном увеличении давления газообразного азота измеряют количество адсорбированного газа. Для этого могут использоваться статические или проточные методы. По экспериментальным данным строят изотерму адсорбции – зависимость количества адсорбированного вещества от давления газа при постоянной температуре. Затем с помощью специальных уравнений вычисляют коэффициент проницаемости [7, 8].

Проницаемость газа через порошковый материал один из важных факторов, влияющих на процесс его уплотнения. Коэффициент газопроницаемости k позволяет количественно оценить это влияние и спрогнозировать поведение порошка при сжатии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Капранова, А.Б. Аппараты химических технологий: смесители и деаэраторы сыпучих сред: Учебное пособие / А.Б. Капранова, М.Ю. Таршис, А.Е. Лебедев – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2019. – 123 с.

2) Макаров, Ю.И. Аппараты для смещения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

3) Зимон, А.Д. Аутогезия сыпучих материалов / А.Д. Зимон, Е.И. Андрианов. – М.: Металлургия, 1978. – 288 с.

4) Капранова А.Б. Механическое уплотнение тонкодисперсных материалов / А.Б. Капранова, А.И. Зайцев – М.: Экон-информ, 2011. – 247 с.

5) Ивлева, И.А. Технология материалов: Учебное пособие / А.И. Ивлева, Н.П. Бушуева, О.А. Панова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – 100 с.

6) Собина, Е.П. Метрология пористости и проницаемости твердых веществ и материалов: монография / Е. П. Собина. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 428 с.

7) Носенко, А.А. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов / А.А. Носенко, С.И. Половнева // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология 2017. – Т. 7, № 2. – С. 113-121.

8) Абызов, А.М. Измерение удельной поверхности дисперсных материалов методом низкотемпературной адсорбции газа: Практикум / А.М. Абызов. – СПб: СПбГТИ(ТУ), 2016. – 37 с.

9) История и методология химии. Метод БЭТ // HerzenSPb: [сайт] – URL:: https://chemistry.herzen.spb.ru/адсорбция-свистать-всех-на-поверхнос/метод-бэт/ (дата обращения: 09.04.2026).

УДК 62-531.3

МЕТОДИКА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПЛУНЖЕРНОГО ЗАТВОРА С ЛИНЕЙНОЙ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

А.М. Иванов, М.В. Волков, А.В. Смирнова

Научный руководитель – **А.Б. Капранова**, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается задача профилирования плунжера регулирующего клапана для обеспечения линейной зависимости пропускной способности от хода регулирующего элемента. Представлен аналитический метод профилирования, основанный на геометрическом анализе проходного сечения в виде боковой поверхности усеченного конуса и условии минимальности образующей. Получено уравнение, связывающее текущий радиус плунжера с его осевым перемещением. Проведен параметрический анализ влияния геометрический параметров на форму профиля. Предложенный метод позволяет исключить эмпирические допущения при проектировании и повысить точность регулирования.

Ключевые слова: *плунжерный затвор, расходная характеристика, профилирование, аналитический метод, линейная характеристика, запорно-регулирующая арматура*

THE METHOD OF PROFILING A PLUNGER GATE WITH A LINEAR FLOW CHARACTERISTIC

A.M. Ivanov, M.V. Volkov, A.V. Smirnova

Scientific Supervisor – **A.B. Kapranova**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The article addresses the problem of profiling a control valve plunger to ensure a linear dependence of the flow capacity on the plunger stroke. An analytical method for profile synthesis is presented, based on the geometric analysis of the flow passage as the lateral surface of a truncated cone and the condition of the generatrix minimality. A equation relating the current plunger radius to its axial displacement is obtained. A parametric analysis of the influence of geometric parameters on the profile shape is carried out. The proposed method eliminates empirical assumptions in design and improves control accuracy.

Keywords: *plunger value, flow characteristic, profiling, analytical method, linear characteristic, shut-off and control valves*

Управление потоком рабочей среды относится к основным задачам проектирования запорно-регулирующей арматуры для энергетики, химической и нефтегазовой промышленности. Регламентным требованием при этом, особенно в системах автоматического управления, является обеспечение заданного вида расходной характеристики – зависимости пропускной способности от хода регулирующего элемента. Пропускная способность – величина, численно равная расходу рабочей среды с плотностью 10^3 кг/м^3, протекающей через арматуру при перепаде давлений 0,1 МПа [1]. Линейная характеристика, при которой расход пропорционален положению плунжера, наиболее востребована для систем, требующих высокой точности регулирования в широком диапазоне [2]. Достижение такой характеристики напрямую зависит от точности расчета и изготовления профиля плунжера, что делает разработку и верификацию соответствующих аналитических методов актуальной прикладной задачей. Существующие методы профилирования плунжеров часто основываются на эмпирических данных или упрощенных геометрических моделях, не учитывающих в полной мере условие перпендикулярности образующей минимального проходного сечения к касательной профиля. Данный подход может приводить к значительным отклонениям расчетной расходной характеристики от реальной (особенно при малых открытиях запорно-регулирующей арматуры), что влечет

снижение устойчивости работы контура регулирования. В частности, с позиций производителя регулирующей арматуры актуальной задачей является разработка способа расчета формы профиля плунжера для обеспечения линейной зависимости площади проходного сечения от его хода.

Целью данной работы является разработка и верификация аналитического метода профилирования плунжера регулирующего клапана с линейной расходной характеристикой в зависимости от изменения значений геометрических параметров. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи.

1. На основе геометрического анализа проходного сечения в виде боковой поверхности усеченного конуса получить уравнение связи для ряда конструктивных параметров: текущего значения радиуса плунжера R_1, его осевого перемещения h, радиуса седла R_2 и угла конусности α.

2. Используя условие минимальности проходного сечения (перпендикулярность образующей касательной к профилю) определить профиль плунжера $R_1(h)$, т.е. зависимость текущего радиуса плунжера R_1 от его осевого перемещения h.

3. Выполнить верификацию предложенного метода профилирования плунжера с помощью компьютерного моделирования на примере расчета расходной характеристики в зависимости от степени открытия клапана DN200 PN40.

Согласно расчетной схеме плунжерного затвора, в котором проходное сечение образовано боковой поверхностью усеченного конуса (рис. 1), длина образующей конуса и площадь его боковой поверхности определяются выражениями

$$l = \frac{(R_2 - R_1)}{\sin \alpha}, \qquad S = \pi l(R_2 + R_1). \tag{1}$$

В соответствии с требованием линейности расходной характеристики для профилируемого плунжера регулирующего клапана площадь проходного сечения должна изменяться пропорционально ходу плунжера

$$S = kh, \tag{2}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

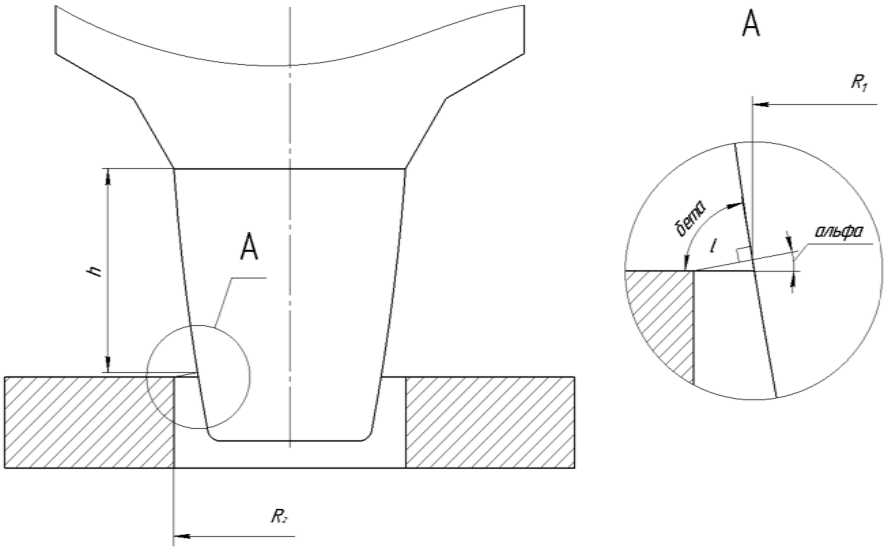


Рис. 1. Расчетная схема плунжерного затвора

Условие минимальности проходного сечения требует, чтобы образующая конуса была перпендикулярна профилю плунжера. Тангенс угла наклона касательной (или котангенс угла конусности α) к профилю определяется следующей первой производной

$$tg\alpha = \frac{dh}{dR_1}, \tag{3}$$

тогда, с учетом первой формулы из выражений (1), справедливо квадратное уравнение относительно sinα

$$k \sin^2 \alpha - 2\pi R_1 \sin \alpha - k = 0. \tag{4}$$

Решение системы алгебраических уравнений (1), (2), (4) относительно угла конусности α приводит к зависимости осевого перемещения плунжера h от текущего значения радиуса R_1

$$h = [\pi(R_2^2 - R_1^2)]/(k \cdot \sin\alpha), \tag{5}$$

где значения:
- угла конусности α согласно уравнению (7) равно

$$\alpha = \arcsin\left[(2k)^{-1}\left(2\pi R_1 - \sqrt{4\pi^2 R_1^2 + 4k^2}\right)\right], \tag{6}$$

- коэффициента пропорциональности k в выражении (4) вычисляется из условия равенства площади полного открытия клапана площади проходного сечения при максимальном значении осевого перемещения h_{max}

$$k = \pi R_2^2 / h_{max}. \tag{7}$$

Уравнение (5) с учетом выражений (6), (7) позволяет при заданных значениях R_2 и h_{max} построить профиль плунжера $R_1(h)$ с линейной расходной характеристикой. Верификация предложенного метода профилирования плунжера с помощью компьютерного моделирования выполнена на примере расчета расходной характеристики в зависимости от степени открытия клапана DN200 PN40 (рис. 2) при диаметре седла 67,2 мм. Данное значение диаметра седла обеспечило сокращением его площади на 19,72% в сравнении с результатами, полученными другими методами при диаметре 75 мм.

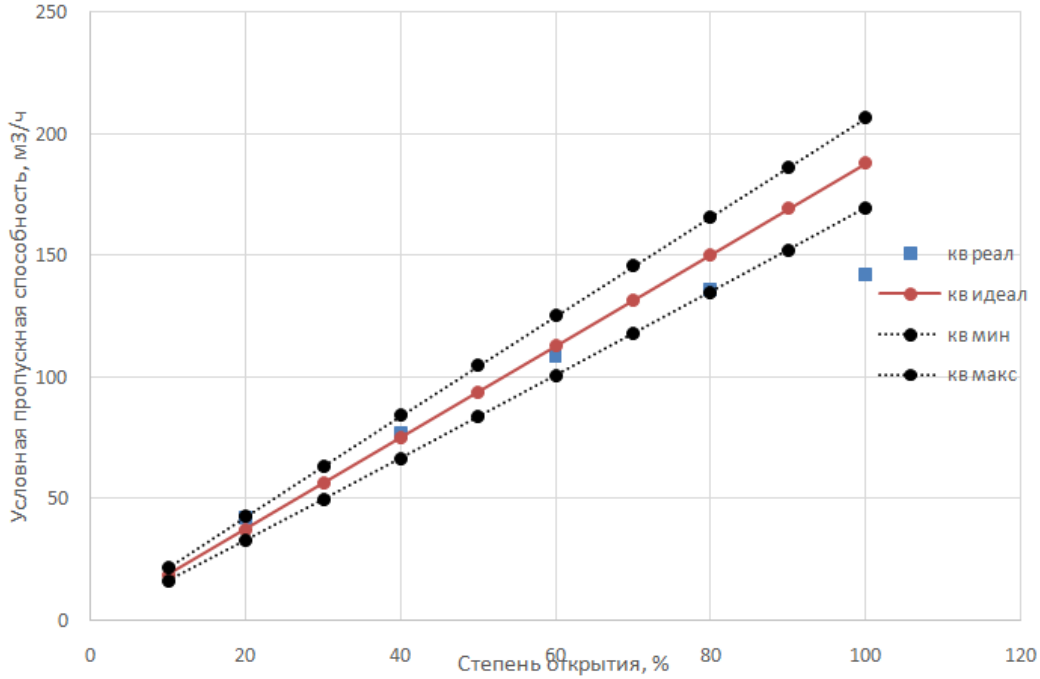


Рис. 2. Расходная характеристика в зависимости от степени открытия клапана DN200 PN40

Итак, предложенный аналитический метод профилирования плунжера регулирующего клапана с линейной расходной характеристикой в зависимости от изменения значений геометрических параметров позволяет минимизировать применение эмпирических допущений при проектировании регулирующей арматуры. Дальнейшее совершенствование метода может быть направлено на уменьшение отклонений расчета от опытных значений в крайних диапазонах хода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ 24856-2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 21 с.

2) Гуревич, Д.Ф. Трубопроводная арматура: справочное пособие / Д.Ф. Гуревич – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1981. – 351 с.

УДК 665.64.097.38:519.876.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГЕНЕРАТОРОВ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА

К.Д. Иванов

Научный руководитель – **И.С. Гуданов**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается подход к математическому моделированию процесса выжига кокса с поверхности катализатора в регенераторе установки каталитического крекинга. Предложена математическая модель, учитывающая гидродинамику псевдоожиженного слоя и кинетику выгорания кокса. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования с промышленными данными.

Ключевые слова: *каталитический крекинг, регенератор, математическое моделирование, выжиг кокса, псевдоожиженный слой, кинетика*

MATHEMATICAL MODELING OF CATALYTIC CRACKING REGENERATORS

K.D. Ivanov

Scientific Supervisor – **I.S. Gudanov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The paper considers an approach to the mathematical modeling of the coke combustion process on the catalyst surface in a regenerator of a catalytic cracking unit. A mathematical model is proposed that takes into account the hydrodynamics of the fluidized bed and the kinetics of coke burnout. A comparative analysis of the simulation results with industrial data is carried out.

Keywords: *catalytic cracking, regenerator, mathematical modeling, coke combustion, fluidized bed, kinetics*

Процесс каталитического крекинга является одним из ключевых в современной нефтепереработке, обеспечивая получение высокооктановых компонентов бензина и легких олефинов. Неотъемлемой частью технологической схемы установки каталитического крекинга является регенератор, предназначенный для выжига кокса, отложившегося на поверхности катализатора в реакторе [1]. Эффективность работы регенератора определяет не только активность возвращаемого в реактор катализатора, но и тепловой баланс всей установки, а также экологические показатели производства (выбросы CO, CO_2, NO_x).

Сложность протекающих в регенераторе гидродинамических и тепло-массообменных процессов, протекающих в псевдоожиженном слое при высоких температурах (650-750 °C), затрудняет создание адекватных аналитических моделей. В связи с этим, разработка и верификация математических моделей регенератора является актуальной задачей, позволяющей прогнозировать режимы работы, оптимизировать конструктивные параметры и повысить эффективность процесса [2, 3].

Целью данной работы является разработка математической модели регенератора каталитического крекинга с псевдоожиженным слоем катализатора и анализ ее адекватности на основе промышленных данных.

Постановка задачи и математическая модель

Рассматривается типичный регенератор с псевдоожиженным слоем, в который поступает закоксованный катализатор из реактора и воздух на выжиг. В модели приняты следующие допущения:

1. Псевдоожиженный слой рассматривается как двухзонная система: плотная фаза (эмульсионная) и пузырьковая фаза.

2. В эмульсионной фазе концентрация катализатора максимальна, и протекает основная реакция выжига кокса.

3. Пузырьковая фаза содержит в основном газ (продукты горения и избыточный воздух) и является транспортной зоной.

4. Выжиг кокса описывается суммарной реакцией: $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Влиянием образования CO на первой стадии для упрощения пренебрегаем, но учитываем через эмпирический коэффициент полноты сгорания [4].

Математическая модель включает уравнения материального и теплового балансов для компонентов системы.

Уравнение материального баланса по коксу на катализаторе:

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{1}{H_{reg}} \left(G_{cat}^{in} \cdot C_c^{in} - G_{cat}^{out} \cdot C_c^{out} \right) - r_c ,$$

где C_c – концентрация кокса на катализаторе в слое, мас. %; H_{reg} – масса катализатора в слое, кг; G_{cat} – расход катализатора, кг/с; r_c – скорость выжига кокса, кг/с.

Скорость выжига кокса описана кинетическим уравнением первого порядка по концентрации кокса и парциальному давлению кислорода:

$$r_c = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_{reg}} \right) \cdot C_c \cdot P_{O_2}^n \cdot H_{reg} ,$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации, Дж/моль; T_{reg} – температура в регенераторе, К; P_{o2} – парциальное давление кислорода в пузырьковой фазе, атм; n – порядок реакции по кислороду (принят $n = 0.65$).

Уравнение теплового баланса регенератора:

$$\frac{dT_{reg}}{dt} = \frac{1}{m_{cat} \cdot c_{p,cat} + m_{gas} \cdot c_{p,gas}} \left(Q_{comb} - Q_{gas}^{out} + Q_{cat}^{in} - Q_{loss} \right),$$

где Q_{comb} – теплота, выделяемая при сжигании кокса; Q_{gasout} и Q_{catin} – потоки тепла с уходящими газами и поступающим катализатором; Q_{loss} – потери тепла в окружающую среду.

Парциальное давление кислорода в пузырьковой фазе рассчитывается на основе стехиометрии реакции горения с учетом эффективности массообмена между фазами.

Разработанная модель была реализована в программной среде MATLAB/Simulink. Расчетные значения температуры в слое регенератора (T_{reg}) и концентрации кокса на отработанном катализаторе (C_{cout}) были сопоставлены с промышленными данными, полученными на установке каталитического крекинга ПАО «Славнефть-ЯНОС».

Анализ результатов показал, что разработанная модель адекватно описывает динамику процесса. Относительная погрешность расчета температуры в стационарном режиме не превышает 1,5%, а для концентрации кокса – 7-10%. Чувствительность модели к изменению расхода воздуха и закоксованности катализатора подтверждает ее пригодность для оптимизационных задач.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что увеличение расхода воздуха на 10% выше оптимального приводит к неоправданному росту температуры на 25-30 °C, что может снизить активность катализатора, а снижение расхода – к неполному выжигу кокса и росту его содержания на регенерированном катализаторе выше 0,1 мас. %.

Разработана математическая модель регенератора установки каталитического крекинга, учитывающая гидродинамику двухфазного псевдоожиженного слоя и кинетику выжига кокса. Проведена верификация модели на основе промышленных данных,

показавшая ее удовлетворительную точность. Модель может быть использована для анализа стационарных и переходных режимов работы регенератора, оптимизации технологических параметров (расход воздуха, температура) и как составная часть комплексной модели всей установки каталитического крекинга в рамках концепции «цифрового двойника».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Гуданов, И.С. Современные технологии и оборудование углубленной переработки нефти. Каталитический крекинг / И.С. Гуданов, А.Е. Лебедев. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2015. – 180 с.

2) Сажин, А.В. Исследование теплопередачи через опору воздухораспределителя регенератора установки каткрекинга / А.В. Сажин, В.А. Тихомиров, А.В. Проворов // Семьдесят седьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2024. – С. 218-221.

3) Проворов, А.В. Методика расчета опоры постоянного усилия конструкции Witzenmann / А.В. Проворов, В.А. Тихомиров, К.С. Шлыков // Там же. – С. 226-230.

4) Смит Р.М. Химическая кинетика в нефтепереработке / пер. с англ. под ред. А.Л. Буланова. – М.: Химия, 2017. – 392 с.

УДК 621.929.6

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕШАЛОК РАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ФИКСИРОВАННЫХ ПАРАМЕТРАХ ПРОЦЕССА

И.П. Королев

Научный руководитель – **А.Е. Лебедев**, д-р техн. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Объектом исследования является анализ потока частиц материала при заданных параметрах процесса. Разработаны различные конструкции смесительных устройств и проведены экспериментальные исследования, которые показывают основные отличия представленных конструкций смесителей.

Ключевые слова: *мешалка, поток частиц, распределение, ячейки, смесительное устройство*

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS MIXER CONFIGURATIONS UNDER FIXED PROCESS CONDITIONS

I.P. Korolev

Scientific Supervisor – **A.E. Lebedev,** Doctor of Technical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The object of the study is the analysis of the material particle flow under given process parameters. Various designs of mixing devices have been developed, and experimental investigations have been conducted, which reveal the main differences between the presented mixer designs.

Keywords: *Agitator, particle flow, dispersion, compartments, mixing apparatus*

Процесс смешения сыпучих материалов является одним из самых распространенных методов переработки сыпучих сред. Основной задачей процесса смешения является получение смесей требуемого качества. Среди существующих конструкций аппаратов широкое применение нашли аппараты центробежного типа [1, 2]. Это обусловлено их низким энергопотреблением и возможностью получать смеси требуемого качества.

Цель данной работы заключается в проведении экспериментальных исследований и анализе полученных результатов для выявления влияния конструкции смесителя на распределение потока перемешиваемой среды.

Для исследования смесителей был выбран тип мешалки, представленный на рис. 1.

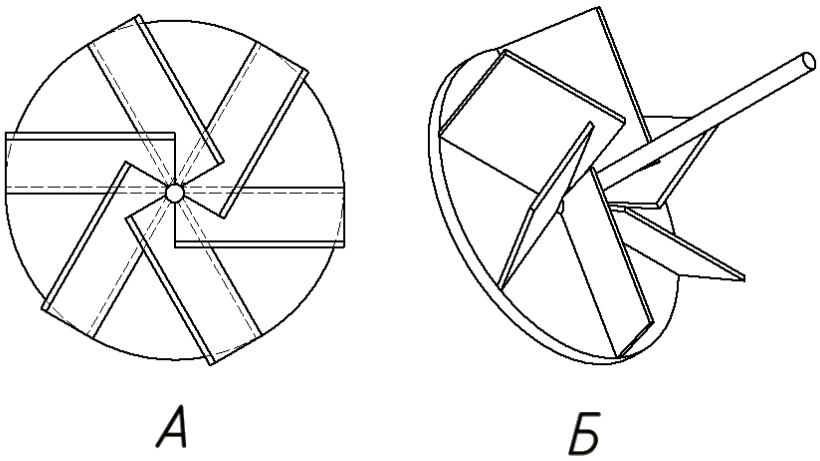


Рис. 1. Конструкция смесительного устройства:
А – вид сверху; Б – Изометрический вид

Различная конструкция смесительных устройств в данной работе обусловлена различными конструктивными параметрами, такими как угол наклона лопасти и количество лопастей. В работе рассматриваются 4 типа мешалок:

1) с 4-мя лопастями и углом наклона $60°$;
2) с 4-мя лопастями и углом наклона $45°$;
3) с 6-ю лопастями и углом наклона $60°$;
4) с 6-ю лопастями и углом наклона $45°$.

В качестве исходных данных задается число оборотов смесителя, равное 750 об/мин, количество исходного компонента, и положение мешалки относительно ловушки для материала. Таким образом достигаются фиксированные параметры процесса, что позволяет исследовать зависимость конструкции на распределение потока среды, выходящего из смесителя. Распределение потока исследуется путем замера количества материала в каждой ячейке ловушки.

В табл. 1 представлены полученные экспериментальные данные, которые показывают распределение потока частиц по ячейкам ловушки.

Таблица 1. Распределение частиц по сечению потока

Номер ячейки	Тип мешалки			
	1	2	3	4
	Количество материала, г			
1	0,03	0,08	0,07	0,00
2	0,04	0,32	0,12	0,06
3	0,09	1,40	0,21	0,13
4	0,36	2,45	1,30	1,14
5	2,13	2,00	2,40	2,83
6	2,16	0,98	0,99	2,00
7	0,44	0,46	0,35	1,01
8	0,20	0,48	0,32	0,63
9	0,17	0,24	0,17	0,31
10	0,14	0,28	0,14	0,53

Анализируя полученные данные, внесенные в табл. 1, можно увидеть, что распределение потока неравномерно по его ширине. Другими словами, при использовании мешалок 1-го и 4-го типа наблюдается характерная концентрация частиц в центральной части потока, в то время как у 2-го и 3-го типов распределение более равномерное.

Распределение потока напрямую влияет на качество смеси и энергозатраты всей установки. Полученные данные необходимы для анализа распределения разных сред, что позволит составить математические модели движения частиц потока и добиться получения смеси требуемого качества.

Данное исследование наглядно показывает влияние конструкции смесителя на распределение потока при одинаковых исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Макаров, Ю.И. Основы расчета процессов смешивания сыпучих материалов. Исследование и разработка смесительных аппаратов: дис. … д-ра тех. наук. – М.: 1975. – 430 с.

2) Бытев, Д.О. Основы теории и методы расчета оборудования для переработки гетерогенных систем в дисперсно-пленочном состоянии: дис. … д-ра техн. наук: 05.04.09. - Ярославль, 1995. - 544 с.

3) Расчет коэффициента неоднородности смеси при смешении сыпучих сред, частицы которых имеют различные размеры и форму // А.Е. Лебедев, А.И. Холодкова, А.А. Мурашов, А.А. Ватагин, И.П. Королев // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 8; URL: vdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10294.

4) Опытное изучение процессов смешивания сыпучих сред при взаимодействии дисперсных потоков / Ватагин А.А., Лебедев А.Е., Орлов Ф.С. Мурашов А.А. // Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. - 2023. - №3 (75). - С. 52-60.

5) Факторы эффективности ротационного смешения зернистого сырья для киберфизической платформы / А.Б. Капранова, Д.В. Стенько, Д.Д. Бахаева, А.А. Ватагин, А.Е. Лебедев / Вестник ТГТУ. – 2023. – Т. 29. – С 102-114.

УДК 544.77.051.1

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ ПОГРУЖНОГО ТИПА

Д.А. Крутилов, А.В. Ермолов, А.Б. Капранова

Научный руководитель – **А.Б. Капранова**, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В данной статье предложена методика по оценке степени перетира твердой фазы, выделены основные параметры, влияющие на проведения процесса, пояснены перспективы проведения данных опытов и их целесообразность.

Ключевые слова: *процесс диспергирования, эксперимент, лабораторная установка, бисерная мельница, мелющие тела, параметры процесса диспергирования*

ORGANIZATION OF THE EXPERIMENT IN STUDYING THE DISPERSION PROCESS IN A SUBMERSIBLE-TYPE BEAD MILL

D.A. Krutilov, A.V. Ermolov, A.B. Kapranova

Scientific Supervisor – **A.B. Kapranova**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

This article proposes a methodology for assessing the degree of grinding (dispersion) of the solid phase, identifies the main parameters influencing the process, and explains the prospects for conducting these experiments and their feasibility.

Keywords: *dispersion process, experiment, laboratory setup, bead mill, grinding media, parameters of the dispersion process*

Технологическая операция диспергирования соответствует процессу механического измельчения твердой фазы в жидкости с образованием дисперсные системы в форме суспензий, эмульсий, аэрозолей для применения в фармакологической, лакокрасочной, агропромышленной, пищевой отраслях промышленности, при производстве строительных материалов, косметики и парфюмерии [1]. К наиболее распространенному аппаратурному оформлению данного процесса относятся бисерные мельницы, обеспечивающие совмещение технологических операций тонкого помола твердой фазы и смешения компонентов рабочей смеси [2]. Интерес производителей к проблеме совершенствования конструкций бисерных мельниц связан с целевой программой энергосбережения и интенсификации производства указанных дисперсных продуктов. Повышение их качества связано с ростом энергоемкости вследствие наличия сил внутреннего сцепления твердой фазы и вязкого трения, а, следовательно, и проявления эффектов ре-агломерации и тепловыделения.

Предложенная авторами конструкция бисерной мельницы погружного типа легла в основу лабораторной установки для исследования процесса диспергирования твердой фазы до регламентных значений показателя помола рабочего материала [3]. Основным рабочим элементом аппарата [4] (рис. 1) является размольная корзина 3 (рис. 2). Электродвигатель 1 задает вращение ее рабочим элементам. Рабочая часть аппарата прикреплена к раме 2 с механизм подъема/опускания для размещения рабочих элементов в емкости с частично диспергированной смесью.

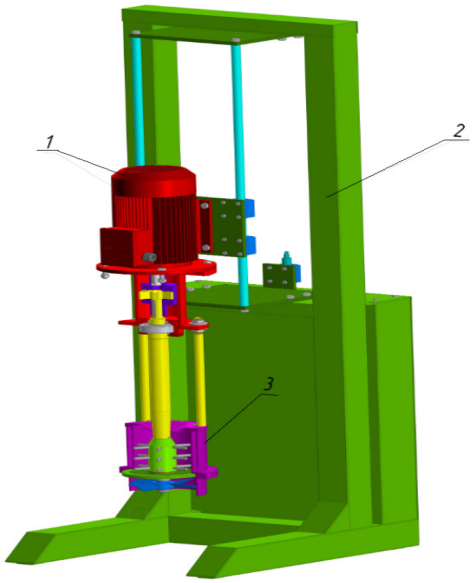


Рис. 1. Модель погружной бисерной мельницы:
1 – электродвигатель; 2 – рама; 3 – размольная корзина

Лабораторная установка позволяет варьировать размеры/объем элементов размольной корзины (см. рис. 2) и радиус/количество/вещество бисерных шаров, осуществляющих измельчение твердой фазы и способствующих интенсификации процесса смешения с жидкой фазой. Процесс диспергирования твердой фазы организован следующим образом. Корпус корзины 1 с отсеками А и Б помещен в емкость с диспергируемой смесью. На практике отсек А имеет заполнение бисером на 80%. В лабораторных условиях следует степень заполнения шарами отнести к переменным режимным параметрам наряду с частой вращения ротора для изучения влияния сначала одного, а потом другого фактора на опытный выбор рациональных диапазонов изменения конструктивных/режимных параметров процесса диспергирования. Пальцевый ротор 3, закрепленый на валу 2, предназначен для перемешивания шариков бисера и смеси в отсеке А. Полученная смесь проходит через отверстия 4 в днище отсека А корзины 1, попадает в отсек Б, в котором вращается лопастной вентилятор 5. Лопасти вентилятора ускоряют движение потока получаемой смеси, повышая интенсивность диспергирования. Таким образом, диспергируемая смесь проходит многократное измельчение внутри корзины.

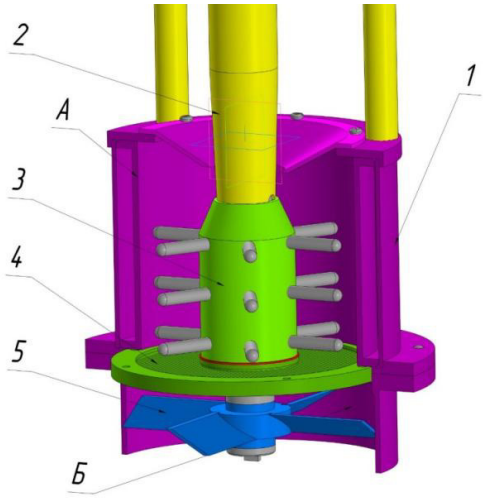


Рис. 2. Устройство корзины бисерной мельницы:
1 – корпус корзины; 2 – вал; 3 – пальцевый ротор;
4 – отверстия в рабочей корзине; 5 – лопастной вентилятор

На данной установке существует возможность управления параметрами процесса диспергирования твердого осадка, в табл. 1 приведены соответствующие виды информационных переменных.

Таблица 1. Виды основных информационных переменных процесса диспергирования твердой фазы

Основные информационные переменные процесса диспергирования твердой фазы			
Конструктивные	Режимные	Физико-химические	Регламентные
Размольная корзина			
Рабочие элементы размольной корзины: - диаметры/высоты цилиндрической/конической частей вала; - число/длина/ширина/ конфигурация пальца/лопасти каждого яруса; - габаритные размеры размольной корзины	- частота вращения ротора; - число ярусов с пальцами/ лопастями; - глубина погружения размольной корзины;	- истинные плотности веществ рабочих элементов; - коэффициенты внешнего /внутреннего трения	- мощность привода; - химическая нейтральность вещества;
Бисерные шары			
Бисерные шары: - радиус	- степень заполнения отсека А (или количество бисерных шаров);	- истинная плотность вещества бисерных шаров	- химическая нейтральность вещества;
Рабочая среда			
-	-	- исходный/ конечный грануло-метрический состав твердой фазы; - истинные плотности веществ дисперсной/ твердой фаз рабочей среды; - степень химической активности	- температура; - вязкость готового продукта/смеси; - степень перетира твердой фазы; - время диспергирования твердого осадка; - объемная/массовая доля компонентов готовой смеси

На первом этапе предлагается исследовать процесс измельчения мелового порошка в воде. Исходный размер частиц твердой фазы d = 100 мкм. Проводится анализ влияния параметров на качество готового продукта (например, частоты вращения ротора, времени протекания процесса, концентрации твердой фазы), вязкостных свойств суспензии на гранулометрический состав смеси. Эксперимент организован следующим образом: мельница выводится в рабочий режим с заданной частотой вращения вала двигателя в интервале от 500 до 1000 мин$^{-1}$, через равные временные промежутки проводится отбор проб при выборе варьируемых параметров из табл. 1. Процесс завершается при достижении заданной степени перетира твердой фазы (d = 30 мкм, тонкая категория помола ГОСТ 31973-2013). Аналогично изучается влияние вязкости исходной шихты на скорость протекания процесса и качество диспергирования.

На втором этапе исследуется совместное измельчение и смешение мелового порошка и твердых красителей (охры, умбры, сиены). Процесс протекает по схеме, разработанной для первого этапа.

Оценка качества процесса диспергирования – это не просто измерение частиц, это трудоемкая задача, включающая в себя выбор метода оценки качества продукта, выбор наиболее значимых параметров, построение закономерностей, статистическая обработка данных хода процесса, оценка полученных результатов и правильная их интерпретация. К характеристикам дисперсной системы относятся: размер частиц и их распределение, степень дисперсности (суммарная площадь поверхности всех частиц), однородность, стабильность во времени и др.

Основными методами оценки качества продукта являются следующие.

1. Гриндометр «Клин» - механический прибор, метод основан на визуальном осмотре, замер по шкале гриндометра.
2. Лазерная дифракция – измерение углового распределения интенсивности рассеянного света частицами.
3. Микроскопия – прямое визуальное наблюдение, оценка и измерение частиц по изображению.
4. Седиментационный анализ – измерение скорости оседания частиц в жидкости, под действием силы тяжести или в центрифугировании.

В описанной методики эксперимента предполагается применение методов: оценки качества продукта с помощью микроскопа; использование программного продукта для обработки опытных испытаний типа mixan (программного обеспечения для экспресс анализа смесей сыпучих материалов и эмульсий, расчета объемной/массовой доли компонентов и коэффициента однородности смеси, получения гистограмм распределения частиц материала по размерам)[6]. Анализ основан на обработке изображений проб, в нашем случае полученных на микроскопе.

Таким образом, в ходе эксперимента, будут выявлены опытные рациональные пределы изменения параметров процесса диспергирования твердой фазы, приближенные к параметрам реального процесса. Полученные данные помогут в проектировании диспергирующего оборудования и в дальнейшем позволят создать инженерную методику расчета параметров технологического процесса в соответствии с производственным регламентам для готового продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А.Г. Касаткин. – 9-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2014. – С. 246-259.

2) Островский, Г.М. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / Г.М. Островский. - Санкт-Петербург: Профессионал, 2004. – С. 721-729, С. 771-763.

3) Процессы и аппараты химической технологии: учебник / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А.Носов [и др.]. - Москва: БИНОМ, 2014. –С. 460-465.

4) Shwedes J., Bunge F. Comminution and transport behavior in agitated ball mills / J. Shwedes, F. Bunge // Advanced Powder Technology. - 1992. – Vol 3, №1. - P. 55-70.

5) ГОСТ 31973-2013. Материалы лакокрасочные. Метод определения степени перетира. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 8 с.

6) Mixan: программное обеспечение для анализа смесей и эмульсий // SourceForge: [site]. – URL: https://sourceforge.net/projects/mixan/files/v2.4.4/ (дата обращения: 27.03.2026).

УДК 66.011.001.55

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИДЕАЛЬНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ТРУБЧАТОГО РЕАКТОРА

Д.А. Наумов, Н.А. Чистяков, И.С. Гуданов

Научный руководитель – **И.С. Гуданов**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Была спроектирована и собрана лабораторная установка для изучения скорости вымывания вещества в общем потоке жидкости. Производится сравнение скорости вымывания индикатора при вводе его, в различных объёмах в поток воды с изменяющимся расходом.

Ключевые слова: *установка, анализ, опыт, расход, реактор, скорость вымывания.*

STUDY OF THE IDEAL DISPLACEMENT PROCESS IN A LABORATORY SETUP OF A TUBULAR REACTOR

D.A. Naumov, N.A. Chistyakov, I.S. Gudanov

Scientific Supervisor – **I.S. Gudanov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

A laboratory setup was designed and assembled to study the rate of leaching of a substance in a general liquid flow. The rate of indicator leaching is compared when injected, in varying volumes, into a water flow with varying flow rates.

Keywords*: installation, analysis, experiment, consumption, reactor, washout rate.*

Трубчатый реактор идеального вытеснения широко используется в химической промышленности для проведения реакций с высоким выходом и узким распределением времени пребывания реагентов, например при синтезе полимеров, окислении и гидрировании. В нефтепереработке он применяется в процессах крекинга и риформинга для получения топливных фракций. В фармацевтике и биотехнологиях реактор обеспечивает стерильные и контролируемые условия для культивирования микроорганизмов или синтеза лекарственных субстанций. Также он востребован в пищевой промышленности (например, для пастеризации и гомогенизации продуктов) и при переработке топливных материалов. Благодаря непрерывному режиму работы и отсутствию обратного перемешивания такой реактор позволяет получать продукт стабильного качества при минимальных энергозатратах.

В работе производится сравнение результатов лабораторного исследования над опытной установкой, собранной на кафедре под руководством И.С. Гуданова, и анализ работы установки (рис. 1-3).

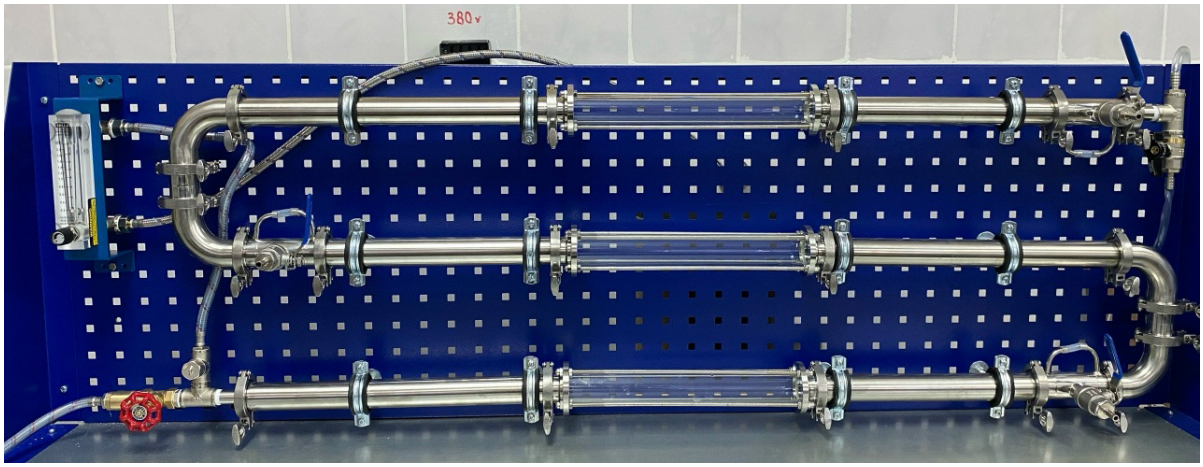


Рис. 1. Общий вид разработанной установки трубчатого реактора

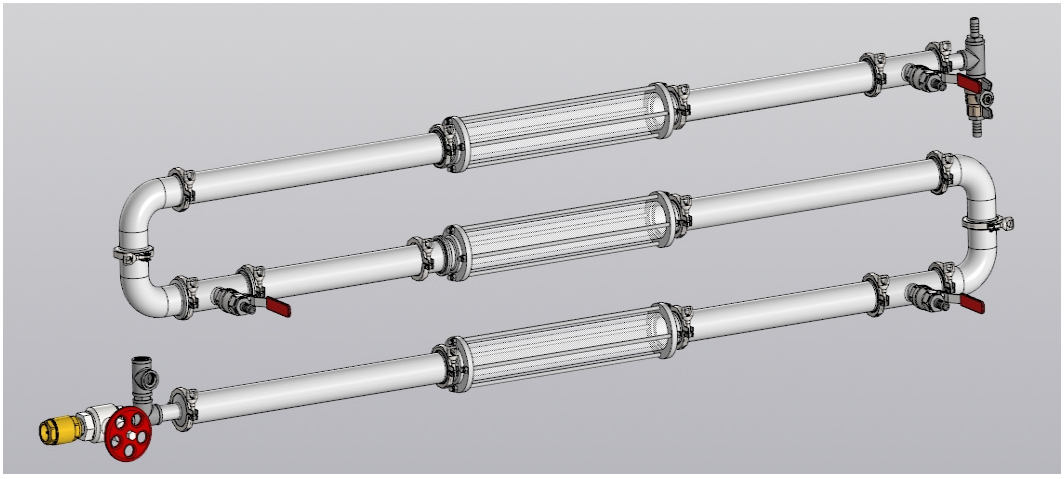


Рис. 2. 3Д-модель лабораторной установки трубчатого реактора

Для сравнения мы выполнили два опыта, в которых изменили объём вводимого индикатора. В первом опыте 1 см^3, во втором опыте 2 см^3.

Расход потока задавали с помощью ротаметра 20, 40, 60, 80 и 100 делений.

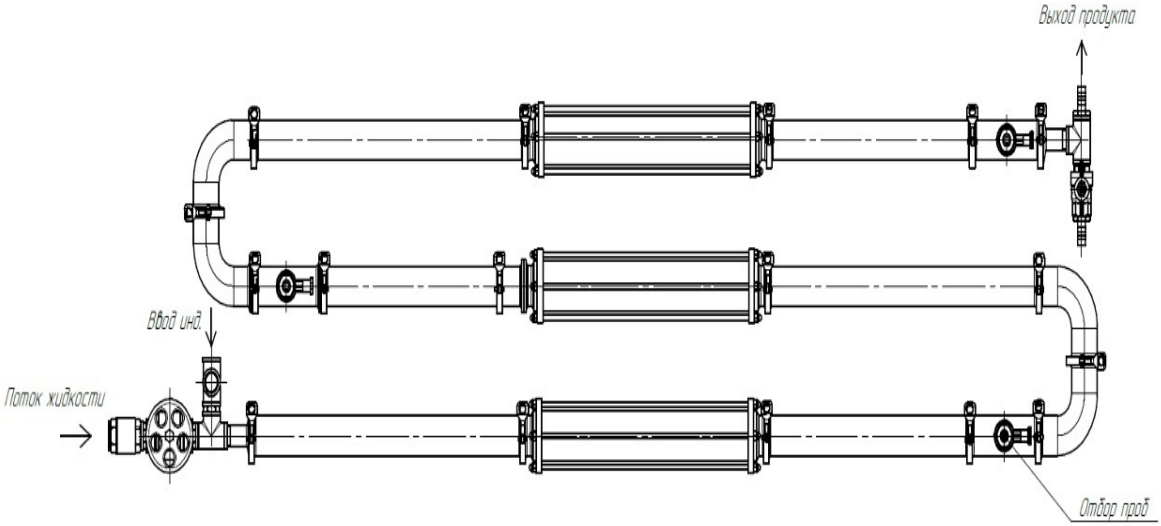


Рис. 3. Схема установки

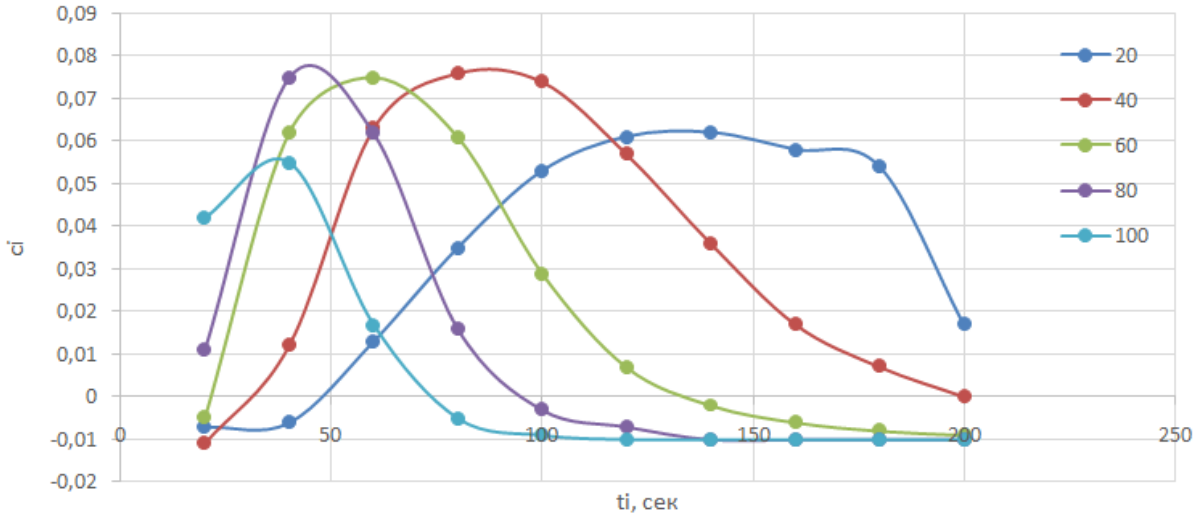


Рис. 4. Результаты первого опыта

Анализируя результаты первого опыта (рис. 4), мы можем наблюдать следующее:

- наблюдается ярко выраженная зависимость между расходом потока и временем достижения пиковой концентрации. С увеличением расхода пик концентрации смещается влево по оси времени, что указывает на сокращение времени пребывания индикатора в реакторе;
- форма кривых вымывания для всех расходов имеет асимметричный вид: резкий подъём концентрации и более плавный спад. Это характерно для режимов, приближающихся к идеальному вытеснению, но с наличием некоторого продольного перемешивания;
- при минимальном расходе (20 делений) кривая вымывания сильно растянута во времени, а максимальная концентрация не достигает ожидаемого уровня. Это свидетельствует о том, что при низких скоростях потока возрастает роль диффузионных процессов и неравномерности распределения индикатора по сечению реактора.

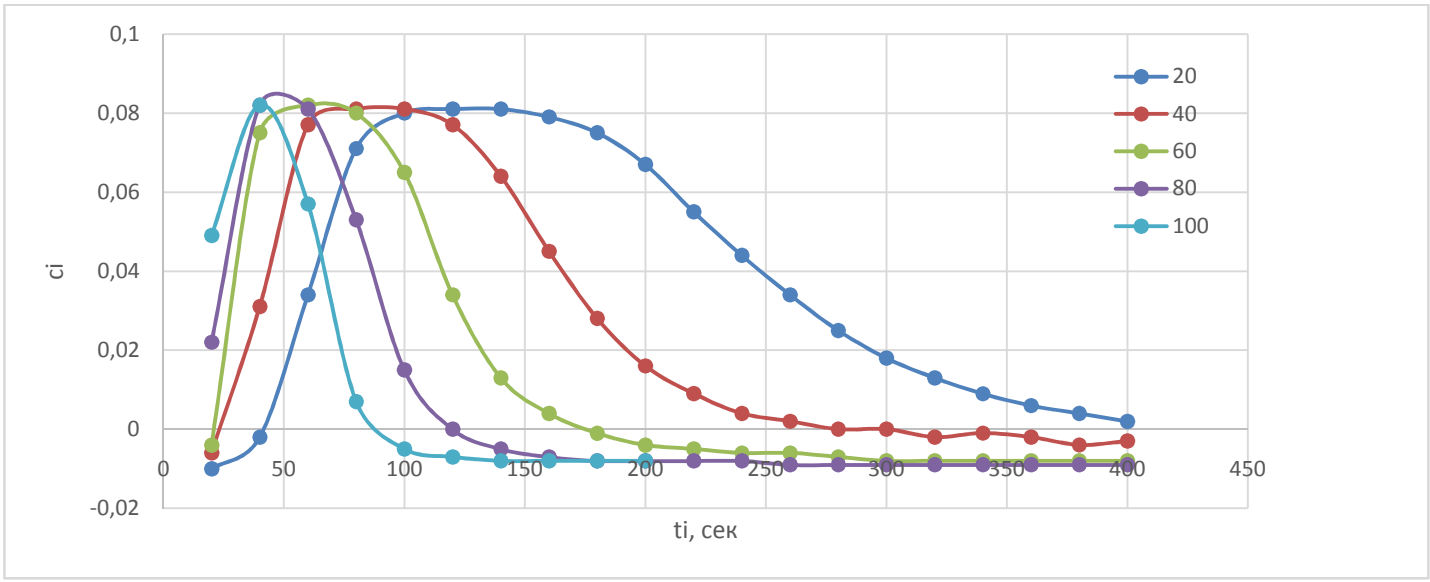


Рис. 5. Результаты второго опыта

По результатам второго опыта получаем следующие выводы:

- в отличие от первого опыта, во втором опыте для всех расходов наблюдается чётко выраженный пик концентрации, что подтверждает увеличение объёма индикатора, повышает информативность измерений и позволяет более достоверно регистрировать процесс вытеснения даже при высоких расходах;
- при объёме индикатора 2 см³ форма кривых вымывания становится более симметричной, что приближает режим работы установки к идеальному вытеснению. Это объясняется тем, что больший объём индикатора лучше «заполняет» сечение трубы и снижает влияние застойных зон;
- несмотря на двукратное увеличение времени отбора проб, при максимальном расходе (100 делений) кривая остаётся достаточно крутой, что говорит о необходимости ещё более частого отбора проб или использования автоматизированной системы регистрации концентрации для точного определения пиковых значений;
- сравнение первого и второго опытов показывает, что объём вводимого индикатора является критическим параметром при исследовании реакторов идеального вытеснения: слишком малый объём может маскировать реальную кинетику процесса, а оптимально подобранный объём позволяет получить полную и достоверную информацию о гидродинамике потока.

На основании проведенного сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

1) Разработанная лабораторная установка трубчатого реактора идеального вытеснения позволяет успешно моделировать и исследовать процесс вымывания индикатора в зависимости от расхода потока жидкости и объёма вводимого вещества. Установка демонстрирует хорошую воспроизводимость результатов и пригодна для изучения гидродинамических режимов.

2) Подтверждена ключевая закономерность реакторов идеального вытеснения: с увеличением расхода потока время вымывания индикатора сокращается, а скорость процесса возрастает. При малых расходах наблюдается недостаточно интенсивное вытеснение, при больших — процесс происходит настолько быстро, что фиксация пиковой концентрации затруднена.

3) Увеличение объёма вводимого индикатора с 1 до 2 см³ приводит к существенному повышению степени вытеснения, что выражается в достижении пиковых значений концентрации для всех исследованных расходов. Однако это требует пропорционального увеличения времени отбора проб.

4) Таким образом, спроектированная установка может быть рекомендована для использования в учебном процессе и научных исследованиях, направленных на изучение кинетики вытеснения, оптимизацию параметров работы проточных реакторов, а также для демонстрации принципов работы трубчатых реакторов идеального вытеснения в химической, нефтеперерабатывающей, фармацевтической и пищевой промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Классификация и конструкция реакторов, применяемых в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: Учебно-методическое пособие / Х.Х. Ахмадова, Ж.Т. Хадисова, Э.У. Идрисова [и др.]. – Грозный: ГГНТУ, 2021 – 208 с.

2) Воронцов, К.Б. Химические реакторы: учебное пособие. – Москва: Эдитус, 2017. – 77 с.

3) Арис, Р. Анализ процессов в химических реакторах / Пер. с англ. канд. хим. наук. Л.М. Письмена; под ред. д-ра хим. наук. проф. И.И. Иоффе. – Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1967. – 330 с.

4) Рейхсфельд, В.О. Реакционная аппаратура и машины заводов основного органического синтеза и синтетического каучука / В.О. Рейхсфельд, В.С. Шеин, В.И. Ермаков. – Ленинград: Химия, Ленингр. отд-ние,1975. – 392 с.

УДК 621.646

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ: АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

А.В. Смирнова, А.В. Грызунов, А.М. Иванов

Научный руководитель - **А.Б. Капранова**, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются основные проблемы эксплуатации запорной арматуры трубопроводных систем и современные методы их решения. Выявлены ключевые причины отказов оборудования. Представлены результаты исследования эффективности современных методов диагностики. Показана экономическая эффективность предложенных решений.

Ключевые слова: *запорная арматура, диагностика оборудования, композитные материалы, техническое обслуживание, экономическая эффективность, инновационные технологии, трубопроводные системы*

SHUT-OFF VALVE OPERATION PROBLEMS: FAILURE ANALYSIS AND PRACTICAL SOLUTIONS

A.V. Smirnova, A.V. Gryzunov, A.M. Ivanov

Scientific Supervisor – **A.B. Kapranova**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the main problems of operating shut-off valves in pipeline systems and modern methods of solving them. The key causes of equipment failures are identified. The results of a study on the effectiveness of modern diagnostic methods are presented. The economic efficiency of the proposed solutions is shown.

Keywords: *shut-off valves, equipment diagnostics, composite materials, maintenance, economic efficiency, innovative technologies, pipeline systems*

Запорная арматура, будучи ключевым элементом трубопроводных систем, подразделяется на клапаны, задвижки, краны и затворы, каждый тип имеет специфические области применения и уязвимости [1]. Статистика аварий в нефтегазовой отрасли за 2020-2023 гг. показывает, что 67% отказов связаны с коррозией уплотнительных поверхностей и деформацией штоков под воздействием агрессивных сред. Экспериментальные исследования на стендах ООО «Транснефть-Приволга» подтвердили, что цикличные нагрузки ускоряют износ резьбовых соединений в 1,8 раза по сравнению со статическими режимами.

Анализ причин отказов выявил три доминирующих фактора: химическую коррозию (42% случаев), абразивный износ от взвесей в транспортируемой среде (31%) и усталостные трещины в литых корпусах (19%). Особую опасность представляют кавитационные процессы в регулирующих клапанах, приводящие к локальным разрушениям за 3-5 месяцев эксплуатации. По данным Ростехнадзора 78% инцидентов происходят на участках с температурными перепадами свыше 80 °C, что требует пересмотра стандартов выбора материалов. Рис. 1 иллюстрирует основные причины отказов запорной арматуры.

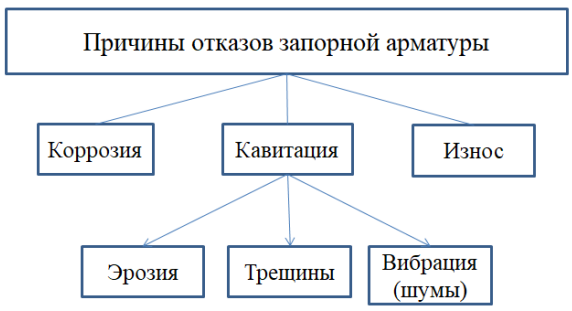


Рис. 1. Причины отказов запорной арматуры

Особое внимание уделяется оценке рисков эксплуатации подземных трубопроводов с учётом параметров окружающего грунта [6]. Современные методы диагностики включают виброакустический контроль, термографию и ультразвуковую дефектоскопию, однако их эффективность варьируется в зависимости от типа арматуры и представлены на рис. 2.

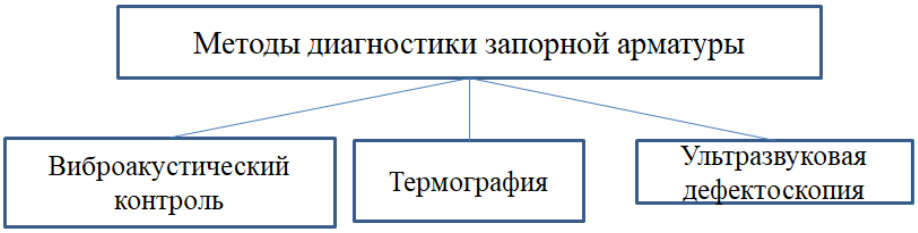


Рис. 2. Методы диагностики запорной арматуры

Диагностический комплекс «Камертон» представляет собой современное решение для оценки технического состояния запорной арматуры, как отмечено в исследованиях [8], демонстрирует превосходство в оценке остаточного ресурса задвижек за счёт комбинации спектрального анализа и нейросетевого прогнозирования. Его внедрение на предприятиях горной промышленности снизило частоту внеплановых ремонтов на 23% за счет раннего выявления микротрещин.

Ремонтные технологии разделяются на восстановительные (наплавка, лазерная кладка) и заменяющие (установка композитных вкладышей). Гидроабразивная очистка показала эффективность 92% при удалении отложений в шаровых кранах, но требует дорогостоящего оборудования. Ограничением гальванического напыления остаётся низкая адгезия покрытий к чугуну при температурах ниже -15 °C, что сужает область применения в северных регионах.

Перспективным направлением признано использование съёмных диагностических модулей с датчиками давления и вибрации, передающих данные в режиме реального времени. Их интеграция с системами SAP EAM позволяет автоматизировать планирование ТО, сокращая человеческий фактор. Однако для арматуры малых диаметров (<50 мм) такая модернизация экономически нецелесообразна, что актуализирует поиск компромиссных решений.

Цифровое моделирование играет ключевую роль в оптимизации конструкций запорной арматуры. Современные методы математического моделирования сложноструктурированных объектов [7] позволяют учитывать множество параметров: от реологических свойств, транспортируемых сред до температурных режимов эксплуатации. Оптимизация конструкций предполагает замену традиционных сталей на углепластики и керамоматричные композиты, чьи преимущества подтверждены имитационным моделированием. Математическое моделирование технологических систем с распределенными параметрами [4] позволяет прогнозировать поведение материалов в различных условиях эксплуатации.

Применение композиционных материалов, как указано в [3, 5], повышает жесткость задвижек на 40% при снижении массы на 28%, что критично для подвесных трубопроводов. Лабораторные испытания образцов с карбидкремниевым напылением показали увеличение ресурса уплотнений до 15 000 циклов против 8 000 у стандартных версий. Инновацией стало создание биметаллических клапанов с внутренним слоем из хастеллоя С-276, устойчивым к сероводородной коррозии. Их внедрение на месторождениях Ямала сократило утечки на 91%, но требует переработки технологических карт сварки. Для криогенных сред разработаны полнопроходные краны с керамическими седлами, сохраняющие герметичность при -196 °C, однако их стоимость на 35% выше аналогов. Цифровые двойники арматуры, учитывающие реологические свойства транспортируемых сред, позволяют прогнозировать износ с погрешностью 7-12%.

Алгоритмы машинного обучения на базе данных SCADA-систем корректируют параметры уплотнений под динамические нагрузки. Пилотный проект в «Газпромнефти» подтвердил, что такой подход увеличивает межремонтный интервал на 18 месяцев. Важным направлением остаётся стандартизация присоединительных размеров композитных узлов для совместимости с существующей инфраструктурой. Разработанные ОСТ 153-39.3-083-2023 регламентируют требования к полимерным уплотнениям, исключая риск расслоения при гидроударах. Параллельно ведутся работы по созданию саморегенерирующихся покрытий на основе микрокапсул с эпоксидными смолами.

Экономический анализ внедрения композитных решений выявил окупаемость за 2,3 года благодаря снижению затрат на ремонт и простои. Как отмечено в работах [2, 8], обслуживание по техническому состоянию уменьшает эксплуатационные расходы предприятий на 17-22%, что особенно значимо для магистральных нефтепроводов. Модель жизненного цикла, разработанная ВНИИГАЗ, доказывает, что переход на биметаллические клапаны даёт чистую приведённую стоимость проекта, которая показывает реальную экономическую эффективность инвестиций с учётом времени и рисков 4.8 млн рублей на 1 км трубопровода за 10 лет. Стандартизация рекомендаций потребовала ранжирования технологий по критериям «стоимость-эффективность» для разных отраслей. Для химических производств приоритетны керамоматричные композиты, тогда как в ЖКХ оптимальны полимерные вкладыши. Внедрение цифровых паспортов оборудования, интегрированных с ЕГИСОПТ, сократит время согласований на 45%, но требует обновления нормативной базы Росстандарта. Ключевой рекомендацией стало создание отраслевых центров компетенций для обучения методам неразрушающего контроля и работе с композитами. Пилотные программы в Тюменском индустриальном университете показали рост квалификации инженеров на 34% по результатам аттестаций. Параллельно необходимо финансирование НИОКР в области гибридных материалов, что соответствует стратегии Минпромторга по импортозамещению.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Современные методы диагностики, включая комплекс «Камертон», позволяют снизить внеплановые ремонты на 23% за счет раннего выявления дефектов.

2. Инновационные решения показали высокую эффективность увеличения жесткости задвижек на 40%; снижение массы конструкций на 28%; росту ресурса уплотнений до 15 000 циклов; сокращение утечек на 91% при использовании биметаллических клапанов.

3. Экономическая эффективность внедрения современных технологий подтверждается окупаемостью за 2.3 года и снижением эксплуатационных расходов на 17-22%

4. Перспективные направления развития включают: применение композитных материалов; внедрение цифровых технологий мониторинга; разработку саморегенерирующихся покрытий; создание интеллектуальных систем управления.

Таким образом, комплексное применение современных методов диагностики, инновационных материалов и цифровых технологий позволяет существенно повысить надежность и эффективность эксплуатации запорной арматуры при экономически обоснованных затратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Номенклатурный каталог на освоенные и серийно выпускаемые изделия арматуростроения на 1981 г. / М.М. Агапов, Н.А. Воронова, Т.Ю. Жукова [и др.]. — Москва: Цинтихимнефтемаш, 1981.

2) Агафонов, А.С. Экономическая эффективность внедрения инноваций в отраслях реального сектора экономики // Российский экономический вестник. — 2025. — № 3. — С. 399–405.

3) Полимерные материалы для защиты нефтепроводов / В.А. Гольдаде, И.В. Царенко, М.П. Кульгейко [и др.] // Чрезвычайных ситуации: образование и наука. — 2016. — № 1. — С. 75–79.

4) Демиденко, Н.Д. Моделирование и оптимизация технологических систем с распределенными параметрами / Н.Д. Демиденко, Л.В. Кулагина // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 3. – С. 55–62

5) Евстифеев, В.В. Композиционные материалы в машиностроении: Методические указания к лабораторной работе / В.В. Евстифеев, В.И. Матюхин, В.В. Акимов. — Омск: СибАДИ, 2012. — 16 с.

6) Методика определения наличия рисков эксплуатации подземных трубопроводов с учетом влияния параметров окружающего грунта / Л.Я. Жовтуля, С.П. Ващишак, В.С. Цих [и др.] // NDT days 2016 / Дни на безразрушителния контрол. – 2016. – № 1. – С. 329–332

7) Лащенов, Д.П. Математическое моделирование и оптимизация сложноструктурированных объектов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – № 4. – С. 1–10.

8) Диагностирование трубопроводов и запорно-распределительной арматуры методом анализа возбужденных колебаний / Н.Н. Софьина, Д.И. Шишлянников, А.В. Николаев [и др.] // Горная промышленность. – 2024. – № 5. – С. 122–128.

УДК 544.77.051.1

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОТОРА БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В.А. Тихомиров, А.В. Ермолов, А.Б. Капранова

Научный руководитель – **А.Б. Капранова**, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

В статье представлена параметрическая модель ротора бисерной мельницы погружного типа, описаны конструкция ротора и расчет параметров модели методом конечных элементов по заданным параметрам.

Ключевые слова: *диспергирование, параметрическая модель, расчет, метод конечных элементов, бисер, бисерная мельница*

PARAMETRIC MODEL OF A BEAD MILL ROTOR

V.A. Tikhomirov, A.V. Ermolov, A.B. Kapranova

Scientific Supervisor – **A.B. Kapranova**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The article presents a parametric model of a submersible bead mill rotor, describes the rotor design and calculation of the model parameters using the finite element method based on the given parameters.

Keywords: *dispersion, parametric model, calculation, finite element method, beads, bead mill*

В настоящее время наиболее распространенным способом конструирования нового оборудования в машиностроении является применение системы автоматического проектирования (САПР) на основе параметрического 3D проектирования. Параметрические модели позволяют определить оптимальное сочетание основных и конструктивных размеров, провести необходимые проектные и проверочные расчеты, а также за короткий срок откорректировать изделие или получить множество вариантов его исполнения [1, 5, 6].

Цель работы – параметрическое проектирование ротора, как основного конструктивного элемента погружной бисерной мельницы для выполнения прочностных расчетов, создание базы для расчета других исполнений и типов конструкций ротора. Бисерные мельницы предназначены для реализации процесса диспергирования в жидкости. Этот процесс заключается в разрушении твердых частиц до измельченной фракции с параллельным смешиванием этих фракций между собой в жидкой среде. Данные аппараты широко используются в лакокрасочной, пищевой, химической промышленности, и др.

На кафедре ТиПМ ЯГТУ спроектирована современная конструкция бисерной мельницы погружного типа на основе принципа параметрического 3D моделирования [4]. Основным узлом аппарата является рабочая корзина, размольная камера которой наполнена бисером, приводимым в движение вращающимся ротором [3].

Объектом настоящего параметрического проектирования и дальнейшего расчета является ротор (рис. 1, *а* и *б*), в состав которого входит вал 1 с закрепленным подшипником 2, звезды 3 (№ 1), 4 (№ 2) и 5 (№ 3), которые придают бисеру движущий импульс, дистанционные втулки 6, 7 пропеллера для обеспечения циркуляции потока.

Входными параметрами для расчета рабочего органа бисерной мельницы являются характеристики двигателя: мощность (P), частота вращения (n), крутящий момент (T), примерная масса бисера (m), допускаемое напряжение при кручении ($[\tau]$), диаметр звезды (d) [1].

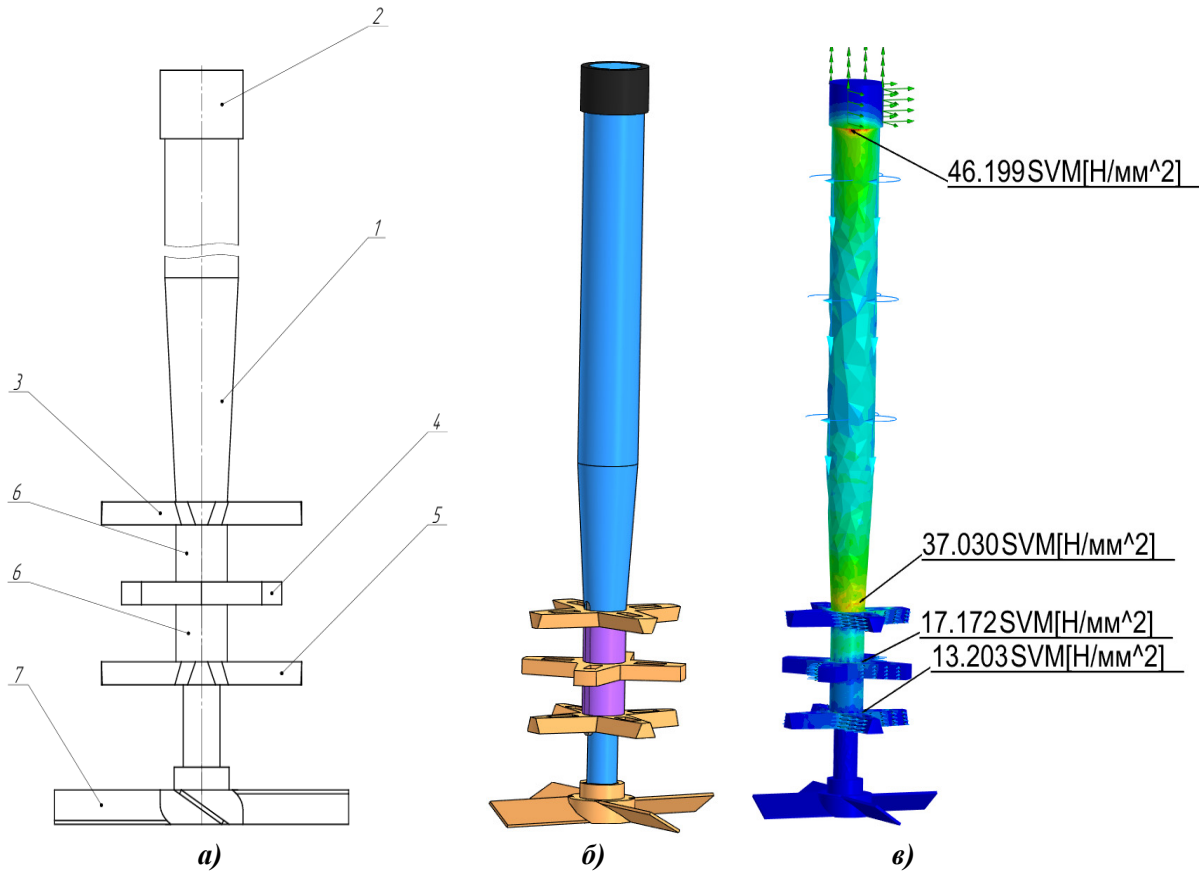


Рис. 1. Схемы ротора бисерной мельницы:
а – общий вид; *б* – 3D-модель; *в* – распределение напряжений

На основе значений входных параметров рассчитываются: диаметр вала (D), угловая скорость (w), центростремительное ускорение (a), масса бисера, действующая на одну звезду (m_1). Для расчета нагружений на лопасти звезды требуется ввести коэффициент неравномерности (k). Пусть звезда № 3 равномерно нагружена, звезды № 1 и № 2 имеют соответственно значительную и незначительную неравномерность по площади.

Таблица 1. Параметры корзины бисерной мельницы погружного типа

№ п/п	Наименование переменной	Единица измерения	Обозначение / уравнение	Значение
1	Мощность двигателя	кВт	P	2,2
2	Частота вращения двигателя	об/мин	n	1500
3	Крутящий момент	Н · мм	T	14010
4	Допускаемое напряжение при кручении	МПа	$[\tau]$	20
5	Диаметр вала	мм	$D \geq \sqrt[3]{\frac{T \cdot 10^3}{0{,}2 \cdot [\tau]}}$	24
6	Угловая скорость	рад/с	$w = 2\pi n$	157
7	Диаметр звездочки	мм	d	110
8	Центростремительное ускорение	м/с^2	$a = \frac{dw^2}{2}$	1357
9	Масса бисера	кг	m	2,5
10	Масса бисера, действующая на одну звезду	кг	$m_1 = m/3$	0,833

Окончание таблицы 1

11	Коэффициент неравномерности звезды № 1			
11.1	Лопасть1	-	k_{11}	0,3
11.2	Лопасть2	-	k_{12}	0,45
11.3	Лопасть3	-	k_{13}	0,17
11.4	Лопасть4		k_{14}	0,08
12	Коэффициент неравномерности звезды № 2			
12.1	Лопасть1	-	k_{21}	0,3
12.2	Лопасть2	-	k_{22}	0,3
12.3	Лопасть3	-	k_{23}	0,18
12.4	Лопасть4	-	k_{24}	0,22
13	Коэффициент неравномерности звезды № 3			
13.1	Лопасть1	-	k_{31}	0,25
13.2	Лопасть2	-	k_{32}	0,25
13.3	Лопасть3	-	k_{33}	0,25
13.4	Лопасть4	-	k_{34}	0,25
14	Нагрузка звезды № 1 на следующие элементы			
14.1	Лопасть1	Н	$F_{11} = k_{11}m_1a$	339
14.2	Лопасть2	Н	$F_{12} = k_{12}m_1a$	510
14.3	Лопасть3	Н	$F_{13} = k_{13}m_1a$	192
14.4	Лопасть4	Н	$F_{14} = k_{14}m_1a$	91
15	Нагрузка звезды № 2 на следующие элементы			
15.1	Лопасть1	Н	$F_{21} = k_{21}m_1a$	339
15.2	Лопасть2	Н	$F_{22} = \mathrm{k}_{22}m_1a$	339
15.3	Лопасть3	Н	$F_{23} = k_{23}m_1a$	205
15.4	Лопасть4	Н	$F_{24} = k_{24}m_1a$	249
16	Нагрузка звезды № 3 на следующие элементы			
16.1	Лопасть1	Н	$F_{31} = k_{31}m_1a$	283
16.2	Лопасть2	Н	$F_{32} = k_{32}m_1a$	283
16.3	Лопасть3	Н	$F_{33} = k_{33}m_1a$	283
16.4	Лопасть4	Н	$F_{34} = k_{34}m_1a$	283
17	Максимальное напряжение по Мизесу	МПа	$\sigma_{\max}$	46
18	Допускаемые напряжения	МПа	$[\sigma]$	147

На основе сформированной параметрической таблицы 1 была разработана модель для расчета параметров ротора в системе КОМПАС 3Д с последующими вычислениями методом конечных элементов в программе АРМ FEM [2].

Результат расчета оценивался с помощью распределения эквивалентных напряжений по Мизесу. Как видно на картине распределения напряжений (рис. 1, *в*), наиболее нагруженными является участок вала в верхней его части, где находится подшипник, и участок в районе закрепления верхней крыльчатки, т.к. здесь возникают наибольшие напряжения изгиба. Максимальное напряжение не превышает значения σ_{max}= 46 МПа, что в 3 раза меньше допускаемого напряжения [σ] =147 МПа. Таким образом, ротор выдерживает заданные нагрузки и обладает повышенным запасом прочности. В расчетах не учтены некоторые факторы (сила трения, вязкость суспензии), но данные упрощения расчетной схемы оправданы высоким коэффициентом запаса прочности.

Итак, использование параметрического проектирование позволило быстро и с высокой точностью провести проектные и прочностные расчеты основных узлов нового аппарата, получить картину распределения напряжений и проанализировать степень нагруженности деталей, что помогло наметить пути удешевления конструкции и снижения металлоемкости. Параметризация обеспечивает быструю настройку конструкции под разные требования и позволяет оперативно разрабатывать новые образцы путем масштабирования.

Исходя из вышеизложенного, параметрическое моделирование повышает культуру и качество конструирования, сокращает время и затраты на разработку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Тихомиров, В.А. Параметрическое проектирование узла мелющего аппарата погружного типа / В.А. Тихомиров, А.В. Ермолов, А.Б. Капранова // Математические методы в технологиях и технике – 2025. – № 12-3. – С. 77- 80.

2) Григорьев, Б.В. КОМПАС – 3D v19. Работа с библиотекой APM_FEM: Учебное-методическое пособие для студентов направления «Техническая физика» и «Ландшафтная архитектура» / Б. В. Григорьев, А. А. Лучкин. – Тюмень: Изд-во Тюм. госуд. ун-та, 2020. – 70 с.

3) Ермолов, А.В. Анализ разновидностей современного диспергирующего оборудования // А.В. Ермолов, С.Л. Мазуровский, А.Б. Капранова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2023. – № 6. – С. 116-124.

4) Патент № 2836345 C2 Российская федерация, МПК B02C17/16. Корзина погружной бисерной мельницы: заявка № 2024126920; заявл. 12.09.2024; опубл. 13.03.2025; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО ЯГТУ / А.В. Ермолов, С.Л. Мазуровский, А.Б. Капранова.

5) Совершенствование процесса диспергирования твердого осадка в бисерной мельнице погружного типа с элементами прототипирования конструкции / В.А. Тихомиров, А.В. Ермолов, Д.Д. Бахаева, А.Б. Капранова // ПАХТ-2025: Международный научно-практический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения Ю. И. Дытнерского, 10–11 апреля 2025 г., Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева: материалы конференции. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2025. – С. 250-254.

6) Тихомиров, В.А. Параметрическое проектирование конструкции мелющей корзины бисерной мельницы погружного типа / В.А. Тихомиров, А.В. Ермолов, А.Б. Капранова // Семьдесят восьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием «Научные разработки и инженерные кадры для технологического лидерства России». (23 апреля 2025 г., Ярославль): сб. материалов конференции. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2025. – С. 358-361. – 1 CD-ROM.

УДК 608.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЫПУЧЕЙ СМЕСИ

Д.В. Федорова, **В.С. Егоров, А.Б. Капранова**

Научный руководитель – **А.Б. Капранова**, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Произведен анализ экспериментальных данных для режимов работы лабораторной центробежной установки для получения сыпучей смеси, используемой в качестве сорбента при изготовлении парафино-восковых покрытий.

Ключевые слова: *процесс, смешение, центробежный аппарат, смесь сыпучая, сырье*

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF OPERATING MODES OF A LABORATORY CENTRIFUGAL UNIT FOR PRODUCING A BULK MIXTURE

D.V. Fedorova, V.S. Egorov, A.B. Kapranova

Scientific Supervisors - **A.B. Kapranova**, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

An analysis of experimental data was performed for the operating modes of a laboratory centrifugal unit for obtaining a bulk mixture used as a sorbent in the manufacture of paraffin-wax coatings.

Keywords: *process, mixing, centrifugal apparatus, bulk mixture, raw materials*

Анализ процесса смешения сыпучих компонентов с позиций систематизации и структурирования играет важную роль при проектировании смесительных аппаратов для различных отраслей промышленности. При выполнении этой задачи следует учитывать набор режимных, конструктивных параметров изучаемого процесса, а также механические свойства сыпучих материалов.

В данной работе основной целью является экспериментальный исследовательский процесс смешения сыпучих компонент в центробежном аппарате (с каналами прямоугольной формы) и результирующий анализ эксперимента для фиксации воздействия частоты вращения насадки на распределение количества частиц сыпучего компонента по высотной характеристике ловушки (рис. 1). При условии создания рационального режима работы центробежный аппарат можно отнести к надежному оборудованию, позволяющему избежать разделения частиц на фракции/компоненты.

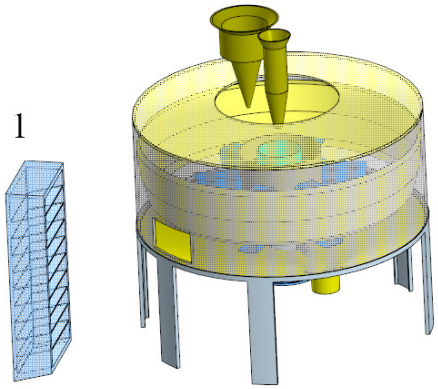
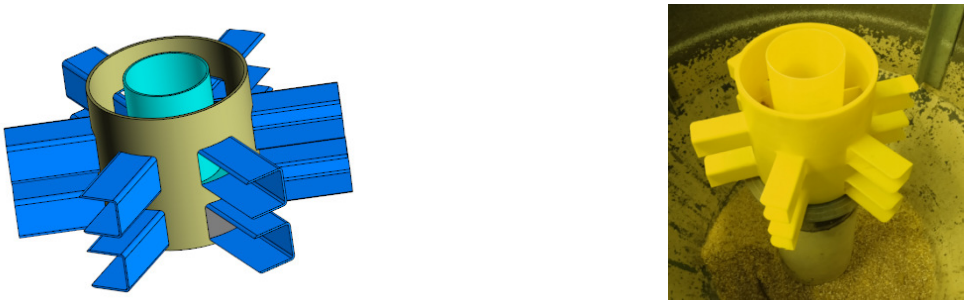


Рис. 1. Трехмерная модель лабораторной установки

Для анализа воздействия конструктивных и режимных параметров на процесс смешения, распределение количества частиц, выявления основных характеристик процесса проведен эксперимент по распылению частиц сыпучих материалов в центробежном агрегате (см. рис. 1). Разработанный лабораторный центробежный агрегат с насадкой (с прямоугольными лопатками и двумя камерами, рис. 2) дополнен вертикальной ячеистым уловителем 1. Для уменьшения воздействия массово-центрических характеристик, смесительная насадка изготовлена на 3D-принтере.

Распределительные каналы примененной формы, расположенные в горизонтальной плоскости каждой из камер (внутренней и внешней), примыкают к наружной цилиндрической поверхности цилиндрической насадки (см. рис. 2). В процессе смешения одна составляющая разбрасывается прямоугольными лопатками внешней камеры, а другой – прямоугольными лопатками внутренней камеры. Формирование смеси осуществляется разреженными потоками, взаимопроникающими друг в друга.



а) *б)*

Рис. 2. Смесительная насадка:
а – трехмерная модель; *б* – испытательная насадка

Расстояние от ловушки до смесительной насадки составило 20 см, размеры ловушки (20x10x5) см, угол наклона ловушки 5°. Частота вращения изменялась при помощи лабораторного автотрансформатора и замерялась механическим тахометром. Частота вращения насадки в экспериментах: {350, 500, 750} мин$^{-1}$.

С учетом алгоритма работы смесительного устройства [8] эксперименты проводились в три этапа.

Этап 1 – компонент (k = 1) с применением питателя-дозатора загружается в центральную камеру аппарата диаметром $D_1 = 7{,}6 \cdot 10^{-2}$ м. Частицы выбрасываются из насадки через прямоугольные каналы. После выхода из этих каналов образуется разреженный поток частиц, вылетающий из окна корпуса и направленный на вертикальную ловушку, разделенную на ячейки общим числом N = 10 (нумерация ячеек – снизу вверх). После оседания частиц компонента в ячейках ловушки определяется количество n_i частиц в i-й ячейке и соотношение n_i/m (где m – суммарная масса частиц во всех ячейках).

Этап 2 – повтор всех действий этапа 1 для ключевого компонента (k = 1) с определением соответствующих значений соотношения n_i/m.

Этап 3 – компонент (k = 2) смеси вводится другим питателем-дозатором в соосную камеру диаметром $D_2 = 1{,}44 \cdot 10^{-1}$ м (через которую проходят прямоугольные каналы), с последующим выходом частиц из насадки. При прохождении частиц транспортирующего компонента вдоль лопаток вращающейся насадки обеспечивается равномерность подачи материала в рабочую камеру центробежного аппарата-смесителя [8]. Получаемый поток частиц из окна корпуса движется в направлении ячеистой ловушки, где частицы определяются в ячейках. Далее (в соответствии с 1 и 2 этапами) производится вычисление соотношения n_i/m для частиц компонента смеси.

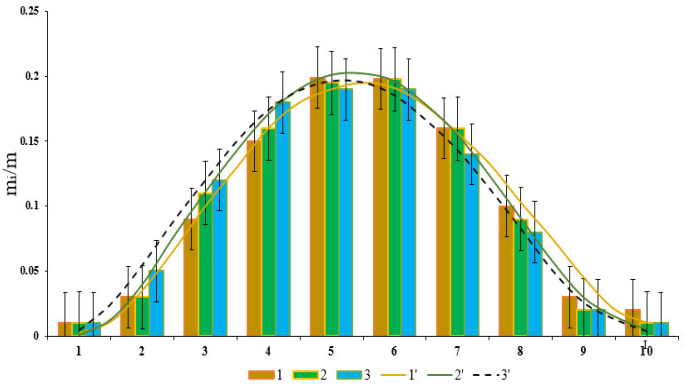
Сыпучий компонент в каждой из ячеек взвешивался, и определялось соотношение n_j/m, где n_i – масса частиц в j-й ячейке, m – масса частиц во всех ячейках. Получено, что при увеличении частоты вращения ротора до значения 750 мин$^{-1}$ равномерность распределения

количества частиц материала по ячейкам увеличивается, изменяясь с 0,17-0,19 до 0,18-0,24. Сближение линий тренда распределения количества частиц можно достичь путем удлинения каналов и изменением угла наклона используемой ловушки для последующего учета значения коэффициента восстановления скорости частиц.

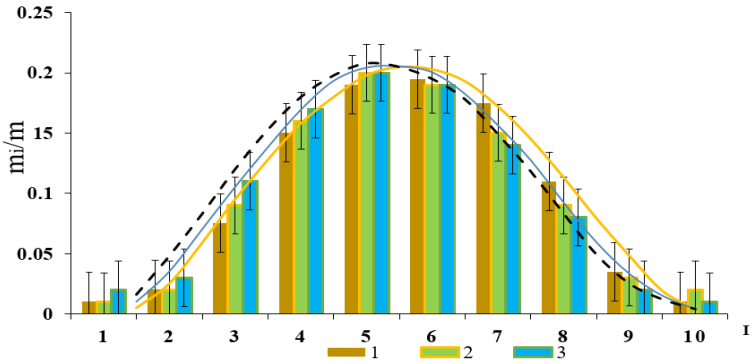
С помощью данного эксперимента анализируется действие режимных и конструктивных параметров установки, физических свойств вещества на образуемый поток частиц (его форму, угол разброса, распределение частиц по сечению).

Экспериментальные исследования (по каждому этапу) проведены для трех фиксированных значений частоты вращения насадки n = {350, 500, 750} мин$^{-1}$. Коэффициент достоверности составляет при распределении частиц:

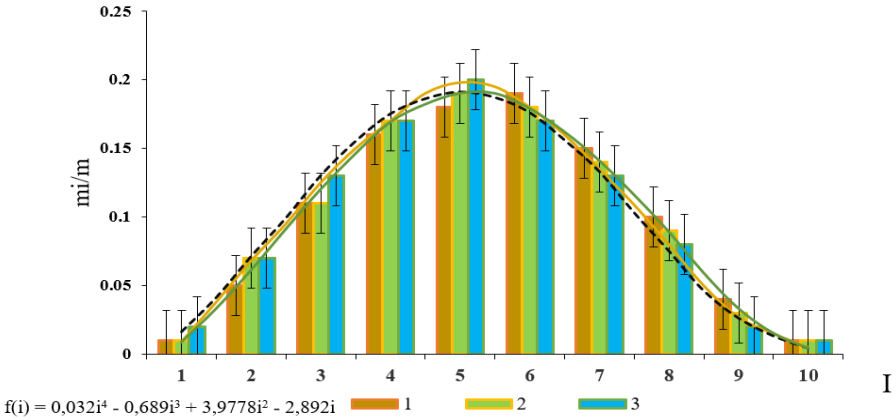
- 0,936-0,983 для манной крупы;
- 0,931-0,932 для песка речного.



а)



б)



в)

Рис. 3. Экспериментальные данные по распределению массы частиц в отраженном потоке с учетом его взаимодействия с набегающим:

а – манная крупа; *б* – песок речной (сорбент); *в* – гранулированный уголь

Из приведенных опытных данных следует, что с увеличением частоты вращения ротора до 750 мин^{1} равномерность распределения смеси по ячейкам снижается, изменяясь с 0,10-0,15 до 0,15-0,21. Наиболее равномерное распределение количества частиц у объекта манная крупа за счет ее насыпной плотности. Сближение линий тренда для распределения количества частиц по ячейкам можно достичь путем увеличения длины каналов и изменением угла наклона ловушки вследствие значимости коэффициента восстановления скорости частиц (табл. 1).

Таблица 1. Регрессионные уравнения зависимостей распределения количества частиц сыпучих компонентов по высоте вертикальной ловушки

Частота вращения n, мин$^{-1}$	Массовая доля частиц сыпучего компонента, поступающих в i-ю ячейку, m_i/m	Достоверность аппроксимации R^2
Крупа манная (ГОСТ 7022–2019)		
350	$f(i) = 0{,}0004 \cdot i^4 - 0{,}0084 \cdot i^3 + 0{,}0507 \cdot i^2 - 0{,}0532 \cdot i$	0,983
500	$f(i) = 0{,}0477 \cdot i^4 - 1{,}0089 \cdot i^3 + 6{,}003 \cdot i^2 - 6{,}8053 \cdot i$	0,936
750	$4{,}44 \cdot 10^{-2} \cdot i^4 - 9{,}334 \cdot 10^{-1} \cdot i^3 + 5{,}4497 \cdot i^2 - 5{,}446 \cdot i$	0,971
Песок речной (сорбент) (ТУ 2163-003-14844227-2014)		
350	$4{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot i^4 - 9{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot i^3 + 6{,}05 \cdot 10^{-2} \cdot i^2 - 7{,}65 \cdot 10^{-2} \cdot i$	0,931
500	$6{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot i^4 - 1{,}19 \cdot 10^{-2} \cdot i^3 + 7{,}24 \cdot 10^{-2} \cdot i^2 - 9{,}2 \cdot 10^{-2}\, i$	0,932
750	$1{,}013 \cdot 10^{-1} \cdot i^4 - 2{,}2274 \cdot i^3 + 1{,}5151 \cdot 10^{1} \cdot i^2 - 3{,}1899 \cdot 10^{3} \cdot i + 1{,}9417 \cdot 10^{3}$	0,942
Уголь гранулированный (ГОСТ 33583–2015)		
350	$3{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot i^4 - 6{,}89 \cdot 10^{-1} \cdot i^3 + 3{,}9778 \cdot i^2 - 2{,}892i$	0,992
500	$3{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot i^4 - 7{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot i^3 + 3{,}9 \cdot 10^{-2} \cdot i^2 - 2{,}4 \cdot 10^{-2} \cdot i + 4{,}0 \cdot 10^{-3}$	0,961
750	$3{,}54 \cdot 10^{-2} \cdot i^4 - 7{,}06 \cdot 10^{-1} \cdot i^3 + 3{,}6494 \cdot i^2 - 1{,}2062 \cdot i$	0,996

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для проверки вероятностных моделей формирования разреженных потоков частиц смешиваемых компонентов при использовании вращающейся насадки прямоугольными каналами-лопатками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1) Маньянов, В.Ю. Разработка и исследование центробежного смесителя-диспергатора с направленной организацией движения потоков для переработки сыпучих материалов: дис. … канд. техн. наук: 05.18.12. – Кемерово, 2006. – 127 с.

2) Ратников, С.А. Разработка и исследование непрерывнодействующего смесительного агрегата центробежного типа для получения сухих и увлажненных комбинированных продуктов: автореферат дис. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2001. – 16 с.

3) Капранова, А.Б. О способах оценки производительности смесительного барабана со щеточными элементами / А.Б. Капранова, И.И. Верлока, М.Н. Бакин // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – Иваново, 2015. – Т. 58, вып. 11. – С. 80-82.

4) Верлока, И.И. Об экспериментальных распределениях частиц сыпучих компонентов в разреженных потоках / И.И. Верлока, М.Н. Бакин, А.Б. Капранова // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – Иваново, 2015. – Т. 58, вып. 10. – С. 70-72.

5) Капранова, А.Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А.Б. Капранова, И.И. Верлока // Теор. основы хим. технологии. – 2018. – Т. 52, № 6. - С. 707-721.

6) Пат. № 2449829 Российская Федерация, МПК B01F7/16 Агрегат для смешения сыпучих материалов: опубл.10.05.2012. / А.И. Зайцев, А.Е. Лебедев, Е.А. Виноградова, В.Н. Сидоров, Ю.В. Никитина, И.С. Шеронина, М.Ю.Таршис.

7) Применение САПР при разработке центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем / Д.В. Федорова, Д.В. Стенько, Д.Д. Бахаева, А.Б. Капранова // Математические методы в технике и технологиях. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2021. – Т. 11. – С. 59-62.

8) Капранова, А.Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А.Б. Капранова, И.И. Верлока // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707–721.

УДК 621.929.6

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕСИТЕЛЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ БАРАБАННОГО ТИПА

Л.И. Филинков, П.М. Смирнов, М.Ю. Таршис

Научный руководитель - **М.Ю. Таршис,** д-р техн. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Рассмотрены три метода повышения эффективности смесителей при переработке сыпучих смесей склонных к сегрегации. Приведены примеры их реализации в современных аппаратах барабанного типа. Применение рассмотренных методов при проектировании позволит повысить функциональные возможности новых аппаратов.

Ключевые слова: *методы, эффективность, смесители барабанного типа, сыпучие материалы, сегрегация*

SOME METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF DRUM-TYPE BULK MATERIAL MIXERS

L.I. Filinkov, P.M. Smirnov, M.Yu. Tarshis

Scientific Supervisor - **M.Yu. Tarshis,** Doctor of Technical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

Three methods for improving mixer efficiency when processing bulk mixtures prone to segregation are discussed. Examples of their implementation in modern drum-type mixers are provided. Applying these methods to the design process will improve the functionality of new mixers.

Keywords: *methods, efficiency, drum mixers, bulk materials, segregation*

Эффективность смесителей сыпучих материалов существенно снижается при переработке смесей склонных к сегрегации по физико-механическим свойствам [1]. В аппаратах барабанного типа сегрегация проявляется тем, что компоненты, содержащие более плотные частицы и (или) частицы меньших размеров локализуются в центре циркуляции перерабатываемой смеси. Применение дополнительных рабочих элементов, устанавливаемых в центре циркуляции, зачастую не приводит к значительному подавлению сегрегационных эффектов. Ниже рассмотрены методы преодоления сегрегации сыпучей смеси в барабанных аппаратах непрерывного действия, позволяющие в ряде случаев получать однородные сыпучие составы.

1. Метод поочередной равномерной подачи компонентов на поверхность обрушения смеси [2, 3]. При его использовании ключевой компонент попадает непосредственно в область обрушения, что обеспечивает быстрое достижение однородности смеси. На рис.1 показана схема устройства для реализации способа смешения [2]. Устройство содержит барабан 1, патрубки загрузки 2-4, патрубок выгрузки готовой смеси 5, дозаторы 6-8 подачи компонентов А, В и С, перфорированные трубы 9 и 10 с приводами вращения 11 и 12. Компонент А через патрубок загрузки 2 подается в смеситель, а ключевые компоненты через патрубки 3 и 4 - в перфорированные трубы. Через отверстия перфорации в трубах при их вращения приводами 11 и 12 компонент Б подается на поверхность обрушения смеси. Через перфорацию в трубе 9 на поверхность обрушения смеси подается компонент С - наиболее склонный к сегрегации. Подача компонента С осуществляется на некотором расстоянии от места выгрузки. Загрузка компонента начинается, когда время пребывания двух основных компонентов смеси (А, Б) соответствует расчетному значению.

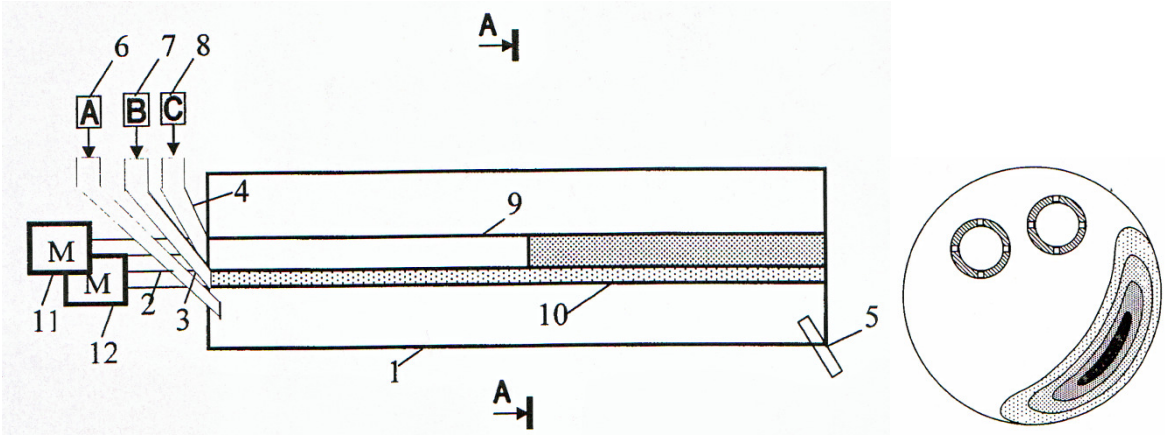


Рис. 1. Барабанный смеситель непрерывного действия для реализации способа смешения сыпучих материалов [2]

2. Метод разбавления реализован в ступенчатом смесителе сыпучих материалов [4] показанном на рис. 2.

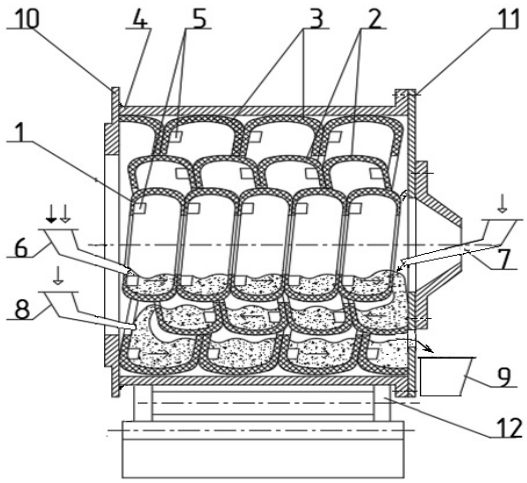


Рис. 2. Смеситель сыпучих материалов [4]

Смеситель содержит корпус, выполненный в виде сообщающихся коаксиальных эластичных камер, образующих три ступени 1, 2, 3 винтовых желобов, размещенных в цилиндрической трубе 4. Лопасти 5 жестко связаны с эластичными камерами. Ступень 1 сообщается с патрубком загрузки 6, а ступени 2 и 3 - с патрубками 7 и 8 дополнительной подачи материала. Ступень 3 соединена с приемным бункером 9. Цилиндрическая труба 4 с крышками 10 и 11 установлена на роликах 12, связанных с приводом вращения (не показан). Компоненты из патрубка загрузки 6 через отверстие в крышке 10 поступают во внутреннюю камеру - на ступень 1. При включении привода цилиндрическая труба 4 со ступенями 1, 2, 3 начинает вращаться. Компоненты, находящиеся внутри ступеней движутся в режиме переката (поднимаются вверх на некоторую, высоту и обрушиваются). Перемешивание происходит в потоке обрушения материала, а также лопастями 5, оказывающими на смесь конвективное воздействие. Компоненты перемешиваются и перемещаются вдоль оси корпуса, внутри ступени 1 и пересыпается на ступень 2. Дополнительная загрузка на поверхность смеси одного (или нескольких) компонентов осуществляется через патрубок 7. Происходит предварительное перемешивание смеси, полученной на участке ступени 1 и транспортирующего компонента, поступающего из патрубка 7. Транспортирующий компонент, поступающий из патрубка 7, дозируется в соотношении 1:1 со смесью, полученной на ступени 1. Это обеспечивает наилучшие условия перемешивания на ступени 2, механизм которого аналогичен механизму смешивания на ступени 1. На ступени 2

компоненты перемещаются вдоль оси корпуса влево и пересыпаются в винтовой желоб ступени 3. При этом из патрубка 8 вновь поступает транспортирующий компонент в соотношении 1:1 со смесью, полученной на ступени 2. Затем процесс смешивания повторяется на ступени 3 и готовая смесь выгружается в приемный бункер 9.

При реализации процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-винтовом аппарате [4] используется метод "разбавления" и ступенчатого проведения процесса. Это позволяет добиться однородности смеси при небольшой концентрации ключевого компонента.

3. Применение аппарата непрерывного действия типа «пьяная бочка».

Смеситель [5] (рис. 3), содержит корпус 1, выполненный в виде последовательно установленных сообщающихся торообразных эластичных камер (A, B, C, D) с лопастями 2, отогнутыми поочерёдно в противоположных направлениях. Корпус 1 установлен в трубе 3, размещённой внутри горизонтальной конструкции, образованной дисками 4, 5 и стяжками 6 и установленной на роликах 7, которые связаны с приводом 8 посредством передачи 9. Патрубок 10 загрузки компонентов, сообщается с корпусом 1 посредством гофрированной трубы 11. На правой торцевой крышке размещён патрубок выгрузки смеси 12. Смешиваемые компоненты из патрубка загрузки 10 через гофрированную трубу 11 поступают в камеру 1. После включения привода 8 труба 3 вместе с камерами *A, B, C, D* начинает вращаться. Сыпучие материалы, находящиеся внутри камеры 1, начинают смешиваться.

При этом осуществляются следующие воздействия на смесь:

- смешивание в режиме переката;
- перетасовка смеси за счёт воздействия на неё лопастей и вращающихся рабочих камер, имеющих относительно друг друга радиальное смещение;
- пересыпание смеси от левого края рабочей камеры - к её правому краю при качании корпуса в продольном сечении.

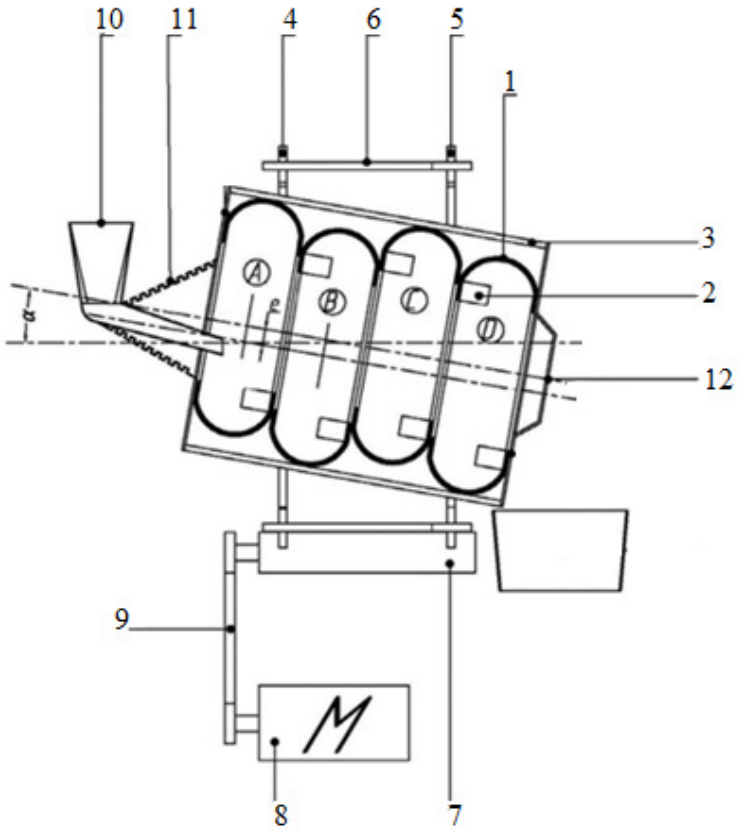


Рис. 3. Смеситель сыпучих материалов [5]

Таким образом, рассмотрены методы, обеспечивающие высокую эффективность приготовления смесей в барабанных аппаратах:

- метод подачи ключевого компонента на поверхность обрушения смеси;
- метод разбавления при переработке смесей в ступенчатых аппаратах, которые позволяют получать однородные смеси, содержащие ключевой компонент в малых концентрациях;
- метод непрерывного смешивания в аппарате типа «пьяная бочка», обеспечивающий конвективное воздействие на смесь и получение смесей компонентов, отличающихся по своим физико-механическим свойствам. Применение рассмотренных методов при проектировании позволит повысить функциональные возможности новых аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов/ Ю. И. Макаров. - М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.

2. Патент № 2478420 Российская Федерация, МПК B01F13/18. Способ непрерывного приготовления многокомпонентных смесей и устройство для его реализации: опубл. 10.04.13 / Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф., Дурнев А.С.

3. Патент № 2254907 Российская Федерация, МПК B01F3/18. Способ приготовления смеси сыпучих материалов: опубл. 27.06.05/ Таршис М.Ю., Зайцев А.И., Королев Л.В.

4. Патент № 2812190 Российская Федерация, МПК B01F 9/02, B01F 3/18. Смеситель сыпучих материалов / Таршис М.Ю., Королев Л.В., Капранова А.Б.

5. Патент № 2848783 Российская Федерация, МПК B01F 29/62. Смеситель сыпучих материалов: опубл. 21.10.2025/ Таршис М.Ю., Королев Л.В., Филинков Л.И., Капранова А.Б.

УДК 678

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА НА КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ СПИРАЛЬНОГО КОНТУРА, ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИУРЕТАНА

А.А. Хапов[1], А.Е. Ефимов[2], Д.В. Стенько[2]

Научный руководитель – **Д.В. Стенько**, канд. техн. наук

[1] Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского
[2]ООО «КОНТУР КАВЕР»

Рассмотрен вопрос влияния влажности термопластичного полиуретана на качество изделия при 3D-печати спирального контура.
Ключевые слова: *3D-печать, TPU, влажность материала, качество изделия*

INFLUENCE OF MATERIAL MOISTURE ON THE QUALITY OF A PRODUCT OBTAINED BY 3D PRINTING IN A SPIRAL WALL MODE FROM THERMOPLASTIC POLYURETHANE

A.A. Khapov[1], A.E. Efimov[2], D.V. Stenko[2]

Scientific Supervisor – **D.V. Stenko**, Candidate of Technical Sciences

[1]Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky
[2] «CCOVER» LLC

The issue of influence of material moisture on the quality of a product made of thermoplastic polyurethane by 3D printing in spiral wall mode.
Keywords: *3D printing, TPU, material moisture, product quality*

С развитием аддитивных технологий появляются новые способы производства изделий методом послойного наплавления, одним из которых является FDM 3D-печать в режиме спирального контура, которая позволяет получить изделие без видимого вертикального шва на его поверхности [1] (рис. 1).

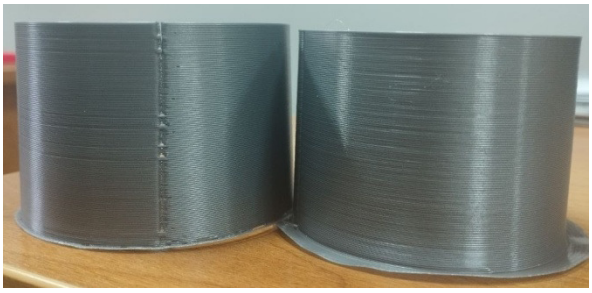


Рис. 1. Фотография сравнения режимов печати:
слева – образец с видимым швом, справа – образец спирального контура

Одновременно с возможностью убрать шов с поверхности изделия, возникает и главная проблема данного способа производства – модель печатается толщиной в один периметр, в связи с чем возникает потребность обеспечить непрерывный и стабильный поток материала из сопла 3D-принтера. Основным фактором, влияющим на качественный поток материала, является влажность филамента [2].

Для проведения исследований о влиянии на влажности на качество 3D-печати использовался термопластичный полиуретан, намотанный на катушку (рис. 2), с параметрами печати, приведёнными в табл. 1 [3].

Таблица 1. Параметры печати полиуретана (TPU)

Название параметра	Значение
Температура сопла, °C	230
Температура стола, °C	60
Линейная скорость печати, мм/с	40
Скорость вентилятора охлаждения, %	100
Высота слоя, мм	0.2
Диаметр нити, мм	1,75

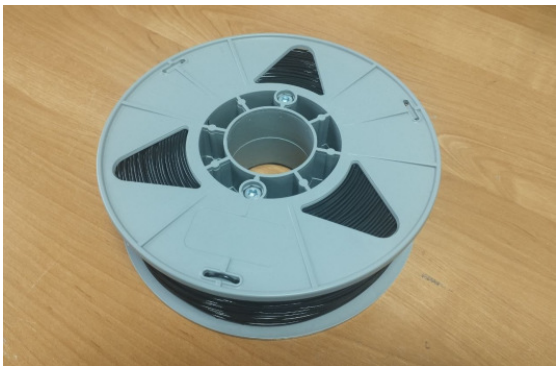


Рис. 2. Катушка термопластичного полиуретана

Данный филамент применяется для изготовления медицинских изделий, в частности в протезировании (рис. 3).

Рис. 3. Комплектующие для протезов нижних конечностей

Для подбора оптимальных параметров печати были произведены исследования о влиянии влажности полиуретана на качество готовой продукции. Для исследований использовались 3D-принтер «Picaso Designer XL» и конвекционная сушилка «Creality Space Pi Plus».

Для исследований использовались две катушки термопластичного полиуретана, одна из которых использовалась для печати без предварительной сушки, а другая – помещена в сушилку «Creality Space Pi Plus». Процесс сушки производился согласно предложенным параметрам [2]: температура сушки – 60 °C, время сушки - 8 часов. В результате печати обеими катушками были получены образцы поверхности разного качества (рис. 4).

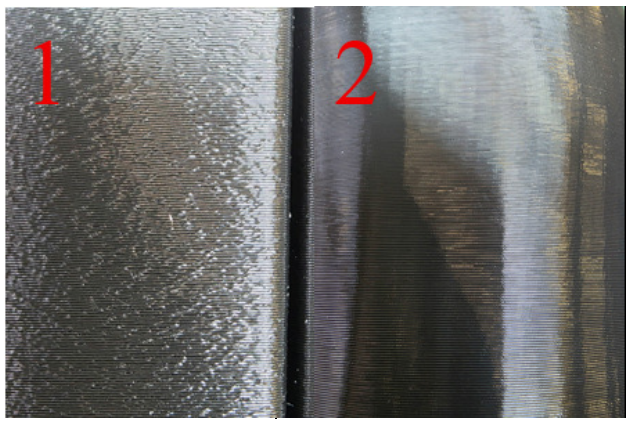


Рис. 4. Сравнение качества поверхности полученных образцов:
1 – образец из влажного пластика; 2 – после сушки

Образец, напечатанный из материала без предварительной сушки, был осмотрен на предмет пригодности для эксплуатации, в результате чего было выявлено несколько признаков брака:

- визуальный - пористая поверхность;
- механический - ухудшение прочностных характеристик вследствие пористости стенки;

Изделие, напечатанное таким образом, не способно выполнять свои функции, из этого можно сделать вывод, что качество 3D-печати спиральным контуром напрямую зависит от влажности полиуретана. Поэтому необходимо при использовании данного метода печати в процессе производства использовать сушку материала. Для повышения эффективности производства изделий методом спирального контура, необходимо подобрать оптимальные параметры сушки филамента с учетом особенности намотки нити из полиуретана на катушку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Алексеев, А.А. 3D-печать керамических изделий при использовании спиральной печати тела вращения с волнообразной поверхностью и эффектом "плетения" / А.А. Алексеев, А.Е. Кирсанов, О.В. Шишов // Огарёв-Online. – 2020. – № 15(152). – С. 1-8. – URL: https://sciup.org/ogarev-online/2020-15-8

2) Лайша, А.К. Влияние влажности пластика на изделия, изготовленные с помощью аддитивных технологий методом послойного наплавления / А.К. Лайша, Д.В. Бушманов, А.М. Пьянзин // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 105-13. – С. 216-218.

3) Производитель пластика для 3D печати бренда // U3Print / ИП Благов Дмитрий Вячеславович: [сайт]. – URL: https://u3print.com/ (дата обращения: 07.04.2026).

УДК 621.646.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ЖИДКОЙ ФАЗЫ, СОЗДАВАЕМЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ РАСПЫЛИТЕЛЯМИ

А.И. Холодкова[1,2], А.Е. Лебедев[1]

Научный руководитель – **А.Е. Лебедев**, д-р техн. наук, профессор

[1]Ярославский государственный технический университет
[2]Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
имени Маршала Советского Союза Л.А. Говорова

Проведено исследование структуры разреженного потока, полученного на экспериментальной установке при использовании в качестве распылителя гладких дисков, распылителей канального и лопастного типа. Изучено влияние на структуру потока расхода жидкости, а также частоты вращения диска.
Ключевые слова: *разреженный поток, дисковый распылитель, лопастной распылитель*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRUCTURE OF LIQUID-PHASE FLOWS CREATED BY CENTRIFUGAL NOZZLES

A.I. Kholodkova[1,2], A.E. Lebedev[1]

Scientific Supervisor – **A.E. Lebedev**, Doctor of Technical Sciences, Professor

[1]Yaroslavl State Technical University
[2]Yaroslavl Higher Military School of Air Defense named after Marshal of the Soviet Union
L.A. Govorov

The structure of the rarefied flow obtained on an experimental unit when using smooth disks, channel and blade type sprayers as a sprayer was studied. The effect of the flow rate of the liquid, as well as the rotational speed of the disk, on the structure of the flow was studied.
Keywords: *sparse flow, disk sprayer, blade sprayer*

В процессе распыливания жидких сред важную роль играет распределение капель жидкости и их концентрация в образованном потоке. Современные публикации имеют большое количество работ, посвященных описанию распределения частиц в потоке (как капель, так и твердых). В подавляющем большинстве эти исследования описывают процесс распыливания гладкими дисками [1], форсунками [2, 3] или коническими насадками, представленными различными конструктивными решениями [4]. Лишь небольшое количество публикаций содержит эмпирические зависимости, способные описать распределение частиц потока по ширине. Зачастую результатами таких исследований являются дифференциальные кривые распределения частиц по их размерам. Невозможность использования результатов данных работ на другие установки, выявила необходимость в проведении ряда экспериментальных исследований, по распределению частиц в сечении потоков, которые могут быть получены при использовании нескольких типов распылителей. Основной задачей является изучение влияния некоторых параметров распылителя на структуру потока. Для определения размеров и структурных особенностей приспособлений для выравнивания концентрации частиц в потоке, необходимо получить параметры начального распределения капель в потоке.

Проведение исследования было реализовано на опытной установке с возможностью использования различных распылительных устройств (рис. 1).

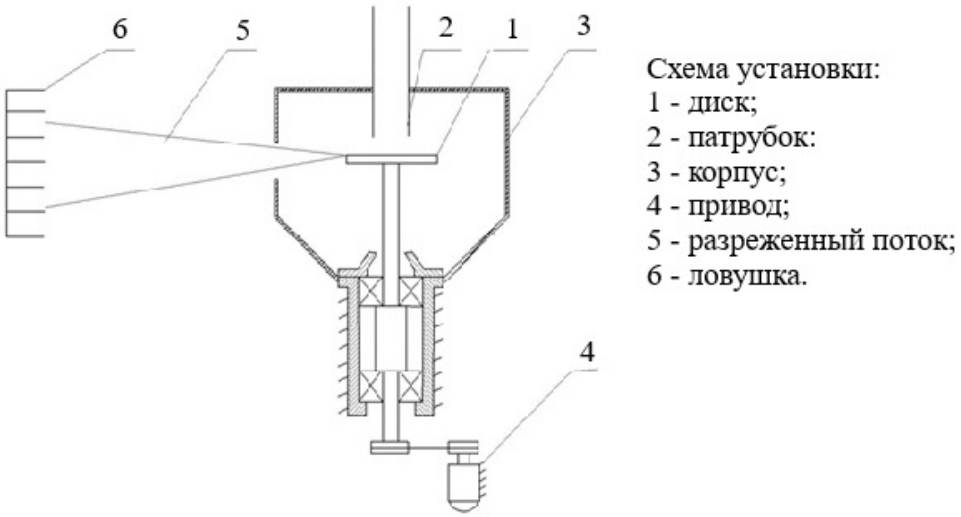


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования структуры разреженного потока

Порядок проведения эксперимента, осуществлялся следующим образом.

Жидкость из питательной емкости, проходя через патрубок 2, поступала на вращающийся распылитель 1, затем рассеивалась внутри корпуса 3, имеющего форму цилиндра. Вращательное движение распыливающему устройству через ременную передачу передавалось от электродвигателя постоянного тока 4. Изменение частоты вращения вала электродвигателя осуществлялось при помощи ЛАТРа. Для отбора проб в поверхности обечайки 3 (корпуса) конструкцией предусмотрено прямоугольное окно, через которое проходила разреженная струя 5 и оседала в ячейках ловушки 6 (рис. 2, *а, б*). Ячейки ловушки пронумерованы снизу вверх. Для удобства определения массы жидкости, находящейся в ячейках, был использован прозрачный материал. Во всех опытах в качестве жидкости использовалась вода.

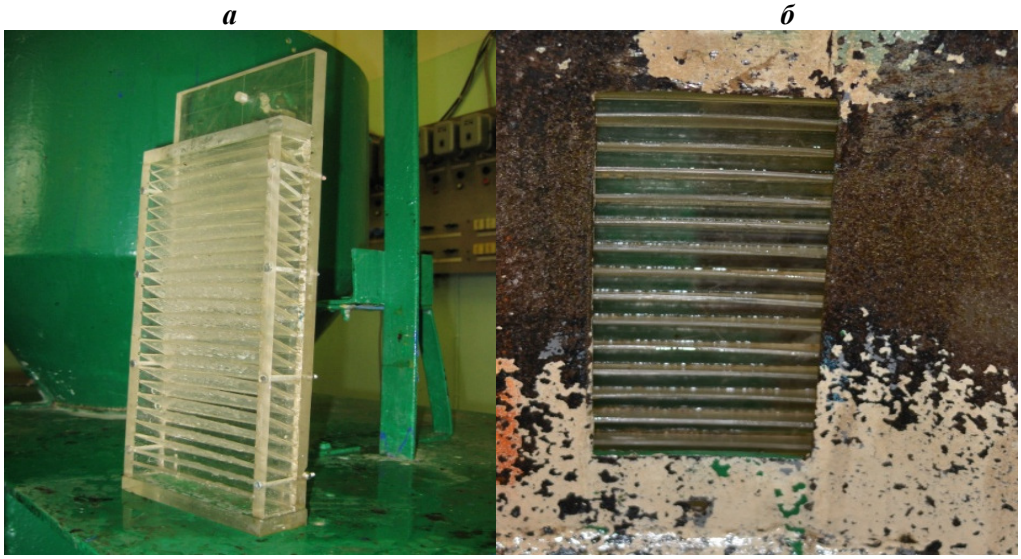


Рис. 2. Ловушка экспериментальной установки:
а – внешний вид ловушки; *б* – фотография установленной в окне ловушки

В качестве распылителей были использованы гладкие диски (рис. 3, *а*) и лопастного типа (рис. 3, *б*).

а *б*

Рис. 3. Фотографии, используемых распылителей:
а – фотография ротора дискового распылителя; *б* – фотография лопастного распылителя

В опытах изучалось влияние на структуру потока частоты вращения диска и расхода жидкости. Условия проведения опыта: ловушка с шириной ячеек 0,01 м, расстояние от оси распылительного диска до ловушки 0,50 м, диаметр диска 0,2 м, расход жидкости 700 л/ч, частота вращения диска изменялась от 750 до 1250 мин$^{-1}$ с шагом в 250 мин$^{-1}$.

Распределение массы жидкости по ячейкам ловушки в зависимости от частоты вращения для дискового распылителя представлены на рис. 4 (количество рабочих ячеек 10).

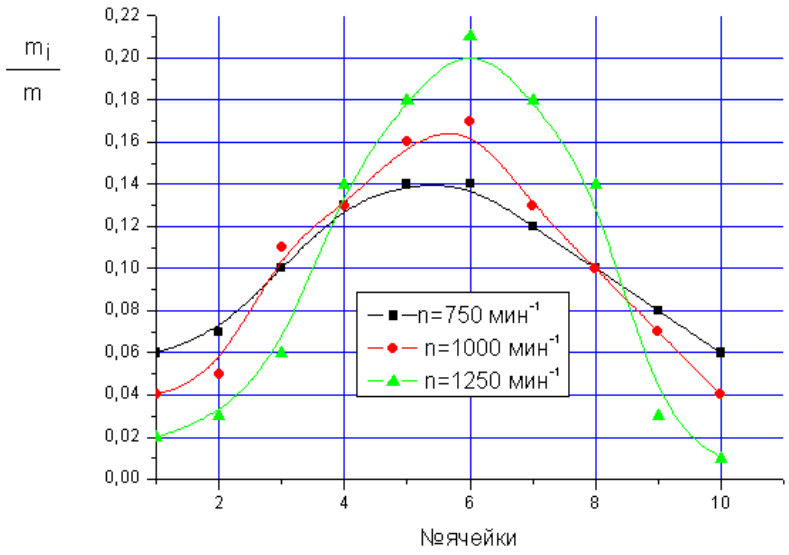


Рис. 4. Распределение массы жидкости по ячейкам ловушки в зависимости от частоты вращения диска

Из полученных зависимостей можно сделать вывод о том, что при увеличении частоты вращения диска возрастает количество жидкости, попавшей в центральные ячейки. Это обусловлено тем, что с увеличением частоты вращения ротора происходит уменьшение толщины пленки жидкости на его поверхности, которая затем диспергируется.

С целью выявление динамики распределения массы жидкости по ячейкам ловушки в зависимости от расхода жидкости в лопастном распылители, был проведен эксперимент, при следующих параметрах. Ширина ячеек ловушки 0,01 м, расстояние от оси распылительного диска до ловушки 0,50 м, диаметр диска 0,2 м, частота вращения распылителя n = 1000 об/мин, количество рабочих ячеек 10. Расход жидкости изменяли от 600 до 800 л/ч, с шагом в 100 л/ч. Результат представлен на рис. 5.

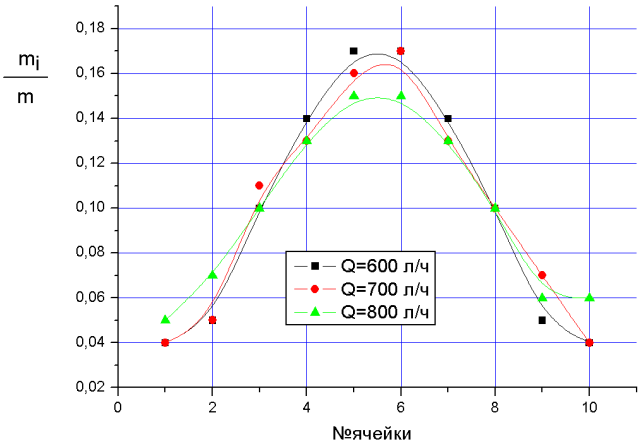


Рис. 5. Распределение массы жидкости по ячейкам ловушки в зависимости от расхода жидкости (дисковый распылитель)

Анализируя результаты (рис. 5) видим, что изменение расхода жидкости не оказывает заметного влияния на распределение массы жидкости по сечению потока.

Незначительное увеличение соотношения m_i/m в центральных ячейках при уменьшении расхода жидкости может быть объяснено сменой режимов распыливания от струйного к пленочному [6].

Проведя серию опытных исследований с использованием лопастного распылителя, были получены следующие результаты, по распределению массы жидкости по ячейкам ловушки: в зависимости от частоты вращения лопастей (рис. 6); от расхода жидкости лопастным устройством (рис. 7).

В качестве результата было установлено, что при распыливании лопастным устройством с углом наклона лопастей β=90^0 наблюдаются три режима распыливания: капельный, струйный и пленочный.

Для проведения эксперимента были использованы следующие параметры распылителя: ширина ячеек ловушки 0,01 м, расстояние от оси лопастного распылителя до ловушки 0,50 м, диаметр распылителя 0,4 м, расход жидкости Q = 700 л/ч, частота вращения диска изменялась от 750 до 1250 мин$^{-1}$ с шагом в 250 мин$^{-1}$. Количество рабочих ячеек 10 (рис. 6)

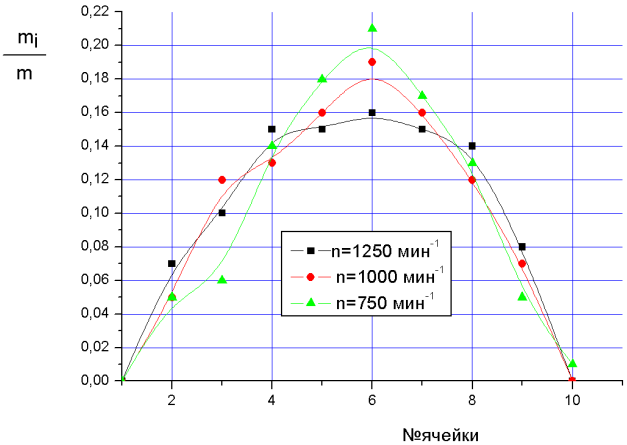


Рис. 6. Распределение массы жидкости по ячейкам ловушки в зависимости от частоты вращения распылителя (лопастной распылитель)

Проведя анализ полученных кривых, видим, что с увеличением частоты вращения лопастей увеличивается высота подъема слоя жидкости по вращающейся лопасти, что приводит к увеличение ширины образованного факела распыла. В случае использования лопастного распыливающего устройства с углом наклона лопаток к плоскости диска β = 90^0, с ростом угловой скорости наблюдается увеличение отношения m_i/m в центральных ячейках.

Выявление зависимости распределения массы жидкости по ячейкам ловушки в зависимости от расхода жидкости были проведены опытные исследования, результаты которых представлены на рис. 7. Параметры распылителя: ширина ячеек ловушки 0,01 м, расстояние от оси лопастного распылителя до ловушки 0,50 м, диаметр распылителя 0,4 м, частота вращения распылителя n = 1000 об/мин, количество рабочих ячеек 10, угол наклона лопасти β=90^0. Расход жидкости изменяли от 600 до 800 л/ч, с шагом в 100 л/ч.

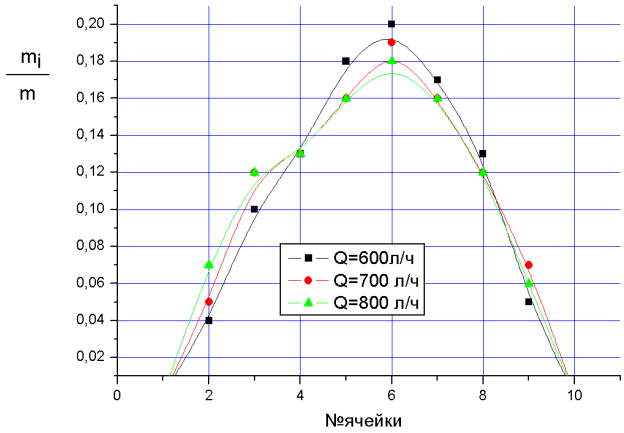


Рис. 7. Распределение массы жидкости по ячейкам ловушки в зависимости от расхода жидкости лопастным устройством

При расходе жидкости 600 л/ч на данной установке при n = 1000 об/мин наблюдается струйный режим распыливания. Высокое наполнение центральных ячеек объясняется тем, что распадающиеся на капли струи находятся в плоскости диска. С повышением расхода до 800 л/ч наблюдается пленочный режим движения. Зона распада пленки имеет более широкий диапазон высот, чем струя, что объясняет наличии большого количества жидкости в нескольких центральных ячейках. При Q = 700 л/ч имеет место переходный режим, где механизм распада может быть частично струйный и пленочный.

Таким образом было установлено, как влияет на структуру получаемого потока расход жидкости и частота вращения распылителя, для случаев использования различных видов распыливающих насадок. Данные результаты могут быть полезны при проектировании и эксплуатации настраиваемых агрегатов, предназначенных для распыливания жидких сред в промышленности, с целью подбора параметров работы (подача жидкости, частота вращения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев Д.А. Исследование математической модели распыления жидкости центробежным дисковым распылителем / Д.А. Михеев, Ч.Юн // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 4. – С. 106-113.

2. Александрин, Д.Р. Экспериментальное исследование процесса распыливания воды центробежно-струйной форсункой / Д.Р. Александрин, Н.В. Шибитова // XIX Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: Тезисы докладов, Волгоград, 11–14 ноября 2014 года / Отв. ред.А.В. Навроцкий. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2015. – С. 19-20.

3. Витман, Л.А. Распыливание жидкости форсунками / Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев; под ред. С.С. Кутателадзе. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.

4. Патент № 2654734 C1 Российская Федерация, МПК B01D 47/14, B01D 53/18. Конический форсуночный скруббер с вихревым оросителем: № 2017138203: заявл. 02.11.2017: опубл. 22.05.2018 / О. С. Кочетов.

5. Патент № 2665526 C1 Российская Федерация, МПК B01D 47/06. Конический форсуночный скруббер: № 2017138212: заявл. 02.11.2017: опубл. 30.08.2018 / О. С. Кочетов.

6. Пажи Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М., Химия, 1984. – 254 с.

УДК 66.066.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ УСТОЙЧИВЫХ ЭМУЛЬСИЙ

А.М. Чаленко

Научный руководитель – **И.С. Гуданов**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются основные типы устройств для диспергирования и гомогенизации жидких гетерогенных систем. Проведен сравнительный анализ механических мешалок и роторно-пульсационных аппаратов. Выделены ключевые критерии эффективности оборудования, включая индекс полидисперсности и конструктивные особенности рабочих органов.

Ключевые слова: *эмульсия, диспергирование, роторно-пульсационный аппарат, мешалка, индекс полидисперсности, гомогенизация*

COMPARATIVE ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF EFFICIENCY CRITERIA FOR HIGH-QUALITY STABLE EMULSION PREPARATION EQUIPMENT

A.M. Chalenko

Scientific Supervisor – **I.S. Gudanov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article examines the main types of devices for dispersion and homogenization of liquid heterogeneous systems. A comparative analysis of mechanical stirrers and rotor-stator pulse apparatuses is carried out. Key equipment efficiency criteria are identified, including the polydispersity index and the design features of the working elements.

Keywords: *emulsion, dispersing, rotor-stator pulse apparatus, stirrer, polydispersity index, homogenization*

Приготовление устойчивых эмульсионных систем является одной из приоритетных задач современного промышленного производства в различных отраслях. Конструктивный выбор оборудования для эмульгирования напрямую зависит от требуемой устойчивости эмульсии.

В современной практике выделяют три основных типа аппаратов для эмульгирования: механические мешалки, роторно-пульсационные аппараты (РПА) и кавитационное оборудование.

Механические мешалки работают по принципу объемного перемешивания. Диспергирование в таких аппаратах происходит за счет создания турбулентных потоков и соударения частиц в объеме аппарата (рис. 1) [1].

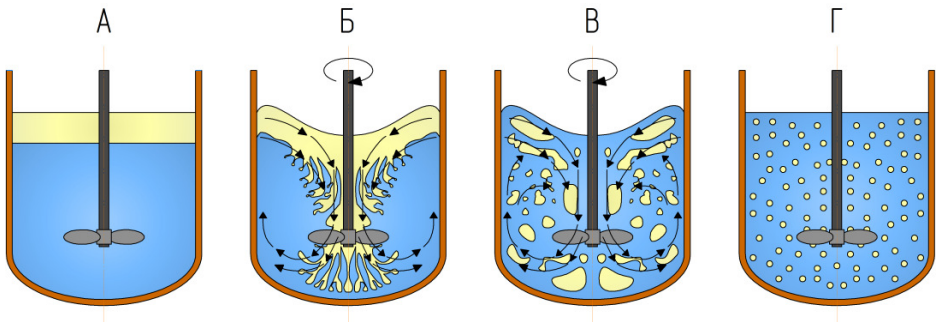


Рис. 1. Механизм формирования эмульсий методом перемешивания:
А - исходная двухфазная эмульсия; Б - деформация фаз при перемешивании;
В - интенсивное диспергирование капель; Г - стабилизированная эмульсия

Роторно-пульсационные аппараты (РПА) работают по принципу интенсивного механического воздействия на поток в узком рабочем зазоре [2]. В отличие от обычных мешалок, данное оборудование способно не только распределять фазу по объему, но и разрушать её до микро- и наноуровня [3].

Конструкция аппарата (рис. 2) базируется на использовании системы «ротор-статор», размещенной в герметичном корпусе. Ротор представляет собой вращающийся вал с концентрическими кольцами и прорезями. Статор является неподвижным элементом аналогичной конфигурации, охватывающим ротор с минимальным технологическим зазором. Такая геометрия рабочих органов обеспечивает максимальные напряжения сдвига и исключает образование «мертвых зон», характерных для емкостного оборудования [2].

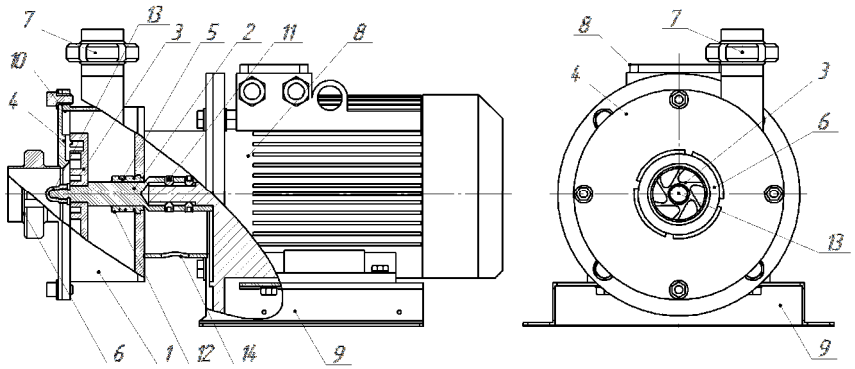


Рис. 2. Типовая конструкция роторно-пульсационного аппарата:
1 –корпус; 2 – наконечник; 3 – ротор; 4 – фланец; 5 – уплотнение; 6 – патрубок всасывающий; 7 – патрубок нагнетательный; 8 – электродвигатель; 9 – площадка; 10 – кольцо; 11 – винт; 12 – кольцо стопорное; 13 – гайка колпачковая; 14 – отверстие контроля протечки

Кавитационное оборудование использует энергию акустических колебаний. За счет образования и последующего схлопывания микроскопических пузырьков (кавитации) выделяется колоссальное количество энергии, которая буквально разрывает частицы фазы, обеспечивая максимальную степень измельчения, недоступную для механических методов [4].

В ходе исследования и анализа перечисленных конструкций было выявлено пять принципиально важных критериев эффективности оборудования, которые однозначно необходимо учитывать при подборе устройства:

1) Полидисперсность – характеризует степень однородности эмульсии, напрямую влияющую на ее качество и устойчивость. Полидисперсная система характеризуется неоднородностью и склонностью к расслоению, в то время как монодисперсная является более устойчивой и качественной (рис. 3) [5].

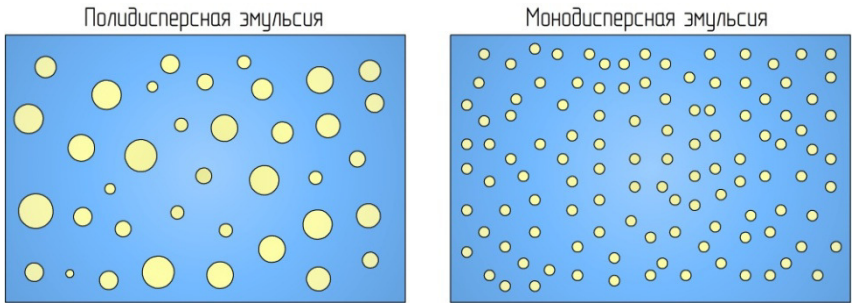


Рис. 3. Сравнительная визуализация однородности распределения капель

2) Интенсивность дробления капель – это показатель того, насколько эффективно аппарат создает усиленное сдвиговое воздействие, позволяя получать эмульсию с

минимальным средним диаметром частиц, что критически важно для предотвращения коалесценции и продления срока годности продукта [5].

3) **Эффективность использования рабочего объема аппарата обеспечивается** отсутствием в камере смешивания застойных зон. Это гарантирует стабильность качественных показателей эмульсии во всей партии и предотвращает локальную неоднородность состава [1].

4) Энергоэффективность – характеризуется сохранением оборудованием качества продукта и производительности в процессе гомогенизации густых, пастообразных составов. Чем выше вязкость, с которой справляется устройство, тем оно эффективнее в условиях реального производства [1, 3].

5) Чистота и гигиеническая безопасность продукта (рис. 4) – это отсутствие в эмульсии посторонних примесей, включая частицы износа самих рабочих органов. Для пищевой, фармацевтической и косметической отраслей данный показатель зачастую является критически важным.

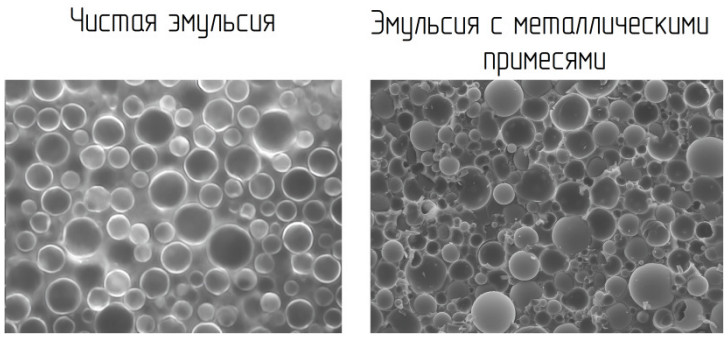


Рис. 4. Сравнительный анализ микроструктуры чистой эмульсии и системы с металлическими примесями

Сравнение наиболее распространенных типов аппаратов, используемых для эмульгирования, на основе выделенных критериев эффективности позволяет определить границы их технологической применимости. В табл. 1 представлены обобщенные характеристики мешалок, роторно-пульсационных аппаратов и кавитационного оборудования, отражающие их способность обеспечивать заданное качество и стабильность готовой продукции.

Таблица 1. Обобщенные характеристики критериев эффективности оборудования для эмульгирования

Критерий эффективности	Механические мешалки	Роторно-пульсационные аппараты	Кавитационное оборудование
Полидисперсность	Высокая	Средняя	Низкая
Интенсивность дробления капель	Низкая	Средняя	Высокая
Эффективность использования объема	Низкая	Высокая	Средняя
Энергоэффективность	Низкая	Высокая	Средняя
Чистота и безопасность продукта.	Высокая	Высокая	Низкая

На основании проведенного сравнительного анализа можно сделать однозначные выводы:

1) Механические мешалки остаются эффективным решением для простых задач, не требующих высокой стабильности эмульсионных систем.

2) Роторно-пульсационные аппараты являются наиболее универсальными для промышленного применения. Благодаря сочетанию интенсивных напряжений сдвига и отсутствию застойных зон, они позволяют достигать оптимальных значений полидисперсности при высокой эксплуатационной надежности.

3) Кавитационное оборудование обеспечивает максимальную степень измельчения фаз и высокую однородность получаемых эмульсионных систем, однако их широкое применение ограничено высокой стоимостью, сложностью эксплуатации и риском загрязнения эмульсии продуктами эрозии рабочих органов. Для пищевой, фармацевтической и косметической отраслей данный фактор является критическим.

Использование предложенных критериев позволяет обоснованно подбирать аппаратурное оформление для производства стабильных эмульсий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Альянс, 2005. – 750 с.

2) Что такое диспергатор: виды, применение и технологии // Fermasclad: [сайт]. – URL: fermasclad.ru (дата обращения: 28.03.2026).

3) Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика: монография / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.

4) Хмелев, В.Н. Ультразвуковое воздействие на многофазные высокодисперсные системы / В.Н. Хмелев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2023. – 210 с.

5. Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии: поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для вузов / Ю.Г. Фролов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1988. – 464 с.

УДК 621.928.93

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ МЕТАЛЛО-ПОЛИМЕРНОГО ГРАНУЛЯТА ПОСЛЕ ЕГО ОБРАБОТКИ В СТРУЙНОМ РЕАКТОРЕ

А.О. Щелокова, И.С. Басалов

Научный руководитель – **И.С. Басалов**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается разработка системы улавливания порошковой смеси, образующейся после обработки материалов в струйном реакторе. В качестве исследуемой смеси рассматривается композиция на основе полилактида и порошка меди, предназначенная для дальнейшего использования в 3D-печати. Проведен анализ конструкции и предложены рекомендации по ее дальнейшей модернизации.

Ключевые слова: *циклонный сепаратор, пылеулавливание, порошковая смесь, 3D-печать*

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR COLLECTING POWDER MIXTURES AFTER PROCESSING IN A JET REACTOR

A.O. Shchelokova, I.S. Basalov

Scientific Supervisor – **I.S. Basalov**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

This article examines the development of a system for collecting powder mixtures formed after processing materials in a jet reactor. The mixture under study is a composition based on polylactide and copper powder, intended for use in 3D printing. An analysis of the design is conducted, and recommendations for its further improvement are offered.

Keywords: *cyclone separator, dust collection, powder mixture, 3D printing*

Развитие технологий напрямую связано с концепцией смены технологических укладов, предполагающей формирование нового стека технологических и конструкторских решений, массово изменяющих жизнь общества. В частности, цифровизацию производства, внедрение интеллектуальных систем управления, использование новых материалов с заданными свойствами и др. В России развитие технологий осуществляется в рамках Национальной Технологической Инициативы (НТИ), целью которой является формирование конкурентоспособных технологических решений и развитие перспективных рынков будущего. В числе Ключевых направлений НТИ рассматриваются технологии: аддитивного производства, новых материалов, интеллектуальных производственных систем и др.

В ЯГТУ разрабатывается новый технологический процесс получения мелкодисперсного гранулята для использования в качестве расходного материала в PIM/MIM/CIM технологическом процессе, а также в аддитивном производстве по технологиям FFF/FDM и FGF. Ключевым этапом производства является обработка металло-полимерных смесей в сверхзвуковой газовой струе струйного реактора. В связи с большой кинетической энергией, получаемой гранулятом после обработки, а также высокой температурой газовой струи, возникает необходимость в специальной системе улавливания гранулята. Осложняет задачу размер мелкодисперсных частиц – 50-60 мкм. Указанные требования предопределяют необходимость разработки особой системы улавливания.

Для решения подобных задач широко применяются пылеулавливающие аппараты, среди которых наибольшее распространение получили циклонные сепараторы. Циклоны характеризуются простой конструкцией, высокой надежностью и возможностью работы в условиях значительных концентраций твердых частиц.

Несмотря на широкое распространение циклонных аппаратов, эффективность их работы зависит от множества факторов, включая геометрические параметры устройства, скорость потока, физические свойства частиц и их дисперсный состав. При этом особенности улавливания композитных порошковых систем, содержащих частицы различной плотности и размеров, требуют проведения дополнительных исследований и разработки специальных конструкций пылеулавливающих систем.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка эффективной системы улавливания порошковой смеси с учетом особых требований, а также параметров технологического процесса и особенностей гранулята. В рамках данной работы были разработаны и опробованы две конструктивные реализации циклона, предназначенные для улавливания порошковой смеси после обработки в струйном реакторе, и проведен их сравнительный анализ.

Первая конструктивная реализация системы улавливания представляет собой типовой циклон, интегрированный непосредственно в крышку пластиковой бочки, выполняющей функцию пылевого бункера. Гипотеза состояла в том, что большой объем бочки позволит увеличить время нахождения частиц в воздушном потоке, тем самым охлаждая их и снижая кинетическую энергию. В данной конструкции корпус закрепляется в верхней части бочки. Газопорошковая смесь поступает в циклон через тангенциальный вход, где происходит формирование закрученного потока. Под действием центробежных сил частицы отбрасываются к стенкам и осаждаются в бочке. Отработанный газ выводится через верхнюю часть системы.

В крышке дополнительно предусмотрены фильтры тонкой очистки, предназначенные для улавливания мелкодисперсных частиц, которые не осаждаются в циклоне. На рис. 1 представлена часть конструкции первой установки по улавливанию смеси.

Рис. 1. Первый вариант установки

Интегрированное решение обладает рядом преимуществ. Компактность конструкции улавливающей части позволяет разместить систему непосредственно на технологической емкости, что снижает занимаемую площадь. Использование стандартной пластиковой бочки в качестве пылесборника удешевляет изготовление установки.

Однако в процессе эксплуатации были выявлены существенные недостатки. Одним из основных является оседание части готовой смеси гранулята непосредственно на стенках бункера, что затрудняет сбор после улавливания. Также в ходе испытаний было отмечено, что часть порошка вылетает через выходное отверстие, что является существенным упущением и не соответствует требованиям, предъявляемым к циклону. Вместе с тем стоит отметить, что сборная конструкция требует особого внимания к крепежным соединениям, т.к. от рабочего органа реактора к уловителю могут передаваться вибрационные нагрузки,

вследствие этого возможно ослабление резьбовых соединений и нарушению герметичности. Это может привести к утечкам и, как следствие, потери части конечного продукта, который будет переноситься потоками воздуха в рабочей зоне, попадая на слизистые и в дыхательные пути работника, что с точки зрения техники безопасности является неприемлемым. К недостаткам получившейся конструкции стоит отнести и крупногабаритность итоговой конструкции.

Во второй конструктивной реализации циклон выполнен как отдельный аппарат, не интегрированный в крышку пластиковой бочки. В этом случае поток материала сначала входит в циклон, где происходит основное отделение твердых частиц, а после смесь осаждается в пылесборник (мешок), который устанавливается на нижний патрубок циклона. Отработанный поток воздуха выходит через верхний патрубок, на который установлен фильтр, предназначенный для улавливания более мелкодисперсных частиц. На рис. 2 представлен второй вариант установки по улавливанию смеси.

Основным преимуществом данного решения является универсальность: циклон может работать с различными типами пылесборников, включая сменные мешки и технологические контейнеры, что позволяет адаптировать систему под конкретную задачу. Обслуживание значительно упрощено — замена мешка-пылесборника занимает не более двух минут и не требует демонтажа циклона, а потери продукта при этом не превышают двух процентов. Благодаря установке циклона на отдельном основании вибрационные воздействия на пылесборник отсутствуют, что гарантирует стабильную герметичность. Конструкция легко масштабируется для работы с различной производительностью. Также одним из существенных плюсов является уменьшение габаритов улавливающего узла в сравнении с первой конструкцией.

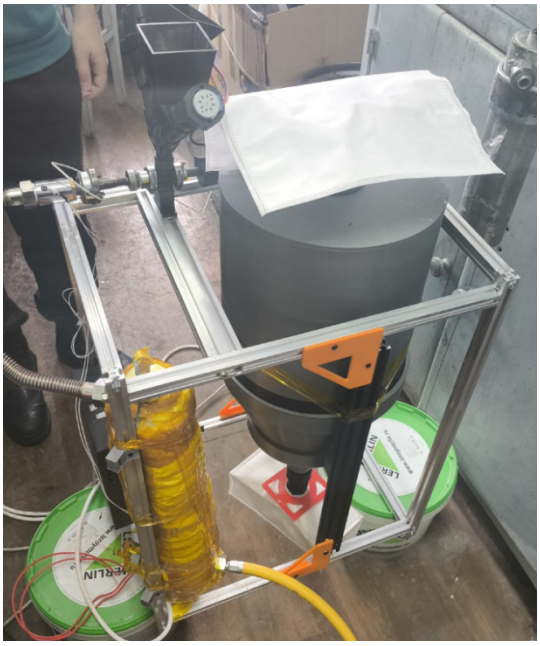


Рис. 2. Второй вариант установки

К недостаткам можно отнести наличие дополнительных соединительных патрубков, требующих периодического контроля герметичности. Однако с учетом удобства эксплуатации, уменьшения габаритов и минимизации потерь целевого продукта данные недостатки не являются критическими.

В ходе проведения натурных испытаний было установлено, что второй вариант компоновки является оптимальным, однако в последствие может быть улучшен и доработан. Результат его работы представлен на рис. 3.

Рис. 3. Готовый металло-полимерный гранулят

Таким образом, было рассмотрено две конструкции циклонов для улавливания порошковой смеси после обработки в струйном реакторе. Были выделены их достоинства и недостатки. По результатам испытаний наиболее оптимальным является второй вариант, который отличается универсальностью, простой обслуживания, большей герметичностью по сравнению с первым вариантом. Также достоинством новой конструкции являются меньшие габариты. Прототип улавливателя был выращен с использованием технологии 3D-печати FFF/FDM из термопласта ABS. Опытный образец целесообразно выполнять из металла или пластика с внутренним антистатическим покрытием, чтобы избежать налипания металло-полимерного гранулята на стенки улавливателя. Одним из возможных вариантов является нанесение покрытия (в частности, на основе фторопласта) на внутреннюю поверхность изготовленного на 3D-принтере корпуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Национальная технологическая инициатива: официальный сайт. – URL: https://nti2035.ru/markets/technet

2) Пономарев, В.Б. Расчет и проектирование оборудования для воздушной сепарации сыпучих материалов: учеб. пособие / В.Б. Пономарев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 96 с.

3) Родионов, А.И. Техника защиты окружающей среды / А.И. Родионов, В.Н. Крушин, Н.С. Торочешников. – М.: Химия, 1989. – 512 с.

УДК 621.929.5

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В РУБАШКЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СМЕСИТЕЛЯ АЛЮМИНИЕВОЙ СУСПЕНЗИИ

Е.А. Яковлева

Научный руководитель – **А.С. Ключников**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассмотрено влияние течения охлаждающей жидкости на эффективность теплообмена в конструкциях, имеющих рубашку охлаждения. Проведен анализ гидродинамики потока в смесителе алюминиевой суспензии и выявлены недостатки предыдущей конструкции с неупорядоченным течением охлаждающей жидкости. Предложен способ формирования упорядоченного потока за счет применения направляющего элемента – спираль.

Ключевые слова: *теплообмен, закрученный поток, рубашка охлаждения, смеситель алюминиевой суспензии, коэффициент теплоотдачи, число Рейнольдса, число Нуссельта*

FORMATION OF SWIRL FLOW IN THE COOLING JACKET OF AN ALUMINUM SUSPENSION MIXER

E.A. Yakovleva

Scientific Supervisor – **A.S. Klyuchnikov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article examines the influence of coolant flow on heat transfer efficiency in structures equipped with a cooling jacket. An analysis of the flow hydrodynamics in the aluminum suspension mixer is conducted, and the disadvantages of the previous design featuring disordered coolant flow are identified. A method for forming an ordered flow by employing a guiding element—a spiral—is proposed.

Keywords: *heat transfer, swirl flow, cooling jacket, aluminum suspension mixer, heat transfer coefficient, Reynolds number, Nusselt number*

В аппаратах, имеющих рубашку охлаждения, эффективность теплообмена во многом определяется не только расходом жидкости, но и характером ее движения. В данном случае движение происходит внутри межстенного пространства двух рубашек охлаждения. Интенсификация движения жидкости приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи [5, 8].

Даже при формально достаточном расходе охлаждения, оборудование все равно может перегреваться из-за неравномерно распределенного потока жидкости. В смесителях алюминиевой суспензии данный фактор особенно критичен, так как неравномерное охлаждение может привести к нарушению технологического режима.

В рассматриваемой конструкции, общий вид которой представлен на рис. 1, охлаждающая жидкость подается в верхнюю часть рубашки и свободно стекает вниз. Такая схема приводит к формированию неупорядоченного потока жидкости.

Неравномерность охлаждения подтверждается тепловизионным анализом, теплограмма которого показана на рис. 2. Съёмка выполнена тепловизором Testo 871 (Германия) со следующими параметрами: коэффициент излучения ε = 0,95 (окисленный металл), расстояние до объекта 1,0 м, угол съёмки 90° к поверхности. Паспортная погрешность прибора составляет ±2 °С или ±2% от измеряемого значения. Измерения проводились при установившемся тепловом режиме работы смесителя. Обработка термограмм выполнена в программном обеспечении TestoIRSoft.

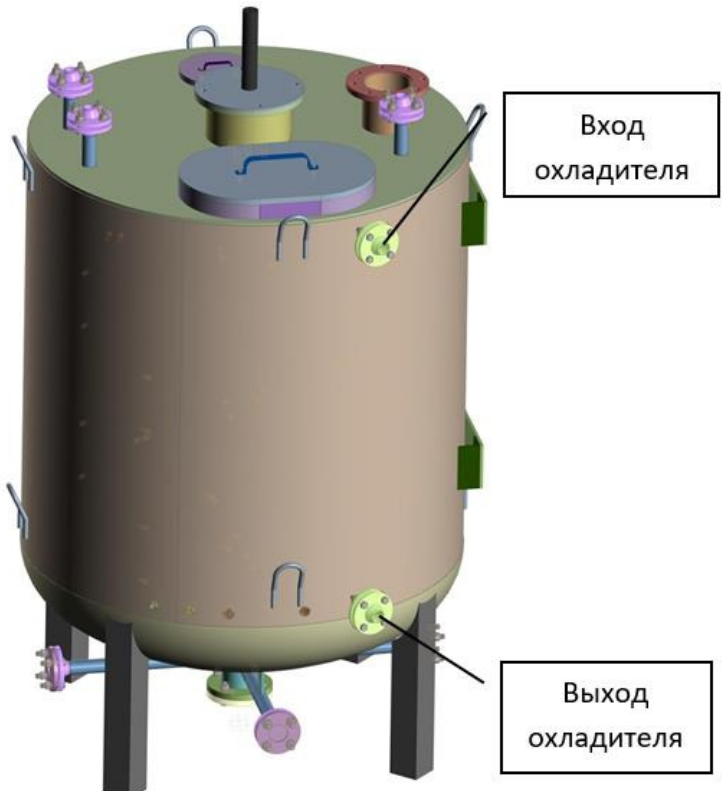


Рис. 1. Охлаждающая конструкция смесителя алюминиевой суспензии

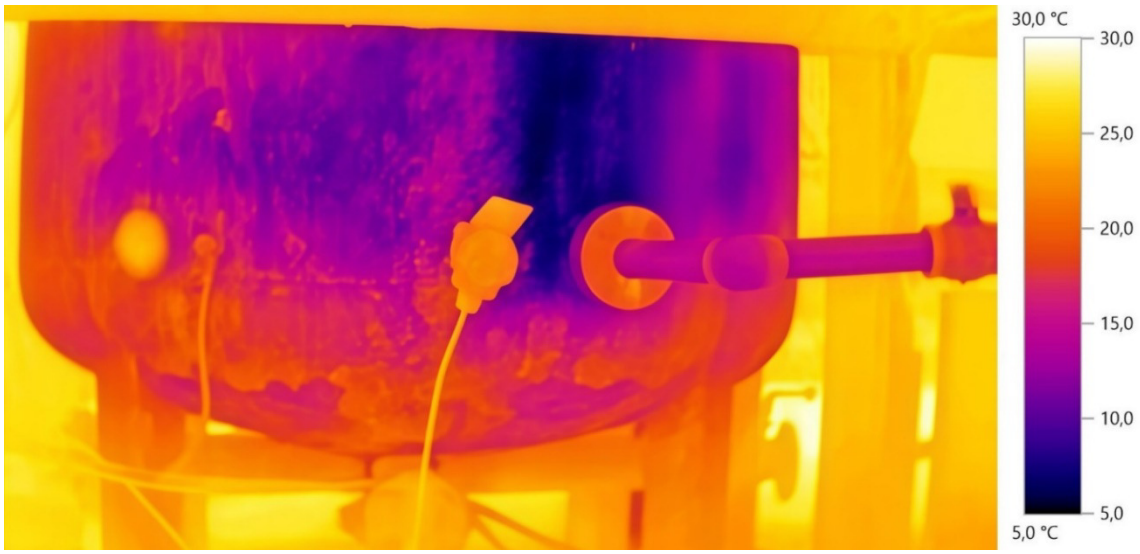


Рис. 2. Распределение температуры в рубашке охлаждения

Из теплограммы можно заметить, что охлаждение установки осуществляется неравномерно: в зоне подачи жидкости наблюдается интенсивный теплоотвод, тогда как в другие области охлаждаются слабо. Это можно объяснить тем, что поток жидкости не направлен и движется по наименьшему сопротивлению. В результате формируется локальная струя и застойные зоны.

Согласно теории пограничного слоя, уменьшение скорости движения жидкости, приводит к увеличению толщины теплового пограничного слоя и снижению интенсивности теплообмена [7, 14].

Для решения данной проблемы было предложено изменить характер движения охлаждающей жидкости с помощью направляющего элемента в виде спирали (рис. 3).

Спираль формирует винтовой канал вдоль высоты рубашки от входного патрубка охладителя к выходному патрубку охладителя рис. 4.

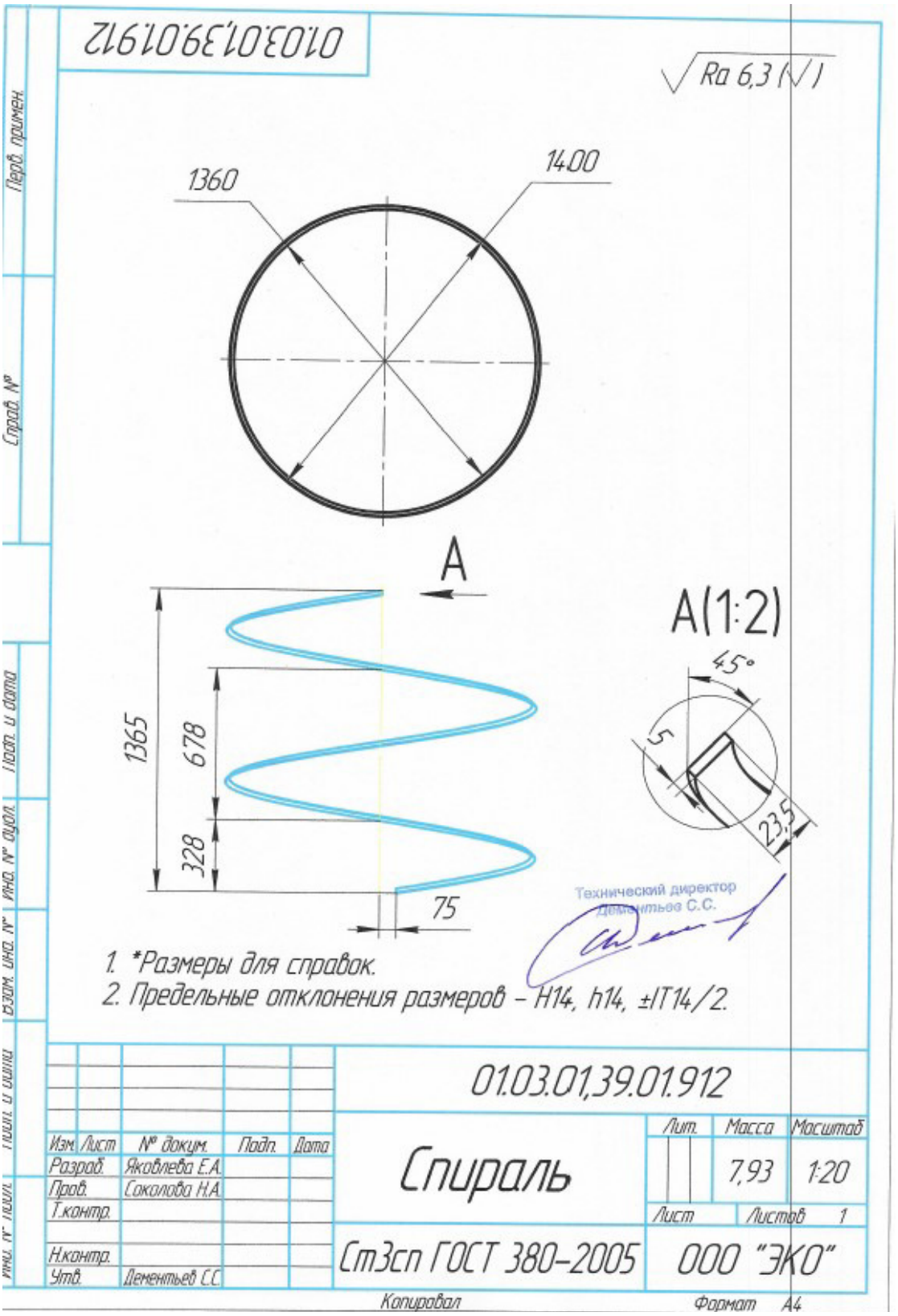


Рис. 3. Чертеж направляющей спирали

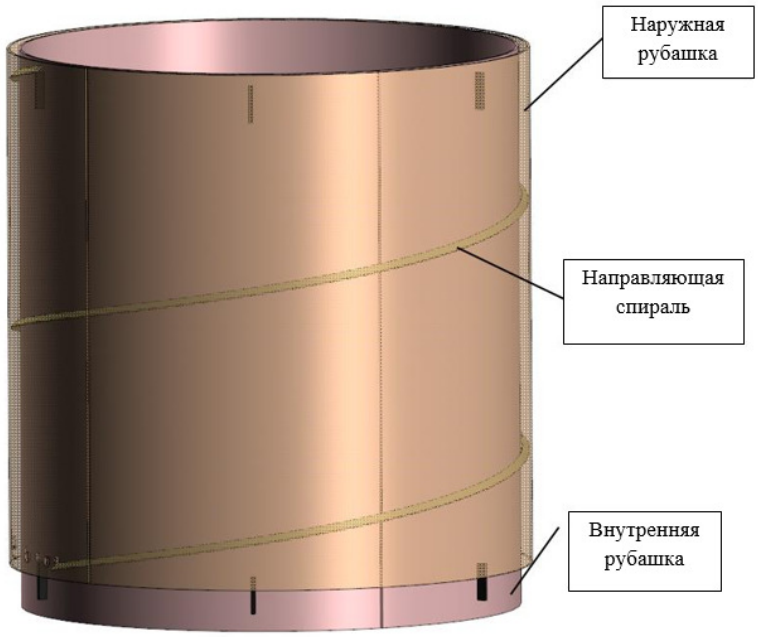


Рис. 4. Рубашка охлаждения с направляющим спиральным элементом

В предлагаемой конструкции угол наклона спирали относительно вертикальной оси принят равным 45° и обеспечивает устойчивое винтовое течение при сохранении полного заполнения канала по высоте. Стоит отметить, что наиболее выраженное разрушение пограничного слоя наблюдается именно в диапазоне углов наклона 30-50°. Оно является оптимальным, так как при меньших углах (<30°) доминирует осевое течение и поперечное течение ослабевает, а при больших углах (>50°) возрастает гидравлическое сопротивление без пропорционального роста теплоотдачи [7, 9].

Средний диаметр рубашки рассчитывается по формуле

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{вн}} + D_{\text{нар}}}{2}, \quad (1)$$

где $D_{\text{вн}}$ – диаметр внутренней рубашки, мм; $D_{\text{нар}}$ – диаметр наружной рубашки, мм.

Длина одного витка рассчитывается по формуле

$$l = \sqrt{(\pi D_{\text{ср}})^2 + P^2}, \quad (2)$$

где $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр рубашки, м; P – шаг спирали, м.

Число витков рассчитывается по формуле

$$n = \frac{H}{P}, \quad (3)$$

где H – высота рабочей зоны, м.

Общая длина винтового канала рассчитывается по формуле

$$L = n \cdot l, \quad (4)$$

где n – число витков; l – длина одного витка.

Согласно расчётам из табл. 1, в модернизированной конструкции вода проходит путь, равный 8,7 м, тогда как в исходной конструкции длина стекания была близка к расстоянию между патрубками рубашки, которое составляло 1,2 м. Исходя из расчета длины винтового канала L и высоты рабочей зоны H можно вычислить, во сколько раз увеличилась траектория движения охлаждающей жидкости по сравнению с исходной конструкцией свободного течения, через отношение длины винтового канала к высоте рабочей зоны.

$$K = \frac{L}{H}. \quad (5)$$

Как видно из табл. 1, направляющая спираль увеличивает путь движения охлаждающей жидкости в 7 раз, что способствует более равномерному распределению потока по поверхности рубашки и уменьшению застойных зон.

Площадь охлаждаемой цилиндрической поверхности:

$$F = \pi D_{\text{ср}} H. \quad (6)$$

Спираль организует движение воды вдоль поверхности рубашки площадью 5,3 м^2 (таблица 1). В исходной конструкции значительная часть этой площади работала неэффективно, что подтверждается теплограммой: в зоне подачи жидкости наблюдается сильно выраженный теплоотвод, а удаленные участки охлаждались заметно слабее.

Таблица 1. Результаты расчета геометрических параметров спиральной рубашки охлаждения

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Средний диаметр рубашки	$D_{\text{ср}}$	1,375	м
Высота рабочей зоны	H	1,235	м
Шаг спирали	P	0,678	м
Длина одного витка	l	4,373	м
Число витков	n	2	-
Общая длина винтового канала	L	8,746	м
Увеличение траектории движения охлаждающей жидкости	K	7	-
Площадь охлаждаемой цилиндрической поверхности	F	5,335	м^2

Внешний вид реализованной конструкции смесителя суспензии с установленным направляющим элементом представлен на рис. 5.

Рис. 5. Смеситель с направляющей спиралью

Расход охлаждающей жидкости определен экспериментально с использованием накладного ультразвукового расходомера FLUXUS F601 (Германия). Датчики прибора крепились на наружной поверхности подводящего трубопровода с помощью магнитных фиксаторов; для обеспечения акустического контакта использовался специальный гель. Метод измерений времени - импульсный, что обеспечивает высокую точность для однородных жидкостей. Паспортная относительная погрешность измерения расхода составляет ±0,5…1%. Измерения проводили при установившемся режиме течения, трёхкратно, с последующим усреднением результата.

Площадь поперечного сечения кольцевого канала рассчитывается по формуле

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2\right). \quad (7)$$

Скорость потока рассчитывается по формуле:

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (8)$$

где Q – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для кольцевого канала гидравлический диаметр определяется как

$$d_{\text{г}} = D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}. \quad (9)$$

Подобные конструктивные решения часто применяются в теплообменной технике, где закрученные потоки применяются для повышения эффективности теплоотдачи [1, 7, 9, 10]. В частности, в ряде технических решений, используются спиральные элементы, обеспечивающие закручивание потока и интенсификацию теплообмена [2, 6]. Например, была предложена конструкция теплообменного аппарата со спиральными элементами, обеспечивающими направление движения потока по закрученному каналу, что обеспечивает направленное течение жидкости [11]. В более современных конструкциях также применяются элементы, изменяющие структуру течения теплоносителя с целью повышения эффективности теплообмена [12].

Теплообмен между стенкой и жидкостью описывается законом, сформулированным Ньютоном и Рихманом [3]:

$$q = \alpha * \left(T_\omega - T_f\right), \quad (10)$$

где q – тепловой поток; α – коэффициент теплоотдачи конвекции; $T_\omega - T_f$ – разность температур поверхности стенки рубашки и охлаждающей жидкости.

Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи α зависит от режима течения, который характеризуется числом Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (11)$$

где ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; μ – динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Чем больше скорость воды v, тем больше число Re, а чем больше число Рейнольдса, то есть сильнее турбулентность, тем выше становится коэффициент теплоотдачи α. В исходной конструкции наблюдается значительная неравномерность распределения скорости потока, что приводит к различным значениям числа Рейнольдса по поверхности и, соответственно, к неравномерному распределению коэффициента теплоотдачи.

При использовании направляющей спирали поток становится более равномерным и интенсивным, а перемешивание жидкости усиливается. Это приводит к переходу течения в более развитый турбулентный режим. В отличие от ламинарного режима, характеризующегося слоистым течением и слабым перемешиванием, турбулентный поток обеспечивает интенсивное перемешивание жидкости и разрушение пограничного слоя, что способствует увеличению коэффициента теплоотдачи.

Дополнительная оценка эффективности теплообмена может быть выполнена на основе критериального подхода [5, 8]. Связь между теплообменом и режимом течения выражается через число Нуссельта:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda}, \tag{12}$$

где λ – теплопроводность воды, Вт/(м · К).

Данный критерий представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи, позволяющий исключить влияние размера d и теплофизических свойств жидкости λ, акцентируя внимание непосредственно на интенсивности теплообмена между стенкой и потоком. Для турбулентного течения справедлива зависимость [5,8]:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}021 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}8} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}43}, \tag{13}$$

где *Pr* – число Прандтля; 0,8 – показатель степени отражает нелинейную зависимость интенсивности теплообмена от скорости потока в турбулентном режиме; 0,43 – показатель степени, который характеризует влияние физических свойств жидкости на теплоотдачу

Согласно исследованиям, посвященным интенсификации теплообмена [9,10], закрученные потоки приводят к увеличению числа Нуссельта за счет усиления перемешивания. Таким образом изменение структуры в сторону закрученного движения должно приводить к увеличению коэффициента теплоотдачи α и интенсификации теплообмена без увеличения расхода охлаждающей жидкости [4, 13].

Результаты эксплуатации согласуются с данными теплового анализа, который представлен в виде теплограммы на рис. 6.

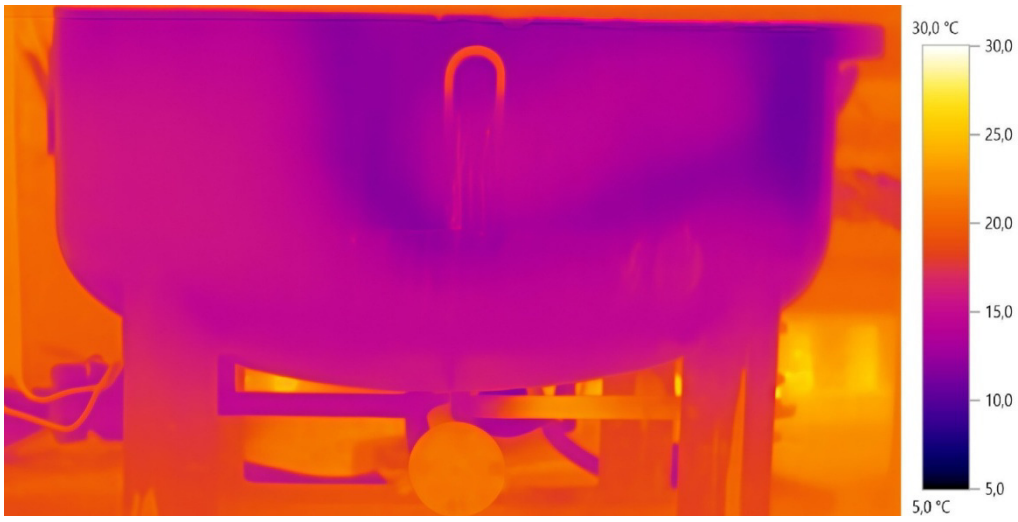


Рис. 6. Теплограмма рубашки со спиралью

В отличие от исходной конструкции (рис. 2), наблюдается значительно более равномерное распределение температуры по всей поверхности аппарата. Отсутствуют выраженные локальные зоны перегрева, характерные для исходной конструкции, где охлаждение происходило преимущественно в области подачи жидкости. Температурное поле имеет сглаженный характер, что свидетельствует о равномерном обтекании поверхности рубашки охлаждающей жидкостью. В результате повышается равномерность теплоотвода и эффективность использования всей площади рубашки.

Для количественного сравнения необходимо оценить коэффициент теплоотдачи в исходной конструкции без спирали. В исходном варианте охлаждающая жидкость подается сверху и свободно стекает вниз, формируя локальную струю и обширные застойные зоны, что подтверждается теплограммой (см. рис. 2). Течение в активно работающей зоне можно приближенно описать моделью продольного обтекания гладкого канала. При том же расходе гидравлический диаметр и скорость остаются неизменными.

Для количественной оценки эффективности исходной конструкции введем коэффициент использования поверхности η, равный отношению площади, эффективно участвующей в теплообмене, к общей площади рубашки. По данным тепловизионного анализа (см. рис. 2) установлено, что интенсивный теплоотвод наблюдается лишь в зоне подачи жидкости, что составляет приблизительно 30% по оценке тепловизионного анализа от общей площади поверхности. Эффективный коэффициент теплоотдачи исходной конструкции оценивается как:

$$\alpha_{\text{исх}}^{\text{эфф}} = \alpha_{\text{теор}} \cdot \eta, \quad (14)$$

где $\alpha_{\text{теор}}$ – теоретический коэффициент теплоотдачи Вт/м$^2 \cdot$ К; η – коэффициент использования поверхности.

Таблица 2. Параметры потока охлаждающей жидкости

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Расход жидкости	Q	0,025	м^3/с.
Площадь поперечного сечения кольцевого канала	A	0,108	м^2
Скорость потока	v	0,23	м/с
Гидравлический диаметр кольцевого канала	$d_г$	0,05	м
Плотность воды	ρ	1000	кг/м^3
Динамическая вязкость	μ	0,001	Па $\cdot$ с
Число Рейнольдса	Re	11500	-
Число Прандтля	Pr	7	-
Число Нуссельта	Nu	93	-
Теплопроводность воды	λ	0,6	Вт/(м $\cdot$ К)
Теоретический коэффициент теплоотдачи	$\alpha_{теор}$	1116	Вт/м$^2 \cdot$ К
Коэффициент использования поверхности	η	0,3	-
Эффективный коэффициент теплоотдачи исходной конструкции	$\alpha_{исх}^{эфф}$	334,8	Вт/(м$^2 \cdot$ К)

Согласно результатам таблицы 2, течение охлаждающей жидкости в модернизированной конструкции является турбулентным, так как $\text{Re} > 2300$.

Также был выполнен анализ температурных полей, полученный методом тепловизионной съемки. В исходной конструкции (см. рис. 2) наблюдается значительная температурная неравномерность поверхности. В модернизированной конструкции (Рис.6) температурное поле становится более равномерным.

Исходя из данных представленных в табл. 3 коэффициент температурной неравномерности можно вычислить по формуле

$$K_T = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}, \quad (14)$$

где ΔT_1 – температурная неравномерность поверхности исходной конструкции, °С; ΔT_2 – температурная неравномерность поверхности модернизированной конструкции, °С.

Таблица 3. Сравнительный анализ температурных полей в исходной и модернизированной конструкциях

Анализ температурных полей в исходной конструкции			
Максимальная температура	T_{max1}	29,8	°C
Минимальная температура	T_{min1}	5,6 °	°C
Температурная неравномерность поверхности	ΔT_1	14,2	°C
Анализ температурных полей в модернизированной конструкции			
Максимальная температура	T_{max1}	15,6	°C
Минимальная температура	T_{min1}	11,3	°C
Температурная неравномерность поверхности	ΔT_1	4,3	°C
Коэффициент температурной неравномерности	K_T	3,3	-

Вывод

В результате проведённого исследования установлено, что эффективность теплообмена в рубашке охлаждения смесителя алюминиевой суспензии в значительной степени определяется структурой течения охлаждающей жидкости. Показано, что в исходной конструкции с неорганизованным гравитационным течением формируются локализованные струйные зоны и области застоя, что приводит к существенной неравномерности температурного поля и снижению эффективного коэффициента теплоотдачи.

Предложенное конструктивное решение, основанное на введении направляющего спирального элемента, обеспечивает формирование устойчивого закрученного потока и увеличение длины траектории движения теплоносителя более чем в 7 раз. Это приводит к интенсификации турбулентного перемешивания, разрушению теплового пограничного слоя и выравниванию гидродинамических параметров по всей поверхности теплообмена.

На основе экспериментальных данных и критериальных зависимостей установлено, что применение спирального элемента способствует повышению коэффициента теплоотдачи и увеличению степени использования поверхности рубашки. При этом температурная неравномерность снижается в 3,3 раза, что подтверждает существенное повышение эффективности теплоотвода.

Таким образом, разработанная конструкция рубашки охлаждения с направляющим спиральным элементом внедрена в действующее производство и находится в промышленной эксплуатации более года. Экспериментальные наблюдения подтвердили устойчивую работу аппарата, снижение температурной неравномерности и отсутствие зон локального перегрева, характерных для исходной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Исследование теплогидравлических характеристик теплообменного аппарата с перфорированным спиралевидным оребрением / Е.М. Битерякова, И.С. Павлихин, В.В. Казандаев, Ц. Лю, Д.А. Углавнов, А.А. Шиманов, И.В. Кудинов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2025. – Т. 33, № 4. – С. 96-113.

2) Галаев, С.А. Турбулентное течение и теплоотдача на начальном участке канала прямоугольного сечения с односторонним внутренним оребрением / С.А. Галаев, В.В. Рис // Тепломассообмен и гидравлика в закрученных потоках: Сборник тезисов IX международной конференции (Нижний Новгород, 10–12 октября 2023 года 2023). – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023. – С. 160-162.

3) Горбатов, В.И. Теплофизика. Основы технической термодинамики, теплопроводность, конвективный теплообмен, элементы теории подобия, нестационарная теплопроводность, теплообмен излучением / В.И. Горбатов, В.Ф. Полев; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. – 90 с.

4) Горелов, Ю.Г. Гидродинамика, интенсификация теплообмена и трения в модернизированных вихревых трактах, каналах охлаждения с комбинацией наклонных ребер и овально-траншейных лунок // Тепломассообмен и гидравлика в закрученных потоках: Сборник тезисов IX международной конференции (Нижний Новгород, 10–12 октября 2023 года 2023). – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023. – С. 162-164.

5) Исаченко, В.П. Теплопередача: Учебник для теплоэнерг. спец втузов / В.П. Исаченоко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 417 с.

6) Каримов, К.Ф. Влияние входных и выходных условий на структуру потока при радиальном входе в канал со скрученной лентой / К.Ф. Каримов, С.Э. Тарасевич, А.М. Ермаков // Тепломассообмен и гидравлика в закрученных потоках: Сборник тезисов IX международной конференции (Нижний Новгород, 10–12 октября 2023 года 2023). – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023. – С. 166-167.

7) Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Букинист, 1979. – 416 с.

8) Лыков, А.В. Тепломассообмен: справочник / Лыков А.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 478 с.

9) Мартыненко, О.Г. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 2 / пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко, А.А. Михалевича, В.К. Шикова. – М: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.

10) Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

11) Пат. № 74697 Российская федерация, МКП F28D 7/04 (2006.01) Спиральный теплообменник: опубл. 10.07.2008 / Чумазов Л.В.

12) Пат. № 2705167 Российская федерация, МКП F28D 7/04 (2006.01) Теплообменный аппарат: опубл. 05.11.2019 / Чернышов В.А.

13) Печенегов, Ю.Я. Сравнение теплогидравлической эффективности теплообмена потока в трубе без и при наличии вставленной скрученной ленты / Ю.Я. Печенегов, В.А. Косов, М.А. Косов // Тепломассообмен и гидравлика в закрученных потоках: Сборник тезисов IX международной конференции (Нижний Новгород, 10–12 октября 2023 года 2023). – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023. – С. 171-172.

14) Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Букинист, 1974. – 712 с.

Направление 5. ЭКОНОМИКА ДАННЫХ И ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ

УДК 004.4'23

МОБИЛЬНЫЕ ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ТЕСТИРОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

И.С. Аверьянов

Научный руководитель – **С.Ю. Бойков**, канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

В работе рассмотрены мобильные обучающие системы как инструмент формирования компетенций в области автоматизированного тестирования программного обеспечения. Показано, что мобильный формат особенно удобен для поэтапного освоения технических тем, регулярного повторения материала и быстрого получения обратной связи. Описаны ключевые элементы мобильного приложения для обучения автоматизации тестирования: модульная структура, короткие уроки, интерактивные задания, кейсы и средства отслеживания прогресса.

***Ключевые слова**: мобильное обучение, мобильная обучающая система, автоматизированное тестирование, компетенции, программное обеспечение, корпоративное обучение*

MOBILE LEARNING SYSTEMS AS A MEANS OF FORMING COMPETENCIES IN AUTOMATED SOFTWARE TESTING

I.S. Averyanov

Scientific Supervisor – **S.Y. Boykov**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

The paper examines mobile learning systems as a tool for forming competencies in automated software testing. It is shown that the mobile format is especially suitable for gradual study of technical topics, regular review of material, and rapid feedback. The key elements of a mobile application for teaching test automation are described: modular structure, short lessons, interactive tasks, case studies, and progress tracking tools.

***Keywords:** mobile learning, mobile learning system, automated testing, competencies, software, corporate learning*

Цифровая образовательная среда все заметнее смещается в сторону мобильных форматов. Смартфон перестал быть только средством связи или площадкой для быстрого просмотра материалов. Он превратился в постоянную точку доступа к обучению, где можно читать теорию, решать задания, отслеживать прогресс и возвращаться к сложным темам в удобный момент. Для технических направлений этот формат особенно интересен, поскольку позволяет убрать из обучения лишнюю тяжеловесность и сделать его более регулярным.

Одной из областей, где такой подход выглядит перспективно, является автоматизированное тестирование программного обеспечения. Вход в эту тему редко бывает простым. Одновременно приходится осваивать основы тестирования, базовые принципы программирования, логику построения автотестов, работу с инструментами, анализ ошибок и понимание того, в каких случаях автоматизация действительно оправдана. Если весь материал подается крупными блоками и без постоянной практики, часть обучающихся быстро теряет темп и интерес.

На этом фоне мобильная обучающая система может выступать не как упрощенная версия полноценного курса, а как самостоятельный инструмент формирования профессиональных компетенций. За счет коротких модулей, встроенной практики и

быстрого отклика такая система помогает осваивать тему постепенно, без ощущения перегруженности. Особенно актуально это для корпоративной среды, где обучение часто приходится совмещать с рабочим графиком и ограниченным временем.

Для формирования компетенций важна не только полнота содержания, но и способ его подачи. Мобильный формат дает несколько преимуществ, которые напрямую влияют на качество усвоения технического материала. Прежде всего, речь идет о модульности. Сложная тема легче воспринимается, когда она разбита на короткие законченные блоки: отдельно рассматриваются основы тестирования, отдельно – структура автотеста, отдельно - локаторы, ожидания, работа с тестовыми данными и типовые причины нестабильности.

Не менее важна регулярность. В автоматизированном тестировании результат редко достигается за счет редких, но длинных занятий. Гораздо заметнее работает ритм небольших, но постоянных учебных сессий. Мобильное приложение поддерживает именно такой формат: теория изучается в короткий промежуток времени, затем сразу закрепляется вопросом, мини-кейсом или тренажером. Вследствие этого обучение становится встроенным в повседневную практику, а не откладывается до момента, когда появится несколько свободных часов подряд.

Еще одно сильное качество мобильной среды связано с обратной связью. При изучении технических тем ошибка, оставленная без разбора, быстро тянет за собой следующие затруднения. Если после небольшого блока материала обучающийся сразу получает проверку и объяснение, пробел фиксируется раньше, чем превратится в системную проблему. Для автоматизации тестирования это особенно значимо, так как даже базовое непонимание логики сценария или структуры страницы приводит к накоплению типовых ошибок уже на старте.

Подготовка в области автоматизированного тестирования не сводится к умению запускать готовые проверки. Полноценное освоение темы предполагает формирование нескольких взаимосвязанных групп компетенций.

Первая группа – теоретическая база. Сюда относится понимание целей тестирования, различий между ручной и автоматизированной проверкой, знание жизненного цикла дефекта, представление о типах тестов, уровнях тестирования и критериях качества программного продукта [2]. Без этой основы автоматизация быстро превращается в механическое выполнение шагов без осознания смысла.

Вторая группа — технические компетенции. Здесь уже требуется понимание базового программирования, логики условий, циклов, функций, работы с переменными, чтения кода и структуры проекта. Также важны знания о тестовых инструментах: например, как устроены тестовые фреймворки, для чего нужны локаторы, как работают ожидания, что такое тестовые данные, почему тест может быть нестабильным и как анализировать падения [1, 3]. На начальном этапе подготовки целесообразно включать в содержание обучения базовые элементы реального инструментария автоматизации: работу с локаторами, ожиданиями, проверками, тестовыми данными, HTTP-запросами, разбором ответов API и чтением логов выполнения тестов. Отдельное внимание может уделяться знакомству с фреймворками автоматизации и типовыми подходами к организации тестового проекта, включая модульную структуру, повторное использование шагов и выделение Page Object [1, 3].

Третья группа относится к практическому применению знаний. Здесь уже требуется умение разобрать поведение системы, выделить проверяемую логику, определить, что именно стоит автоматизировать, и понять, какая проверка будет надежной. Практическая подготовка особенно важна потому, что автоматизация тестирования строится не на запоминании определений, а на последовательном принятии решений.

Отдельно стоит выделить метапредметные компетенции: внимательность к деталям, дисциплину, способность работать с ошибкой, умение пошагово анализировать проблему и возвращаться к трудным темам. В мобильной обучающей системе эти качества тоже могут развиваться, если задания строятся не только на выборе правильного варианта, но и на разборе реальных ситуаций, поиске причины сбоя и сопоставлении решения с результатом.

Мобильное приложение для обучения автоматизированному тестированию целесообразно рассматривать не только как образовательную платформу, но и как программную систему с выделенной клиентской и серверной частью. Мобильный клиент отвечает за авторизацию, навигацию по курсам, отображение контента, запуск интерактивных заданий и получение результатов проверки. Серверная часть обеспечивает хранение учебных модулей, управление попытками, проверку ответов, сбор телеметрии и синхронизацию прогресса между устройствами. На верхнем уровне в системе могут располагаться курсы или направления: основы тестирования, введение в программирование, UI-автотесты, API-тестирование, работа с ошибками, подготовка к реальным задачам. Внутри курса материал делится на короткие модули, а каждый модуль состоит из набора типизированных сущностей: теория, пример, задание, результат проверки, разбор ошибки. Такое построение делает систему не просто удобной для восприятия, но и технологически управляемой.

Внутри каждого модуля может использоваться единая техническая схема прохождения: краткий теоретический блок, затем демонстрационный пример, после него — проверочное задание и автоматическая валидация результата. После темы о локаторах обучающемуся может предлагаться выбор наиболее устойчивого селектора из нескольких вариантов DOM-структуры. После блока об ожиданиях — анализ сценария, в котором тест падает из-за race condition или некорректного ожидания элемента. После знакомства со структурой проекта –задание на определение того, какой фрагмент следует вынести в Page Object, helper или fixture. За счет этого теория сразу связывается с типовыми инженерными решениями, а само обучение начинает напоминать работу с реальным тестовым проектом.

Для мобильного формата особенно полезны микротренажеры и встроенная sandbox-среда. Микротренажеры подходят для коротких учебных сессий: в них обучающийся может собрать шаги тестового сценария в правильном порядке, найти ошибочный фрагмент, сопоставить причину падения теста и способ ее устранения, определить лишний элемент в цепочке действий. Но для формирования прикладных навыков этого недостаточно, поэтому более сильным решением выглядит sandbox-режим, в котором можно выполнить ограниченный набор действий с кодом или конфигурацией теста. В упрощенном варианте такая среда может позволять редактировать селектор, условие ожидания, assertion или тело API-запроса, после чего серверная часть запускает проверку по эталонному сценарию и возвращает результат, лог ошибки и краткий разбор. Это приближает обучение к реальной инженерной практике, не требуя полноценной IDE на мобильном устройстве.

Отдельную ценность представляют кейсовые задания, приближенные к рабочим ситуациям. В них может использоваться описание пользовательского сценария, фрагмент тестового кода, стек-трейс, сообщение об ошибке, HTTP-ответ или краткий баг-репорт. Обучающемуся предлагается определить, что именно пошло не так, какую проверку стоит добавить, какой участок сценария наиболее уязвим или почему тест оказался нестабильным [4]. Технически такие кейсы могут проверяться по шаблонной модели: система сопоставляет выбор пользователя с эталонным решением, а для более сложных заданий — анализирует измененный фрагмент кода, ключевые токены ответа или набор выбранных действий. Вследствие этого приложение начинает работать не только как поставщик контента, но и как инструмент верификации инженерного решения.

Система такого типа должна содержать не только учебные модули, но и отдельные технические подсистемы: модуль авторизации и разграничения ролей, хранилище контента, сервис проверки заданий, подсистему аналитики, механизм уведомлений и модуль рекомендаций. Карта прогресса и история попыток могут формироваться на основе событийной модели, где фиксируются открытие урока, запуск задания, число попыток, время решения, тип ошибки и факт возврата к теме. В корпоративной среде такая архитектура позволяет видеть не только итоговый балл, но и траекторию освоения материала: какие темы вызывают затруднения, какие форматы заданий оказываются наиболее эффективными и на каком этапе обучающиеся чаще всего прекращают прохождение курса.

Эффективность мобильной обучающей системы нельзя сводить только к удобству интерфейса. Гораздо важнее понять, меняется ли уровень подготовки обучающихся и насколько стабильно работает сама цифровая платформа. Поэтому оценка результата должна строиться сразу по нескольким направлениям: образовательным, прикладным и техническим.

Первое направление - предметные знания. Оно может фиксироваться через входное и итоговое тестирование, а также через анализ типовых ошибок по темам. Если после прохождения курса обучающийся увереннее различает виды проверок, лучше понимает структуру автотеста и реже допускает логические ошибки в базовых заданиях, можно говорить о положительной динамике.

Отдельно следует оценивать технические показатели самой системы. К ним могут относиться время загрузки урока, стабильность запуска sandbox-заданий, корректность синхронизации прогресса, доля успешно обработанных попыток, время ответа сервиса проверки и число сбоев при выполнении интерактивных сценариев. Для мобильного приложения такие характеристики критичны, поскольку даже качественный учебный контент теряет ценность, если проверка работает нестабильно, ответы сохраняются с задержкой или пользователь теряет результат после разрыва соединения.

Третье направление - устойчивость учебной активности. Для мобильного формата этот показатель принципиален. Если приложение открывается один раз и не удерживает обучающегося в процессе, даже качественный контент не даст заметного эффекта. Поэтому значимыми становятся регулярность входов, доля завершенных модулей, количество повторных попыток и частота возврата к темам, которые вызвали затруднения.

Четвертое направление – субъективная оценка полезности. Она показывает, стало ли обучающемуся проще воспринимать тему, снизился ли страх перед автоматизацией и появилась ли уверенность в выполнении базовых действий. В сочетании с предметными результатами это дает более полное представление о качестве мобильной обучающей системы [5, 6].

В ходе рассмотрения темы было показано, что мобильные обучающие системы могут выступать действенным средством формирования компетенций в области автоматизированного тестирования программного обеспечения. Их образовательный потенциал связан не только с доступностью материалов, но и с возможностью организовать обучение небольшими логическими шагами, встроить в него постоянную практику и обеспечить быстрый отклик на ошибки.

Особую ценность такой формат приобретает при подготовке начинающих специалистов, для которых автоматизация тестирования нередко оказывается сложной и многослойной темой. Модульная структура курса, короткие уроки, микротренажеры, кейсовые задания и понятная траектория продвижения создают условия для постепенного и осмысленного освоения материала. Это позволяет рассматривать мобильное приложение не как второстепенное дополнение, а как полноценный инструмент поддержки профессионального становления.

В итоге мобильная обучающая система по типу современных образовательных платформ может использоваться как эффективная среда для формирования базовых знаний, практических навыков и устойчивой учебной мотивации в сфере автоматизированного тестирования программного обеспечения. При грамотной реализации такой подход способен сделать вход в профессию более мягким, а обучение - более регулярным, понятным и приближенным к реальным задачам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) AppiumDocumentation: офиц. сайт. - URL: https://appium.io/ (дата обращения: 08.04.2026).

2) International Software Testing Qualifications Board // ISTQB: [сайт]. - URL: https://istqb.org/ (дата обращения: 08.04.2026).

3) Playwright Documentation: офиц. сайт. - URL: https://playwright.dev/docs/intro (дата обращения: 09.04.2026).
4) Stepik: образовательная платформа. - URL: https://stepik.org/ (дата обращения: 09.04.2026).
5) Policy Guidelines for Mobile Learning // UNESCO: [site]. - URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000219641 (дата обращения: 10.04.2026).
6) Institute for Information Technologies in Education. Mobile Learning for Quality Education and Social Inclusion // UNESCO: [site]. - URL: https://iite.unesco.org/files/policy_briefs/pdf/en/mobile_learning.pdf (дата обращения: 10.04.2026).

УДК 621.865.8

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИВОДОВ ШАГАЮЩЕГО МИНИ КРАНА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ

В.В. Алексеев, Л.М. Шамахов

Научный руководитель — **Л. М. Шамахов,** ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В работе рассматривается проблема выбора типа привода для шагающего мини-крана, предназначенного для перемещения грузов массой от 250 кг до 1 тонны в стесненных условиях (дверные проемы, лестничные клетки). Проведен сравнительный анализ гидравлического, пневматического и электрического приводов по таким критериям, как удельной мощности, энергоэффективности, точности позиционирования, массогабаритным характеристикам и способности к самоторможению. Показано, что для грузоподъемности 1 тонны рациональным является гидропривод (или гибридная схема), а для 250 кг – электромеханический привод с червячным редуктором. Даны рекомендации по применению.

***Ключевые слова**: шагающий кран, мини-кран, гидропривод, пневмопривод, электропривод, сравнение приводов, грузоподъемность, проходимость*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DRIVES OF A WALKING MINI CRANE FOR CARGO TRANSPORTATION

V.V. Alekseyev, L.M. Shamakhov

Scientific Supervisor – **L.M. Shamakhov,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The paper discusses the problem of choosing the type of drive for a walking mini-crane designed to move loads weighing from 250 kg to 1 ton in confined spaces (doorways, staircases). A comparative analysis of hydraulic, pneumatic, and electric drives was conducted based on criteria such as specific power, energy efficiency, positioning accuracy, mass and size characteristics, and self-braking capabilities. It is shown that for a load capacity of 1 ton, a hydraulic drive (or a hybrid scheme) is rational, and for 250 kg, an electromechanical drive with a worm gearbox is rational. Recommendations for application are given.

***Keywords:** walking crane, mini-crane, hydraulic drive, pneumatic drive, electric drive, drive comparison, load capacity, and maneuverability*

Шагающие роботы, в частности гексаподы и октоподы [1], обладают уникальной способностью перемещаться по сложному рельефу, лестницам и завалам благодаря статической устойчивости и множеством точек контакта с опорой. В качестве прототипа для разработки предлагается взять серийный мини-кран-паук (например, MAEDA MK1033 (рис. 1) или его отечественный аналог). У таких кранов уже есть гидравлические выдвижные опоры, но они не предназначены для полноценного шагания – кран перемещают на шасси. Наша идея – доработать конструкцию: заменить простые опоры на активные шагающие конечности с приводами, сохранив при этом грузоподъёмный механизм.Перспективным направлением является создание на их базе компактных грузоподъемных кранов для использования в труднодоступных местах – внутри зданий, строительных площадках, придомовых территориях, а также на этажах, где невозможно применение автокранов или вилочных погрузчиков. Ключевым требованием к такому крану является возможность прохода в стандартный дверной проем (ширина 700–900 мм) при собственной массе, не превышающей 200–300 кг для переносимых версий. Привод шагающего механизма и грузоподъемного устройства определяет основные характеристики крана. В статье проведен сравнительный анализ трех типов привода применительно к двум классам грузоподъемности: 1 т (тяжелый вариант) и 250 кг (легкий вариант).

Рис. 1. Пример мини-крана-паука (MAEDA MK1033) с гидравлическими опорами – аналог по внешнему виду для предлагаемой конструкции [2]

Для мини-крана, перемещающегося на ногах, важны следующие параметры: способность поднимать груз без чрезмерного утяжеления конструкции; время работы от аккумулятора или возможность питания от сети 220 В; точность позиционирования, для безопасной установки груза с точностью до нескольких миллиметров; способность удерживать груз при отключении энергии без механического тормоза; массогабаритные показатели; сложность управления и надежность в условиях загрязнения.

Для начала сравнения приводов необходимо разобраться в их конструкции, узнать достоинства и недостатки.

Гидропривод [3] – это совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов с помощью гидравлической энергии — энергии потока жидкости, находящейся под давлением. Данный тип привода используется в тяжелой строительной технике. Основными достоинствами гидравлического привода являются: высокое рабочее давление (до 200–300 бар); большое усилие при малых размерах гидроцилиндра; простое самоторможение гидрозамками; плавность хода. Однако есть и недостатки такого типа привода, например, необходимость насоса, маслобака, фильтров и гидрораспределителей; низкий КПД (около 60–70%); значительная масса гидравлической системы.

Пневмопривод [4] – это совокупность устройств, которые предназначены для приведения в движение частей машин и механизмов посредством энергии сжатого воздуха. Основные достоинства данного привода являются: легкость, дешевизна, быстрота, чистота (отработанный воздух выпускается в атмосферу). Недостатки: низкое давление (обычно 6–10 бар), что при 1 т требует огромных диаметров цилиндров (поршень диаметром ~0,4 м при 6 бар для усилия 10 кН); сжимаемость воздуха делает невозможным плавное опускание груза (возникают рывки). Для крана грузоподъемностью 250 кг пневмоцилиндры также будут громоздкими.

Электропривод [5] — это устройство, которое преобразует электрическую энергию в механическую, используется в робототехнике и станках. Достоинства: высокий КПД (до 90–95%); компактность при использовании серводвигателей с планетарными редукторами; точное позиционирование по обратной связи от энкодера; возможность реализации червячных редукторов с самоторможением. Недостатки: при прямом приводе необходим большой момент, что ведет к массивному мотору; червячные редукторы имеют низкий КПД (50–70%) и греются; требуется надежная система торможения для удержания груза при отключении питания (механический тормоз в двигателе).

Для сравнительного анализа приводов рассмотрим их возможности при работе с 1 тонной груза со скоростью 0.05 м/с. Так, например, гидроцилиндр с диаметром поршня 50мм при давлении 160 бар способен создать усилие порядка 30 кН. С учетом массы всей гидросистемы, применение гидроприводов позволит реализовать передвижение конечностей через гидрораспределители. Однако габариты такой системы и возможная необходимость в охлаждении гидравлической жидкости является существенным недостатком. Вместе с этим, обслуживание гидросистемы в разы сложнее в сравнении с другими приводами

Пневмопривод – при 6 бар требуемый диаметр цилиндра – 0,46 м, что не проходит в дверной проем (ширина крана станет более 1 м). Помимо габаритов, проблема сжимаемости воздуха делает невозможным точное позиционирование груза, а значит, данный тип привода не может быть применён для подъема данного груза.

Электропривод – возможен, но достаточно тяжел и дорог. Электромеханический линейный привод на основе шарико-винтовой пары (ШВП) с двигателем 1,5 кВт и редуктором может весить 20–25 кг, но требует мощного тормоза. Для шагания ног потребуется 6–8 таких приводов, что увеличит массу крана до 200 кг без учета несущей рамы.

По итогу для подъема груза массой 1 тонна предпочтителен гидропривод. Он обеспечивает компактность силовых цилиндров (диаметр 40–60 мм), высокую удельную силу и встроенное самоторможение. Для шагания ног можно использовать те же гидроцилиндры, управляемые пропорциональными распределителями.

При грузоподъемности 250 кг (усилие подъема ~2,5 кН) и жестком ограничении по массе крана гидропривод оказывается слишком тяжелым, дорогим и сложным в обслуживании: даже миниатюрный насос с баком на 10–15 л добавляет около 30 кг. Пневмопривод из-за сжимаемости воздуха дает рывки и плохую управляемость, а для создания нужного усилия при 6 бар потребуется цилиндр диаметром 230 мм, что делает кран неуклюжим. Оптимален электропривод: серводвигатели мощностью 400–600 Вт с червячным редуктором (30:1) весят 5–7 кг на степень свободы, для подъема груза подходит электрическая лебедка с самотормозящим редуктором, а для ног — компактные робототехнические сервоприводы; итоговая масса шести ног с приводами составляет около 30 кг.

Проведенный анализ показал, что универсального привода для шагающего мини-крана, с разной грузоподъемностью, не существует. Для грузоподъемности 1 т наиболее подходящий - гидравлический привод, обеспечивающий высокие усилия при умеренных массогабаритах. Для грузоподъемности 250 кг значительно эффективнее электрический привод, который легче, точнее и чище в эксплуатации. Пневматический привод непригоден для обоих вариантов из-за низкого давления и сжимаемости рабочей среды. Особенность шагающего мини-крана, он должен иметь минимум 6 ног (гексапод) для статической устойчивости. Каждая нога требует, как минимум, двух степеней свободы (подъем/опускание и поворот). Для гидравлического привода (1 т) целесообразно использовать гидроцилиндры двойного действия с гидрозамками, распределители с электромагнитным управлением от бортового контроллера. Для электрического варианта (250 кг) – сервоприводы с абсолютными энкодерами и полевым управлением.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на создание гибридной системы: электрическое шагание и гидравлический подъем для крана средней грузоподъемности (500 кг).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Никашин, А.К. Разновидности шагающих роботов / А.К. Никашин, А.С. Корчагин // Альманах Крым. – 2023. – № 37. – С. 101-105. – EDN PRUHQT.

2) MAEDA mini cranes // Pinterest: [site]. – URL: https://ru.pinterest.com/pin/320388960975441736/ (дата обращения 06.04.2026).

3) Рысева, А.В. Обзор гидропривода для автоматизации машиностроительных производств / А.В. Рысева, Ю.А. Ставнюк // YOUTH FOR SCIENCE 2022: сборник статей Международного учебно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 28 февраля 2022 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. – С. 20-29. – EDN NGGUVE.

4) Пневматические устройства и системы в машиностроении: справочник / Е.В. Герц, А.И. Кудрявцев, О.В. Ложкин [и др.]; под общ. ред. Е.В. Герц. - М.: Машиностроение, 1981. - 408 с.

5) Васильев, Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода: Учебник. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 268 с.

6) Щербаков, М.И. Динамика конечности паукообразного робота / М.И. Щербаков // Системный синтез и прикладная синергетика: сборник научных работ X Всероссийской научной конференции. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 201-205.

УДК 004.032.26

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО РАНЖИРОВАНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ТЕМ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

К.Э. Алиев, В.А. Язев

Научный руководитель – **В.А. Язев**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена разработке метода автоматического выявления и ранжирования актуальных тем в Telegram-каналах с использованием машинного обучения. Предложена гибридная архитектура, объединяющая тематическое моделирование (LDA, NMF), анализ тональности на основе RuBERT, анализ пользовательских реакций и оценку влиятельности каналов. Для краткосрочного прогнозирования популярности тем используется модель LSTM. Эксперименты на данных 50 каналов (45 тыс. публикаций) показали точность попадания в топ-10 тем 76% и ошибку прогноза MAPE 19,3%. Метод эффективно выявляет начало информационных всплесков.

Ключевые слова: *тематическое моделирование, анализ социальных сетей, прогнозирование временных рядов, анализ тональности, динамическое ранжирование, LSTM, Telegram-аналитика, RuBERT*

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DYNAMIC RANKING OF TRENDING TOPICS IN SOCIAL NETWORKS BASED ON TOPIC MODELING AND NEURAL NETWORK FORECASTING METHODS

K.E. Aliev, V.A. Yazev

Scientific Supervisor – **V.A. Yazev**, Candidate in Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The paper presents a method for automatic identification and ranking of trending topics in Telegram channels using machine learning. A hybrid architecture combines topic modeling (LDA, NMF), sentiment analysis with the RuBERT model, user reaction analysis, and channel influence assessment. Short-term topic popularity is predicted using an LSTM model. Experiments on data from 50 channels (45,000 posts) achieved 76% top-10 topic detection accuracy and a forecasting error of MAPE = 19.3%. The approach effectively detects the onset of information surges.

Keywords: *topic modeling, social network analysis, time series forecasting, sentiment analysis, dynamic ranking, LSTM, Telegram analytics, RuBERT*

Введение

Стремительный рост объёмов контента в мессенджерах и социальных сетях создаёт потребность в автоматизированных методах выявления актуальных тем и прогнозирования динамики общественного интереса. Telegram-каналы представляют собой важный источник информации и формирования общественного мнения, однако традиционные подходы к анализу текстовых данных, основанные исключительно на частотных характеристиках или статическом тематическом моделировании, не учитывают темпоральную динамику публикаций и обратную связь от аудитории в виде реакций.

Современные исследования показывают важность комплексного анализа социальных медиа, учитывающего семантику текстов, временную динамику публикаций, тональность контента и реакции аудитории. Интеграция этих аспектов позволяет не только фиксировать текущее состояние информационного пространства, но и прогнозировать будущие тренды.

1. Обзор существующих подходов

Задача выявления актуальных тем традиционно решается с помощью алгоритмов тематического моделирования, таких как латентное размещение Дирихле (LDA) и

неотрицательная матричная факторизация (NMF) [1, 2]. Эти методы позволяют выделить скрытые тематические структуры в корпусе документов, однако обладают рядом ограничений при применении к динамическим потокам публикаций из социальных сетей.

Анализ тональности текстов на русском языке получил значительное развитие с появлением трансформерных архитектур, в частности модели RuBERT, демонстрирующей высокую точность классификации эмоциональной окраски текстов [3]. Интеграция сентимент-анализа с тематическим моделированием позволяет отслеживать не только что публикуется, но и с какой эмоциональной окраской это преподносится авторами каналов.

Анализ пользовательских реакций в Telegram представляет собой относительно новое направление исследований. Реакции (эмодзи) предоставляют прямую обратную связь о восприятии контента аудиторией и могут служить индикатором общественного интереса и эмоционального отклика. Существующие работы демонстрируют корреляцию между объёмом и типом реакций и дальнейшим распространением информации.

Временные аспекты анализа социальных медиа требуют применения моделей, способных работать с последовательностями данных. Рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) показали эффективность в задачах прогнозирования временных рядов интенсивности обсуждений и вирусности контента [4].

Несмотря на обширные исследования в каждой из перечисленных областей, комплексные решения, интегрирующие тематическое моделирование, анализ тональности и паттерны пользовательских реакций для прогнозирования популярности тем, остаются недостаточно разработанными, особенно применительно к экосистеме Telegram и русскоязычному контенту.

Архитектура предлагаемого подхода

На первом этапе осуществляется сбор публикаций из Telegram-каналов с использованием официального API. Telegram выбран из-за открытого API, высокой концентрации русскоязычной аудитории и наличия системы реакций пользователей. Собранные данные включают текст публикаций, метаданные (временные метки, информацию о канале), а также агрегированную статистику реакций пользователей на каждый пост.

Предобработка текстовых данных включает удаление специальных символов, нормализацию пробельных символов, лемматизацию с использованием библиотеки pymorphy2 и фильтрацию стоп-слов. Результатом этого этапа является корпус обработанных документов, готовых для тематического моделирования.

2. Тематическое моделирование и выделение актуальных тем

Для выделения латентных тем применяются два альтернативных подхода: LDA и NMF. Выбор конкретного алгоритма определяется на основе сравнения метрик качества, в первую очередь показателя когерентности (coherence score), измеряющего семантическую согласованность слов внутри каждой темы [5].

LDA моделирует документы как вероятностную смесь тем, а темы – как распределения слов [1]. NMF разлагает матрицу «документ–термин» на две неотрицательные матрицы, что также позволяет выделить тематические структуры [2].

Оптимальное количество тем определяется путём построения графика зависимости coherence score от числа тем и выбора точки, в которой дальнейшее увеличение количества тем не приводит к существенному росту когерентности. Каждой публикации присваивается вектор весов тем:

$$\theta_d = \left(\theta_{\{d,1\}}, \dots, \theta_{\{d,K\}}\right), \quad (1)$$

где K – общее число тем; $\theta_\{d,k\}$ – отражает степень принадлежности публикации d к теме k.

3. Временная динамика тем

Для каждой выделенной темы строится временной ряд её интенсивности, отражающий изменение концентрации публикаций по данной теме во времени. Интенсивность темы в момент времени t определяется как сумма весов данной темы во всех публикациях, опубликованных в соответствующий временной интервал (час, день).

Формально, если $P(t)$ — множество публикаций, опубликованных в интервале t, а $\theta_\{p,k\}$ — вес темы k в публикации p, то интенсивность темы k в момент t вычисляется как

$$I_k(t) = \Sigma\{p \in P(t)\}\theta_\{p,k\} \quad (2)$$

4. Анализ тональности контента

Для оценки эмоциональной окраски публикаций по каждой теме применяется предобученная модель RuBERT, адаптированная для задачи классификации тональности [3, 6]. Модель классифицирует каждую публикацию по трём категориям: позитивная, нейтральная, негативная тональность.

Тональность темы k в момент времени t определяется как взвешенное среднее оценок тональности публикаций, где веса соответствуют принадлежности публикаций к данной теме:

$$S_{k(t)} = \Sigma\{p \in P(t)\}\theta_{\{p,k\}} \cdot sentiment(p)/\Sigma\{p \in P(t)\}\theta_{\{p,k\}}, \quad (3)$$

где $sentiment(p) \in \{-1, 0, 1\}$ — результат классификации публикации p.

Совместный анализ интенсивности и тональности позволяет дифференцировать темы не только по концентрации публикаций, но и по эмоциональной окраске контента, что важно для понимания характера информационной повестки в каналах.

5. Анализ реакций пользователей

Система реакций в Telegram предоставляет важную информацию об отклике аудитории на публикации. Для каждой публикации собирается статистика реакций: общее количество реакций, распределение по типам эмодзи, динамика накопления реакций во времени.

Для оценки вовлечённости аудитории в тему вводится метрика engagement, характеризующая среднюю активность реакций на публикации по данной теме:

$$E_k(t) = \Sigma_\{p \in P(t)\}\,\theta_\{p,k\} \cdot reactions(p) \,/\, \Sigma_\{p \in P(t)\}\,\theta_\{p,k\}, \quad (4)$$

где $reactions(p)$ — общее количество реакций на публикацию p.

Эмодзи дополнительно классифицируются на позитивные, негативные и нейтральные. Соотношение типов реакций позволяет получить независимую оценку эмоционального отклика аудитории.

6. Выявление влиятельных каналов

Хотя в данном исследовании не анализируется граф взаимодействий между пользователями, важным аспектом является определение относительного влияния различных каналов в формировании информационной повестки. Для этого для каждого канала вычисляются показатели охвата и вовлечённости аудитории.

Влиятельность канала с характеризуется показателем influence(c), который может быть рассчитан на основе комбинации количества подписчиков, средней активности реакций на публикации. Публикации из более влиятельных каналов могут получать больший вес при расчёте динамики тем, отражая их роль в формировании общественной повестки.

7. Динамическое ранжирование тем

Комплексный рейтинг темы формируется на основе четырёх компонент: интенсивности публикаций, тональности контента, вовлечённости аудитории (реакций) и взвешенного влияния каналов. Для темы k в момент времени t рейтинг R_k(t) вычисляется как взвешенная комбинация нормализованных показателей:

$$R_{k(t)} = \alpha \cdot I_k^{norm(t)} + \beta \cdot \left|S_{k(t)}\right| + \gamma \cdot E_k^{norm(t)} + \delta \cdot C_{k(t)}, \quad (5)$$

где $I_k\text{^}norm(t)$ — нормализованная интенсивность темы; |S_k(t)| — абсолютное значение тональности (отражающее силу эмоциональной окраски); E_k^norm(t) — нормализованная вовлечённость аудитории; $C_k(t)$ – показатель влиятельности каналов, публикующих данную тему; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – веса компонент, сумма которых равна единице.

Показатель влиятельности каналов C_k(t) вычисляется как средневзвешенное влияние каналов, публикующих тему *k*:

$$C_{k(t)} = \Sigma_{\{p \in P(t)\}\theta_{\{p,k\}}} \cdot influence\big(channel(p)\big)/\Sigma_\{p \in P(t)\}\theta_{\{p,k\}}, \quad (6)$$

где *channel*(*p*) – канал, опубликовавший пост *p*.

8. Прогнозирование популярности тем

Для построения краткосрочных прогнозов популярности тем применяются рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), способные моделировать сложные временные зависимости в данных [4].

LSTM-модель принимает на вход временной ряд признаков темы за предшествующий период (окно наблюдения) и прогнозирует значения этих признаков на несколько шагов вперёд. В качестве входных признаков используются: интенсивность публикаций I_k(t), средняя тональность *S_k*(*t*), уровень вовлечённости *E_k*(*t*), показатель влиятельности каналов *C_k*(*t*)

Архитектура модели включает один или несколько LSTM-слоёв, за которыми следует полносвязный выходной слой, формирующий прогноз. Для каждой темы обучается отдельная модель или используется единая многозадачная архитектура, прогнозирующая динамику всех тем одновременно.

Обучение модели выполняется на исторических данных методом обратного распространения ошибки с минимизацией функции MSE.

Альтернативным подходом является использование моделей временных рядов, таких как ARIMA или Prophet, для прогнозирования интенсивности отдельных тем [7]. Нейросетевые архитектуры лучше моделируют нелинейные зависимости во временных рядах.

9. Описание данных для эксперимента

Для экспериментальной проверки предложенного метода были собраны данные из 50 тематических Telegram-каналов, охватывающих различные сферы: политику, экономику, технологии, культуру и социальные вопросы. Выборка каналов включала как крупные СМИ с аудиторией более 100 тысяч подписчиков, так и специализированные каналы с более узкой аудиторией.

Период наблюдения составил три месяца, в течение которых было собрано более 45 тысяч публикаций. Для каждой публикации фиксировались текст, дата и время публикации, идентификатор канала, а также агрегированная статистика реакций, собранная через 24 часа после публикации для обеспечения достаточного времени накопления откликов аудитории.

Данные разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80:20 по временному принципу: первые 80% временного интервала использовались для обучения моделей, последние 20% — для проверки качества прогнозирования.

10. Результаты тематического моделирования

Для определения оптимального количества тем было проведено сравнение значений метрики coherence score для различных значений *K* в диапазоне от 10 до 30. Зависимость coherence score от числа тем для алгоритмов LDA и NMF представлена на рис. 1 [5].

Как видно из графика, максимальное значение coherence score для модели LDA достигается при *K* = 20 и составляет 0.52. Для метода NMF наилучший результат наблюдается при *K* = 18 (0.49). При дальнейшем увеличении числа тем значение метрики начинает снижаться, что свидетельствует о снижении семантической согласованности тем. На основании этих результатов для дальнейших экспериментов была выбрана модель LDA с 20 темами.

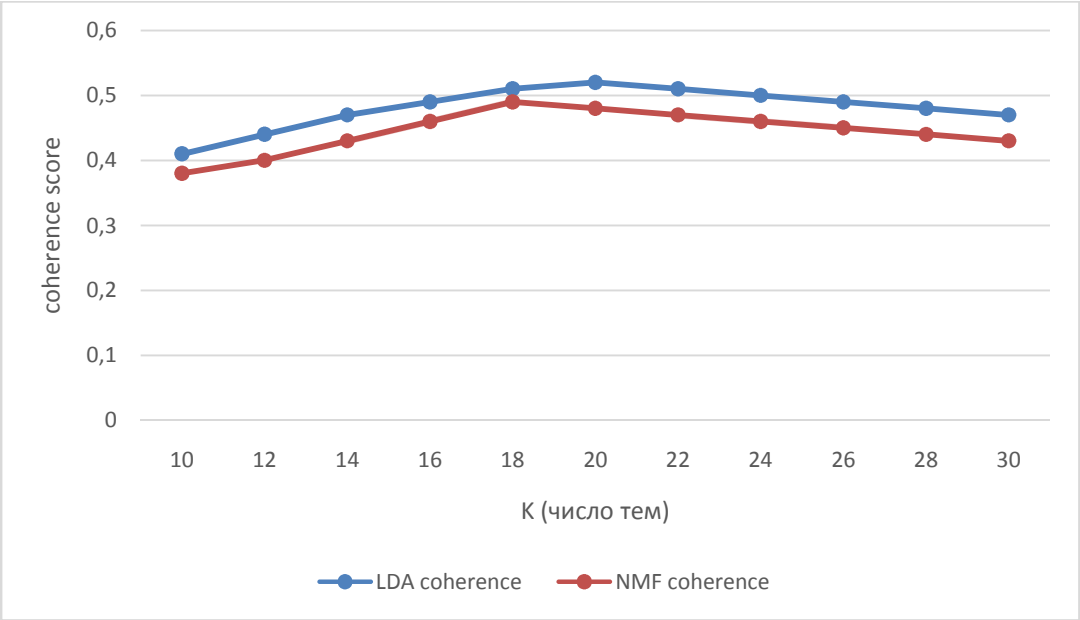


Рис. 1. Зависимость coherence score от числа тем

Выделенные темы охватывают широкий спектр публикаций. Наиболее крупными темами оказались: внутриполитические события (доля 14.3% от всех публикаций), международные отношения (11.8%), экономика и финансы (10.2%), технологические инновации (9.5%), социальные вопросы (8.7%). Для каждой темы были идентифицированы наиболее характерные термины с высокими весами, позволяющие экспертам легко интерпретировать содержание тематических кластеров.

11. Динамика и тональность тем

Анализ временных рядов интенсивности выявил несколько характерных паттернов. Большинство тем демонстрируют суточную периодичность с пиками активности публикаций в дневное и вечернее время. Несколько тем показали резкие всплески активности, соответствующие значимым новостным событиям: интенсивность возрастала в 3-5 раз по сравнению с базовым уровнем и затем постепенно снижалась в течение 2-3 дней.

Тема, связанная с технологическими инновациями, демонстрировала наиболее стабильную динамику с устойчивым трендом роста на протяжении всего периода наблюдения, что отражает возрастающий интерес информационного пространства к этой области.

Анализ тональности, проведённый с использованием RuBERT, показал следующее распределение: 42% публикаций классифицированы как нейтральные, 31% как позитивные и 27% как негативные. Темы существенно различаются по эмоциональной окраске контента. Политические темы характеризуются более высокой долей негативной тональности (до 45% публикаций), что отражает критический характер дискурса в этой сфере. Темы, связанные с культурой, технологиями и развлечениями, демонстрируют преимущественно позитивную или нейтральную тональность (позитивные публикации составляют 40-50%).

Выявлена корреляция между резкими изменениями тональности темы и последующими всплесками интенсивности публикаций, что свидетельствует о том, что эмоционально окрашенный контент стимулирует дальнейшее освещение темы в каналах.

12. Анализ реакций пользователей

Статистика реакций показала, что в среднем публикация получает 142 реакции, медианное значение составляет 37 реакций. Распределение реакций по публикациям является сильно скошенным: около 10% публикаций получают более 500 реакций, в то время как 30% публикаций получают менее 10 реакций.

Анализ типов реакций выявил преобладание позитивных эмодзи: 👍 (28% всех реакций), ❤ (19%), 🔥 (15%). Негативные реакции (👎, 😢) составили лишь 8% от общего

объёма, что может отражать как общую тенденцию аудитории выражать скорее поддержку, чем несогласие, так и особенности выборки каналов.

Корреляционный анализ показал сильную связь ($r = 0.68$) между количеством реакций на публикацию и её тематической принадлежностью к определённым темам. Публикации по темам технологий и культуры получают в среднем на 40% больше реакций по сравнению с политическими темами, что свидетельствует о различной вовлечённости аудитории в зависимости от содержания.

Важным наблюдением стало несоответствие между тональностью текста публикации и типом реакций в 18% случаев: публикации с негативной тональностью иногда получали преимущественно позитивные реакции и наоборот. Это указывает на сложность восприятия контента аудиторией и необходимость учёта реакций как независимого источника информации об отклике читателей.

13. Влиятельность каналов

Анализ влиятельности каналов на основе комбинации размера аудитории и средней активности реакций выявил, что топ-10 наиболее влиятельных каналов генерируют около 35% всех публикаций, но получают примерно 58% всех реакций. Это свидетельствует о концентрации внимания аудитории на контенте от ограниченного числа ключевых источников.

Публикации из влиятельных каналов демонстрируют более высокую вероятность получения большого количества реакций (средний коэффициент вовлечённости 0.024 против 0.011 для остальных каналов). Кроме того, темы, активно освещаемые влиятельными каналами, показывают более быстрый рост интенсивности в последующие дни, что подтверждает их роль в формировании информационной повестки.

14. Качество динамического ранжирования

Для оценки качества предложенного метода динамического ранжирования был проведён сравнительный анализ с базовыми подходами: ранжирование только по интенсивности публикаций, ранжирование только по количеству реакций, комбинированное ранжирование без учёта тональности и влиятельности каналов.

Веса компонент комплексного рейтинга были определены на основе оптимизации на обучающей выборке: $\alpha = 0.40$ (интенсивность), $\beta = 0.20$ (тональность), $\gamma = 0.30$ (вовлечённость), $\delta = 0.10$ (влиятельность каналов).

Качество ранжирования оценивалось путём сравнения топ-10 тем, предсказанных методом, с топ-10 темами, фактически получившими максимальный рост интенсивности и реакций в следующем временном интервале. Предложенный комплексный метод показал более высокую точность ранжирования по сравнению с базовыми подходами (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение точности методов динамического ранжирования тем

Метод ранжирования	Точность попадания в топ-10, %
Только по интенсивности публикаций	58
Только по количеству реакций	62
Комбинированный без учёта тональности и влиятельности	69
Предложенный комплексный метод	76

15. Качество прогнозирования популярности тем

Для прогнозирования динамики тем была разработана LSTM-архитектура с двумя слоями по 128 нейронов в каждом и dropout-регуляризацией (0.2). Окно наблюдения составило 7 дней, горизонт прогноза — 1-3 дня вперёд.

Оценка точности прогнозов проводилась с использованием метрик среднеквадратичной ошибки (RMSE) и средней абсолютной процентной ошибки (MAPE). При прогнозировании интенсивности тем на сутки вперёд модель показала RMSE = 0.24 и MAPE = 19.3%. При увеличении горизонта прогноза до трёх дней точность закономерно снижалась: RMSE = 0.38 и MAPE = 28.7%.

Дополнительно была проведена оценка качества прогнозирования для отдельных компонент. Прогноз вовлечённости аудитории (реакций) оказался более точным (MAPE = 16.2% на сутки вперёд), чем прогноз тональности (MAPE = 24.8%), что объясняется более высокой инерционностью паттернов реакций по сравнению с быстрыми изменениями эмоциональной окраски контента при появлении новых событий.

Сравнение LSTM-модели с базовыми методами прогнозирования временных рядов (ARIMA, экспоненциальное сглаживание) показало преимущество нейросетевого подхода: LSTM превзошла ARIMA по метрике MAPE на 7.4 процентных пункта, что подтверждает способность рекуррентных сетей моделировать сложные нелинейные зависимости в динамике тем [4, 7].

16 Реакция на информационные всплески

Особый интерес представляет способность метода адекватно реагировать на резкие изменения информационной повестки. В течение периода наблюдения было зафиксировано 8 значимых информационных всплесков, характеризующихся резким ростом интенсивности определённых тем (увеличение в 4 и более раз за сутки).

Предложенный метод продемонстрировал способность к быстрой адаптации: в 6 из 8 случаев система корректно идентифицировала начало всплеска в течение 6 часов после его начала, перемещая соответствующую тему в топ-3 ранжирования. В двух случаях задержка составила около 12 часов, что было связано с первоначально низким уровнем реакций аудитории.

Прогностическая модель показала ограниченную способность предсказывать такие всплески заблаговременно, что естественно для событий, обусловленных внешними непредсказуемыми факторами. Однако после начала всплеска модель эффективно прогнозировала его дальнейшую динамику: среднее отклонение прогноза интенсивности на следующие сутки от фактических значений составило 22%, что приемлемо для практических приложений.

17. Обсуждение результатов

Предложенный метод динамического ранжирования тем демонстрирует способность эффективно интегрировать различные аспекты анализа публикаций в Telegram-каналах. Комбинирование тематического моделирования с анализом тональности позволяет не только идентифицировать темы публикаций, но и оценивать эмоциональную окраску контента, что важно для понимания характера информационной повестки.

Включение анализа реакций пользователей обеспечивает оценку фактического отклика аудитории, который не всегда совпадает с тональностью самих публикаций. Это расхождение представляет интерес для дальнейших исследований и может свидетельствовать о сложных механизмах восприятия информации читателями.

Учёт влиятельности каналов при ранжировании тем отражает реальную структуру информационного пространства, в котором публикации от ключевых источников оказывают большее влияние на формирование повестки. Эксперименты подтвердили, что темы, активно освещаемые влиятельными каналами, с большей вероятностью демонстрируют дальнейший рост популярности.

Использование LSTM-архитектуры для прогнозирования позволяет строить краткосрочные прогнозы динамики тем с приемлемой точностью [4].

Ограничения предложенного метода связаны с необходимостью регулярного переобучения моделей при изменении характера публикаций и появлении новых тематик. Параметры весов компонент комплексного рейтинга могут требовать адаптации для различных предметных областей и типов каналов. Кроме того, метод не учитывает взаимовлияние каналов и каскадные эффекты распространения информации, что могло бы улучшить качество прогнозирования.

Отсутствие анализа комментариев пользователей ограничивает полноту картины общественного мнения: реакции предоставляют лишь агрегированную оценку, в то время как текстовые комментарии могли бы раскрыть более детальные аспекты восприятия контента.

Однако для многих Telegram-каналов комментарии недоступны или отключены, что делает анализ реакций единственным доступным источником обратной связи от аудитории.

18. Заключение и направления дальнейших исследований

В работе представлен комплексный метод динамического ранжирования актуальных тем в Telegram-каналах, основанный на синтезе тематического моделирования, анализа тональности, анализа реакций пользователей и учёта влиятельности каналов. Экспериментальная апробация на данных из 50 тематических каналов за трёхмесячный период продемонстрировала эффективность предложенного подхода для выявления значимых тем и прогнозирования динамики общественного интереса.

Основные результаты работы включают разработку гибридной архитектуры анализа контента, подтверждение важности реакций пользователей как индикатора вовлечённости аудитории и демонстрацию возможности краткосрочного прогнозирования популярности тем.

Практическая значимость разработанного метода заключается в возможности его применения для мониторинга информационного пространства в мессенджерах, выявления формирующихся трендов на ранних стадиях, оценки эффективности информационных кампаний на основе реакций аудитории, а также поддержки принятия решений в области управления коммуникациями и работы с общественным мнением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Blei, D.M. Latent Dirichlet Allocation / D.M. Slei, A.Y. Ng, M. Jordan // Journal of Machine Learning Research. – 2003. – Vol. 3. – P. 993–1022.

2) Lee, D.D. Learning the Parts of Objects Using Nonnegative Matrix Factorization / D.D. Lee, H.S. Seung // Nature. – 1999. – Vol. 401. – P. 788–791.

3) Kuratov, Yu. Adaptation of Deep Bidirectional Multilingual Transformers for Russian Language / Yu. Kuretov, M. Arkhipov // arXiv. – 2019. – 1905.07213.

4) Hochreiter, S. Long Short-Term Memory / S. Hochreiter, Ju. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, № 8. – P. 1735–1780.

5) Röder, M. Exploring the Space of Topic Coherence MeasuresИсследование пространства мер когерентности тем / M. Röder, A. Bot, A. Hineburg // WSDM'15, February 2–6, 2015, Shanghai. – 2015. – P. 399–408.

6) BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // NAACL-HLT. – 2019. – P. 4171–4186.

7) Time series analysis: forecasting and control / D.E.P. Box, G.M. Jenkins, G.C. Reinsel, G.M. Ljung. – Wiley, 2015.

УДК 004.92

ИНТЕРАКТИВНАЯ КАРТА КАМПУСА УНИВЕРСИТЕТА КАК ЭЛЕМЕНТ ЦИФРОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А.Е. Баданов

Научный руководитель – **А.С. Гуляев**, ассистент

Ярославский государственный технический университет

Интерактивные карты кампуса рассматриваются как элемент цифровой трансформации университетов, обеспечивающий навигацию и доступ к пространственно-привязанным сервисам. Выполнен обзор российских и зарубежных решений, проанализированы ключевые метрики интерактивности (уровень детализации, поиск, маршрутизация, indoor-навигация, интеграция с сервисами). На этой основе обоснована концепция интегрированной веб-карты кампуса технического университета, поддерживающей сквозной маршрут «город — кампус — корпус — этаж — аудитория» и расширенную атрибутику помещений.

Ключевые слова: *Интерактивная карта кампуса; цифровая трансформация университета; веб-картография; indoor-навигация; цифровой кампус; пространственно-привязанные сервисы; сквозная навигация*

INTERACTIVE MAP OF THE UNIVERSITY CAMPUS AS AN ELEMENT OF THE DIGITAL INFRASTRUCTURE

A.E. Badanov

Scientific Supervisor – **A.S. Gulyaev**, Assistant

Yaroslavl State Technical University

Interactive campus maps are considered as an element of the digital transformation of universities, providing navigation and access to spatially linked services. An overview of Russian and foreign solutions has been performed, and key metrics of interactivity (level of detail, search, routing, indoor navigation, and integration with services) have been analyzed. On this basis, the concept of an integrated web map of the technical university campus is substantiated, which supports the through-route "city – campus – building – floor – auditorium" and expanded attributes of the premises.

Keywords*: Interactive campus map; digital transformation of the university; web cartography; indoor navigation; digital campus; spatially linked services; end-to-end navigation*

В последнее десятилетие в контексте развития инфраструктурного содержания всё чаще встречается понятие «цифровая трансформация». Под ним понимается процесс системного внедрения цифровых технологий, приводящий к глобальной перестройке бизнеса. Этот процесс затрагивает все системы управления, взаимодействия с пользователями и принятия решений в организации. Цифровая трансформация в университетах проявляется в комплексном преобразовании информационных систем к целостной цифровой экосистеме. Целью трансформации является повышение эффективности управления университетом, улучшение качества исследовательской деятельности и обучения, а также создание инновационной среды. В таком контексте интерактивные карты кампуса рассматриваются не как вспомогательное приложение, а как элемент цифровой среды, обеспечивающий связность пространства университета и доступ к пространственно-привязанным сервисам.

Потребность в интерактивных картах кампуса обусловлена несколькими группами проблем:

— Проблема навигации. Современные университеты представляют собой сложные пространственные структуры с распределёнными корпусами, общежитиями и объектами инфраструктуры; для абитуриентов и новых студентов ориентирование в такой среде

оказывается затруднительным, а статичные схемы и печатные планы быстро устаревают и не обеспечивают сквозной навигации.

— Проблемы информирования и коммуникации. Традиционные средства информирования (стендовые карты, указатели, текстовые инструкции на сайте) слабо поддерживают индивидуальные сценарии поведения: построение маршрута с учётом расписания, доступности, типов помещений и текущих ограничений.

— Проблема интеграции. В условиях развития «цифрового кампуса» возрастает потребность во встраивании навигационных сервисов в другие системы: расписание, бронирование аудиторий, безопасность, управление мероприятиями.

Целью настоящей работы является исследование целесообразности и принципов построения интегрированной интерактивной карты кампуса университета, объединяющей обзорную геоинформационную карту территории с детализированными схемами этажей отдельных корпусов. В качестве объекта исследования рассматривается кампус технического университета, в качестве предмета — методы и программные средства веб-визуализации пространственных данных для поддержки сквозных сценариев навигации пользователей. Особое внимание уделяется соотношению двух уровней представления пространства: общей карты кампуса (макро-уровень), обеспечивающей ориентацию между зданиями, и интерактивных планов корпусов с поэтажной планировкой и атрибутами помещений (микро-уровень), необходимых для поиска конкретных аудиторий, сервисных зон и элементов инфраструктуры.

В российских университетах уже применяются различные варианты цифровых карт кампуса, чаще всего в формате веб-страниц со статичными или слабо интерактивными схемами. Так, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого публикует карту кампуса с указанием корпусов, общежитий и ключевых объектов инфраструктуры, опираясь на встроенную карту города и текстовые пояснения по доступу к территории [1]. Томский государственный университет [2] и Кузбасский государственный технический университет [3] также предлагают онлайн-карты кампуса, позволяющие пользователю визуально оценить расположение зданий и сервисов, но без сквозной навигации до уровня этажей и отдельных кабинетов. Эти решения частично решают задачу макро-ориентирования, но ограничены по глубине детализации и степени интерактивности.

Ряд российских вузов и связанных с ними проектов демонстрируют движение в сторону более глубокой интеграции картографии и внутренней инфраструктуры. В НИУ ВШЭ публикуются схемы кампусов и навигаторы по корпусам, где акцент сделан на логике нумерации аудиторий и ориентировании внутри зданий с опорой на указатели и цифровые схемы [4]. В кампусном проекте МГУ им. М.В. Ломоносова, реализованном компанией «Инфоматика», карта кампуса встроена в экосистему «кампусной карты» и инфоматов: через специализированные терминалы пользователи могут просматривать карту кампуса, строить маршрут до нужной аудитории, получать связанную сервисную информацию (расписание, библиотечные услуги и т.п.) [5].

У зарубежных университетов также накоплен опыт построения интерактивных карт кампуса с разной глубиной детализации и интеграции с цифровой инфраструктурой.

Университет Тринити (США) использует интерактивную карту на платформе Concept3D, которая поддерживает полнотекстовый поиск локаций, просмотр категорий объектов, построение маршрутов (в том числе с учётом доступных путей и парковок), а также интеграцию с календарём событий университета: события автоматически отображаются на карте и привязываются к конкретным площадкам [6].

Университет Нью-Мексико внедрил онлайн-карту кампуса, ориентированную на повседневную навигацию по нескольким кампусам. Она предоставляет поиск зданий и точек интереса, построение маршрутов с пошаговыми инструкциями, отображение парковок [7].

Отдельный класс решений составляют специализированные платформы indoor-навигации (система внутреннего позиционирования), такие как MazeMap, которые предоставляют вузам комнатный уровень детализации, маршрутизацию внутри зданий, в том

числе с учётом доступности, и интеграцию с академическими платформами. MazeMap позиционируется как глобальный стандарт для цифровых внутренних карт и кампусной навигации, обеспечивающий связку навигации с расписаниями, сервисами и операционной деятельностью университетов. Наряду с этим компании, занимающиеся цифровым навигацией и виртуальными турами, подчёркивают роль интерактивных карт в привлечении абитуриентов и формировании представления о кампусе до визита, примером является Норвежский университет естественных и технических наук [8].

В совокупности эти примеры демонстрируют спектр решений – от обзорных интерактивных карт кампуса с поиском и маршрутизацией до комплексных систем, объединяющих outdoor- и indoor-навигацию, поддержку доступности и интеграцию с академическими и маркетинговыми сервисами университета.

Для удобства анализа существующих подходов сформирована таблица.

Таблица 1. Сравнительная таблица основных характеристик интерактивных карт

Вуз / платформа	Уровень детализации	Поиск / фильтры	Маршрутизация	Indoor (этажи, аудитории)	Интеграция с сервисами / контент
СПбПУ	Кампус, корпус	Нет	Нет	Нет	Текстовые описания, привязка к городу
ТГУ	Кампус, здания	Базовый визуальный обзор	Нет	Нет	Общая информация
КузГТУ	Кампус, здания	Базовый визуальный обзор	Нет	Нет	Справочная информация о кампусе
НИУ ВШЭ	Кампус, корпуса, этажи	Поиск по корпусам/адресам	Нет	Частично (схемы зданий)	Описание кампуса, логика нумерации аудиторий
МГУ, проект «Инфоматика»	Кампус, корпуса, аудитории	Поиск по объектам на инфоматах	Да	Да	Интеграция с расписанием, библиотекой и др.
Trinity University, Concept3D	Кампус, здания, зоны	Полнотекстовый поиск, категории	Да	Нет	Интеграция с календарём событий, маркетинговый контент
The University of New Mexico	Несколько кампусов, здания	Поиск зданий и POI	Да	Нет	Парковки, маршруты, печатные карты
MazeMap (напр. NTNU)	Кампус, корпуса, этажи, комнаты	Точки интереса и категории	Да	Да	Описание кампуса, логика нумерации аудиторий

Опыт указанных примеров показывает, что сегодня преобладают либо обзорные карты кампусов, решающие задачи макро-ориентирования (поиск корпусов, общежитий, сервисов), либо точечные решения для навигации внутри отдельных зданий, встроенные в более широкие цифровые проекты вуза. Полноценная интеграция уровней «кампус – корпус – этаж – аудитория» встречается относительно редко и, как правило, реализуется фрагментарно (через инфоматы, локальные схемы или отдельные сервисы), что обосновывает исследовательский интерес к построению единой веб-ориентированной

интерактивной карты, совмещающей общую карту кампуса с метками корпусов и детализированные планы этажей в одном интерфейсе.

На основании проведённого исследования была разработана концепция интегрированной интерактивной карты кампуса университета. Концепция предполагает макро-уровень с отображением корпусов и объектов инфраструктуры с возможностью поиска и фильтрации по типам объектов, а также переходом к детализированному представлению корпуса. На микроуровне используются поэтажные планы зданий с выделением помещений и их атрибутов. Ключевым принципом является сквозная навигация по маршруту «город – кампус – корпус – этаж – аудитория» и последующая интеграция карты с внешними сервисами университета в рамках единой цифровой инфраструктуры.

Использование такой интегрированной интерактивной карты обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными статичными схемами и разрозненными веб-страницами:

— Обеспечивается снижение неопределённости и стресс-факторов при ориентировании в сложном пространстве кампуса, что особенно важно для абитуриентов, первокурсников и посетителей.

— Единое представление данных о корпусах и помещениях в цифровом виде создаёт основу для их централизованного обновления, анализа использования пространства и поддержания актуальности информации.

— Интерактивная карта может рассматриваться как интерфейс доступа к другим цифровым сервисам университета, усиливая эффект от цифровой трансформации за счёт пространственно-привязанной визуализации данных.

В исследовании рассматриваются вопросы выбора форматов представления данных, способов задания и хранения атрибутов помещений, а также подходы к организации пользовательских интерфейсов, поддерживающих наведение, выбор объектов и отображение контекстной информации. Анализируются потенциальные эффекты от внедрения подобной карты для различных категорий пользователей (студентов, преподавателей, административного персонала, гостей университета) и её роль в формировании единой цифровой инфраструктуры вуза. Предполагается, что результаты работы могут быть использованы при проектировании и модернизации цифровой инфраструктуры университетов, а также при сравнительной оценке различных архитектурных решений в области кампусной и внутридомовой навигации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Карта кампуса Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. – URL: https://www.spbstu.ru/campus-map/ (дата обращения: 21.03.2026).

2) Карта кампуса Томского государственного университета. – URL: https://tsu.ru/help/kampusmap.php (дата обращения: 21.03.2026).

3) Социальная инфраструктура Кузбасского государственного технического университета. – URL: https://kuzstu.ru/zhizn-v-kuzgtu/ (дата обращения: 21.03.2026).

4) Навигация по комплексу НИУ ВШЭ. – URL: https://navigation.hse.ru/?campus=shabolovka&floor=1 (дата обращения: 21.03.2026).

5) Кампусный проект МГУ. – URL: https://infomatika.ru/projects/campus-projects/campus-project-of-msu/ (дата обращения: 21.03.2026).

6) Trinity University. Campus map. – URL: https://map.trinity.edu/?id=1858 (дата обращения: 22.03.2026).

7) New Mexico State University. Campus map. – URL: https://map.nmsu.edu/?id=1888#!pg/?s/ (дата обращения: 22.03.2026).

8) Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Maps and rooms. – URL: https://www.ntnu.edu/map (дата обращения: 22.03.2026).

УДК 004.89

ОТ ЦИФРОВОГО СЛЕДА К УПРАВЛЕНИЮ КОМПЕТЕНТНОСТНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ: ИНЖЕНЕРИЯ ЗНАНИЙ И ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПЛАТФОРМАХ

Е.И. Воеводина, Д.В. Наумов

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается цифровая трансформация образовательных платформ через призму экономики данных и интеллектуальных систем. Показано, что ключевое ограничение большинства платформ связано не с дефицитом цифрового контента, а с сохранением курс-центричной архитектуры, в которой образовательные данные остаются побочным продуктом учебного процесса, а не ресурсом управления. Обоснована необходимость перехода к data-driven модели платформы, объединяющей цифровой след обучающегося, граф компетенций, предиктивную аналитику и контур адаптивного принятия решений. Предложена концептуальная схема преобразования образовательных данных в управленческие воздействия.

Ключевые слова: *образовательные платформы, цифровой след, инженерия знаний, граф компетенций, предиктивная аналитика, Knowledge Tracing, адаптивное обучение, цифровая трансформация, экономика данных*

FROM DIGITAL FOOTPRINTS TO COMPETENCY TRAJECTORY MANAGEMENT: KNOWLEDGE ENGINEERING AND PREDICTIVE ANALYTICS IN EDUCATIONAL PLATFORMS

E.I. Voevodina, D.V. Naumov

Yaroslavl State Technical University

The article examines the digital transformation of educational platforms through the lens of the data economy and intelligent systems. It is shown that the key limitation of most platforms lies not in a lack of digital content but in the persistence of a course-centric architecture, where educational data remain a by-product of the learning process rather than a management resource. The paper substantiates the need to move toward a data-driven platform model that integrates digital footprints, competency graphs, predictive analytics, and an adaptive decision-making layer. A conceptual scheme is proposed for transforming educational data into managerial actions.

Keywords: *educational platforms, digital footprint, knowledge engineering, competency graph, predictive analytics, Knowledge Tracing, adaptive learning, digital transformation, data economy*

Цифровая трансформация экономики сопровождается переходом к модели, в которой данные становятся самостоятельным фактором повышения эффективности организаций и социальных систем. Это в полной мере относится и к сфере образования: цифровые платформы уже не могут рассматриваться только как каналы доставки контента. В процессе обучения они непрерывно генерируют массивы данных о поведении обучающихся, динамике освоения материала, типичных затруднениях и маршрутах продвижения по программе [1]. Следовательно, образовательная платформа в логике экономики данных выступает не просто инфраструктурой обучения, а потенциальной интеллектуальной системой, способной преобразовывать образовательные данные в управленческие решения [2, 10].

Вместе с тем реальная архитектура большинства платформ по-прежнему определяется курс-центричной логикой. Центральным объектом в них остаётся курс, модуль или учебный блок, тогда как данные об учебной активности используются преимущественно для отчётности, контроля прохождения и ретроспективной оценки. В результате между накапливаемым цифровым следом и управлением образовательным процессом возникает разрыв: система фиксирует, что произошло, но не умеет достаточно точно объяснять причины затруднений, прогнозировать их развитие и менять траекторию до наступления неуспеха.

Мировая исследовательская повестка частично отвечает на эту проблему через развитие learning analytics, моделей Knowledge Tracing, графов знаний и адаптивных

механизмов выбора следующего шага обучения [3, 4]. Однако соответствующие направления чаще рассматриваются раздельно: аналитика изучает поведенческие данные, предиктивные модели – латентное состояние знаний, графовые подходы – структуру предметной области, а адаптивные алгоритмы – логику подбора контента. При этом именно их интеграция определяет качество платформы как системы управления компетентностным развитием.

Целью статьи является теоретическое обоснование data-driven архитектуры образовательной платформы, в которой цифровой след, инженерия знаний и предиктивная аналитика образуют единый контур управления компетентностной траекторией обучающегося. Научная новизна работы заключается в смещении исследовательского фокуса с описания отдельных технологий на архитектурную логику преобразования образовательных данных в управленческие воздействия. Практическая значимость связана с возможностью применения предложенного подхода при модернизации платформ дополнительного профессионального образования и корпоративного обучения, где особенно велика цена ошибок в проектировании индивидуальных маршрутов [1].

В традиционной логике цифровая платформа аккумулирует журналы посещаемости, результаты тестирования, сведения о завершении модулей и другие операционные показатели. Однако сами по себе эти данные не обладают управленческой ценностью. Их ценность возникает только после нормализации, интерпретации и привязки к структуре осваиваемых компетенций. Иначе данные остаются разрозненным набором событий, пригодным для административной отчётности, но недостаточным для точной диагностики состояния обучающегося.

С точки зрения экономики данных принципиален не объём собираемой информации, а способность платформы превращать её в решения. Для образовательной сферы это означает переход от регистрации действий к выявлению закономерностей учебного поведения, оценке скрытых дефицитов знаний и прогнозированию вероятности успешного продвижения по траектории. Такой переход требует не только аналитических моделей, но и специальной архитектуры данных, в которой цифровой след семантически связан с компетенциями, заданиями и образовательными целями [6].

Цифровой след обучающегося включает несколько групп признаков: результативные данные (оценки, успех в выполнении заданий, частота ошибок), поведенческие данные (ритм входов, темп прохождения, длительность сессий, возвраты к материалам), маршрутные данные (последовательность переходов по контенту, выбор альтернативных модулей, пропуски) и коммуникационные данные (вопросы, обсуждения, обратная связь). В data-driven платформе эти группы рассматриваются совместно, поскольку только комплексный профиль позволяет отличить, например, недостаток базовой подготовки от временного снижения вовлечённости или неоптимального порядка изучения тем.

Таблица 1. Преобразование образовательных данных в управленческий контур платформы

Этап	Тип данных / артефактов	Ключевая аналитическая задача	Результат для управления
Сбор и нормализация	Логи LMS/LXP, результаты оценивания, временные и маршрутные данные	Очистка, синхронизация, приведение к единому профилю обучающегося	Формирование целостного цифрового следа
Семантизация	Связь действий с темами, навыками, заданиями и пререквизитами	Привязка событий к компетентностной модели	Переход от «кликов» к данным о развитии компетенций
Диагностика	Последовательности учебных действий и результатов	Оценка текущего состояния освоения	Профиль сильных и слабых узлов траектории
Прогнозирование	Динамика цифрового следа и структура графа компетенций	Выявление риска неуспешности и вероятных точек провала	Раннее предупреждение и сценарии вмешательства
Адаптивное решение	Прогноз, профиль дефицитов, история траектории	Выбор следующего образовательного шага	Перенастройка маршрута, контента и уровня поддержки

Именно на этапе семантизации проявляется ограниченность курс-центричной модели. Если единицей представления остаётся курс, то платформа может лишь сообщить, что обучающийся прошёл или не прошёл конкретный блок. Но она не может внятно ответить, какая именно компетенция оказалась недостаточно сформированной, как этот дефицит связан с другими навыками и какие элементы траектории необходимо скорректировать. Следовательно, вопрос цифровой трансформации образовательной платформы в действительности является вопросом изменения её объектной модели и механизмов интерпретации данных, а не просто внедрения дополнительных сервисов поверх существующей LMS.

Курс-центричная архитектура формирует и соответствующую логику принятия решений. Если анализ строится вокруг завершения модуля, то и корректирующее воздействие ограничивается рамками этого же модуля: обучающемуся предлагают повторить тему, пересдать тест или получить дополнительный материал по текущему блоку. Между тем реальный дефицит нередко лежит вне этого блока – в пропущенном пререквизите, слабой базовой операции, неверно выбранной последовательности освоения или перегруженном темпе. Именно поэтому ретроспективная аналитика, ориентированная только на курс, даёт административно удобную, но педагогически недостаточную картину.

Data-driven архитектура, напротив, исходит из того, что единицей анализа должен быть не курс как контейнер контента, а состояние компетентностного профиля и его изменение во времени. В такой модели курс перестаёт быть конечной целью и становится одним из инструментов воздействия на траекторию. Это позволяет проектировать индивидуальные маршруты не как «персональный список дисциплин», а как динамически обновляемую последовательность шагов, подбираемую с учётом стартового уровня, профессиональной цели, поведения в системе и прогнозируемого риска.

Ключевым звеном такой трансформации выступает инженерия знаний. В образовательной платформе она реализуется через формальное описание предметной области в виде графа компетенций, где узлы соответствуют навыкам, микрокомпетенциям, дидактическим единицам или типам заданий, а рёбра отражают отношения пререквизита, логической зависимости, когнитивной близости или перехода от базового к продвинутому уровню [7].

Графовая репрезентация даёт платформе сразу несколько преимуществ. Во-первых, она создаёт общий семантический слой для интерпретации цифрового следа: действия обучающегося начинают соотноситься не только с экраном, модулем или курсом, но и с конкретным навыком. Во-вторых, граф позволяет локализовать первопричину затруднения. Ошибка в текущем задании может быть следствием не локального непонимания, а пробела в одном из базовых узлов, расположенных на несколько шагов назад в сети компетенций. В-третьих, граф превращает проектирование траектории в задачу движения по структурированному пространству знаний, а не в последовательное прохождение заранее зафиксированного набора материалов.

Отсюда следует, что граф компетенций выполняет в платформе не только описательную, но и управляющую функцию. Он позволяет задавать допустимые переходы между узлами, различать обязательные и факультативные ветви, учитывать уровни сложности и определять, какой дефицит критичен для продолжения траектории, а какой может быть компенсирован позднее. Для платформ ДПО, работающих с разнородными контингентами, это особенно важно: слушатель может иметь сильные прикладные навыки при слабой теоретической базе либо, напротив, высокий уровень общей подготовки при дефиците инструментальных компетенций.

Современные исследования показывают, что интеграция графовых структур с предиктивными моделями повышает качество диагностики и прогноза. Графовые нейронные сети и graph-based transformer-подходы позволяют учитывать зависимости между навыками и распространять информацию о состоянии обучающегося по сети связанных компетенций [5, 6, 8]. Для практики образовательных платформ это означает переход от локальной оценки

успешности отдельного задания к структурной оценке вероятной динамики всего компетентностного профиля.

Дополнительный потенциал инженерии знаний связан с возможностью полуавтоматического построения и актуализации компетентностных карт. В работах последних лет обсуждается использование NLP- и LLM-подходов для извлечения компетенций из учебных материалов, профессиональных стандартов и описаний трудовых функций [9]. Для отечественных платформ ДПО это особенно важно, поскольку делает более реалистичным масштабирование графов компетенций на уровне отраслей, профессиональных семейств и программ переподготовки.

Если граф компетенций задаёт структуру предметной области, то предиктивная аналитика отвечает за оценку текущего положения обучающегося в этой структуре и прогноз его дальнейшего движения. Наиболее разработанным классом моделей здесь выступают модели Knowledge Tracing, ориентированные на восстановление скрытого состояния знания по последовательности ответов и учебных действий [3]. Их принципиальное достоинство состоит в том, что объектом анализа становится не отдельный результат, а динамика освоения во времени.

Однако в изолированном виде даже точные KT-модели не решают задачу управления траекторией. Они способны оценить вероятность успеха на следующем шаге, но не всегда объясняют, какой именно дефицит лежит в основе прогнозируемого риска и какое педагогическое действие предпочтительно. Поэтому продуктивной представляется не конкуренция, а сцепка предиктивного ядра с инженерией знаний и контуром выбора действий. В такой архитектуре KT-модель диагностирует состояние, граф компетенций задаёт пространство интерпретации, а рекомендательный модуль формирует следующий шаг обучения.

В качестве механизма принятия решения могут использоваться как правила, основанные на экспертной педагогической логике, так и более сложные алгоритмы оптимизации, включая методы обучения с подкреплением [7, 8]. В практических системах наиболее реалистичен гибридный вариант, когда автоматический контур подбирает несколько допустимых действий – повторение узла, переход к поддерживающему модулю, смену формата материала, увеличение или снижение сложности, подключение тьютора – а окончательное вмешательство интерпретируется и контролируется человеком [10]. Такой подход снижает риски «чёрного ящика» и делает адаптацию совместимой с требованиями педагогической объяснимости.

Таблица 2. Архитектурные модули data-driven образовательной платформы

Модуль	Основная функция	Тип моделей / инструментов	Управленческий эффект
Слой цифрового следа	Сбор и хранение событий обучения, результатов, маршрутных и поведенческих данных	LMS/LXP-логи, хранилища событий, ETL-процедуры	Формирование единого профиля обучающегося
Слой инженерии знаний	Описание компетенций и связей между ними	Граф компетенций, knowledge graph, онтологии	Семантическая интерпретация действий и дефицитов
Предиктивное ядро	Оценка текущего состояния и прогноз дальнейшей успешности	Knowledge Tracing, sequence-модели, graph-based модели	Раннее выявление риска и вероятных точек провала
Контур адаптивной политики	Выбор следующего образовательного воздействия	Рекомендательные алгоритмы, правила, RL-подходы	Динамическая настройка траектории
Контур объяснения и мониторинга	Визуализация причин рекомендаций и контроль эффективности	Дашборды, explainable AI, сигналы тьютору	Повышение доверия и управляемости системы

Представленная архитектура меняет саму роль образовательной платформы. Она перестаёт быть пассивным хранилищем курсов и становится системой поддержки решений, ориентированной на управление развитием компетенций. Это особенно важно для дополнительного профессионального образования, где исходный уровень подготовки слушателей существенно различается, а время на достижение прикладного результата ограничено [1, 11]. Взрослый обучающийся, как правило, не может позволить себе длительное прохождение нерелевантных блоков; следовательно, ошибка платформы в диагностике или маршрутизации напрямую конвертируется в потери времени и ресурсов.

Для корпоративного и отраслевого ДПО data-driven подход открывает возможность увязки образовательной платформы с HRM- и оценочными контурами организации. Компетентностный граф может быть связан с профилями должностей, требованиями проектов и дефицитами подразделений, а предиктивный контур – использоваться для оперативного выбора наиболее результативных маршрутов развития сотрудников. В таком случае образовательные данные становятся частью системы управления человеческим капиталом, а не только внутренним ресурсом учебного подразделения.

Экономический эффект от внедрения такой платформы следует рассматривать не как мгновенный автоматический результат, а как следствие, повышения точности образовательных решений. Чем выше качество диагностики и прогноза, тем меньше доля избыточных модулей, которые обучающийся проходит без реальной необходимости. Чем точнее выявляется первичный дефицит, тем меньше повторных попыток и затяжных траекторий. Чем лучше согласован граф компетенций с профессиональными задачами, тем выше вероятность того, что образовательный результат будет востребован в трудовой функции и даст отдачу в форме роста производительности, сокращения времени адаптации и улучшения HR-показателей организации.

Важным следствием становится и изменение роли преподавателя или тьютора. В data-driven платформе человек не устраняется из образовательного процесса, а получает новый инструментальный контур: систему сигналов, объяснимых рекомендаций и визуализацию причин затруднений. Это повышает адресность сопровождения и делает возможной работу с массовыми потоками без утраты индивидуального фокуса. Следовательно, цифровая трансформация платформ затрагивает не только программное обеспечение, но и организационную модель образовательного процесса.

Вместе с тем реализация подобной архитектуры сопряжена с рядом ограничений. К ним относятся качество и полнота цифрового следа, проблема «холодного старта» для новых пользователей, переносимость моделей между различными программами, риск алгоритмических смещений и необходимость обеспечивать объяснимость рекомендаций [2, 3, 8]. Поэтому цифровая трансформация образовательных платформ не может сводиться к внедрению отдельной модели или сервиса. Она требует стандартизации данных, согласованной компетентностной модели, процедур валидации прогнозов и сочетания автоматизированной аналитики с экспертным педагогическим контролем.

Проведённый анализ показывает, что ключевое ограничение современных образовательных платформ связано не столько с недостатком цифровых сервисов, сколько с сохранением курс-центричной архитектуры, не позволяющей превратить образовательные данные в полноценный ресурс управления. Пока основным объектом платформы остаётся курс, цифровой след обслуживает главным образом отчётность, а персонализация неизбежно остаётся поверхностной.

Переход к data-driven архитектуре требует как минимум трёх взаимосвязанных слоёв: цифрового следа как базы наблюдаемых данных, инженерии знаний как семантического представления компетенций и их связей, а также предиктивного ядра, оценивающего динамику освоения и риск затруднений. Дополнение этой связки контуром адаптивной политики переводит платформу из класса систем доставки контента в класс интеллектуальных систем управления компетентностными траекториями.

Принципиально важно, что инженерия знаний и предиктивная аналитика в рассматриваемой логике не являются альтернативами. Напротив, только их интеграция позволяет перейти от фиксации учебного симптома к выявлению структурной причины и далее – к обоснованному изменению маршрута обучения. Именно в этом состоит архитектурная основа следующего поколения образовательных платформ.

Для систем дополнительного профессионального образования и корпоративного обучения предложенный подход имеет особую ценность, поскольку создаёт предпосылки для более точной настройки программ под исходный уровень, профессиональные задачи и временные ограничения взрослого обучающегося. В дальнейшем развитие данной линии исследований может быть связано с автоматизацией построения графов компетенций, разработкой метрик экономической эффективности адаптивного обучения и интеграцией образовательных платформ с отраслевыми системами управления кадрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Dobriţa, G. An NLP-Driven E-Learning Platform with LLMs and Graph Databases for Personalised Guidance / G. Dobriţa, S.V. Oprea, A. Bâra // Connection Science. – 2025. – Vol. 37, no. 1. – DOI: 10.1080/09540091.2025.2518991.

2) GELT: A Graph Embeddings Based Lite-Transformer for Knowledge Tracing / Z. Liang, R. Wu, Z. Liang, J. Yang, L. Wang, J. Su // PLoS ONE. – 2024. – Vol. 19, no. 5. – e0301714. – DOI: 10.1371/journal.pone.0301714.

3) Linxen, A. Knowledge Graphs for Competency-Based Education / A. Linxen, F. Endel, S. Opel, C. Beecks // IEEE International Conference on Big Data. – 2023. – P. 2942–2945. – DOI: 10.1109/BigData59044.2023.10386727.

4) Memarian, B. A Scoping Review of Reinforcement Learning in Education / B. Memarian, J. Rowe, J. Lester // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 6. – 100151. – DOI: 10.1016/j.caeai.2024.100151.

5) Ngulube, L. Leveraging Learning Analytics to Improve the User Experience within Learning Management Systems // Information. – 2025. – Vol. 16, no. 5. – Art. 228. – DOI: 10.3390/info16050228.

6) Digitalization of Adult Education in the Context of Human Capital Development / K. Onopriienko, Y. Petrushenko, W. Duranowski, A. Artyukhov // Bulletin of the Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University. Economic Sciences. – 2021. – No. 1. – P. 49–56. – DOI: 10.31651/2076-5843-2021-1-49-56.

7) Learning Analytics in Higher Education: A Systematic Review of a Decade of Research / G. Pan, C. Yue, M. Zhou [et al.] // Journal of Learning Analytics. – 2024. – Vol. 11, no. 1. – P. 1–27. – DOI: 10.18608/jla.2024.8290.

8) A Survey of Knowledge Tracing: Models, Variants, and Applications / S. Shen, Q. Liu, Z. Huang [et al.] // IEEE Transactions on Learning Technologies. – 2024. – Vol. 17, no. 10. – P. 1898–1919. – DOI: 10.1109/TLT.2024.3383325.

9) Artificial Intelligence-Enabled Adaptive Learning Platforms: A Review / L.Y. Tan, S. Hu, D.J. Yeo, K.H. Cheong // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 9. – 100429. – DOI: 10.1016/j.caeai.2025.100429.

10) Wang, J. A Knowledge Tracing Approach with Dual Graph Convolutional Networks and Positive/Negative Feature Enhancement Network / J. Wang, Q. Tang, Z. Zheng // PLoS ONE. – 2025. – Vol. 20, no. 4. – e0317992. – DOI: 10.1371/journal.pone.0317992.

11) Воеводина, Е.И. Подходы к построению концептуальной модели цифрового университета в условиях цифровой трансформации образования / Е.И. Воеводина, Д.В. Наумов // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 21, № 12(153). – С. 118–124.

УДК 681.5:004.8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА И ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ПРОЦЕССОВ

А.К. Герасимова, И.В. Тюкин

Научный руководитель – **И.В. Тюкин**, канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

В работе рассмотрены возможности применения искусственного интеллекта в проектировании автоматизированных систем управления. Показано, что наибольший эффект ИИ обеспечивает при формализации требований, контроле полноты задания на автоматизацию, выборе типовых решений, работе с информационной моделью, моделировании и подготовке проектной документации. Предложены контур ИИ-поддержки проектирования АСУ и матрица применения ИИ по стадиям проектного процесса. Обоснована необходимость формализации исходных данных и экспертной верификации решений.

Ключевые слова: *искусственный интеллект; автоматизированные системы управления; проектирование АСУ; формализация требований; задание на автоматизацию; информационная модель; проектная документация*

INTELLIGENT SUPPORT FOR THE DESIGN OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS BASED ON THE ANALYSIS AND FORMALIZATION OF DESIGN PROCESSES

A.K. Gerasimova, I.V. Tyukin

Scientific Supervisor – **I.V. Tyukin**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

The paper examines the potential of artificial intelligence in the design of automated control systems. AI is shown to be most effective in requirement formalization, completeness checking of automation assignments, selection of standard solutions, work with the information model, simulation, and preparation of design documentation. An AI support framework for ACS design and a matrix of AI application by design stages are proposed. The need for formalized input data and expert verification of decisions is substantiated.

Keywords: *artificial intelligence; automated control systems; ACS design; requirement formalization; automation assignment; information model; design documentation*

Проектирование автоматизированных систем управления (АСУ) для объектов промышленного и гражданского назначения осуществляется в условиях высокой нормативной и организационной сложности. На принимаемые проектные решения одновременно влияют требования нормативно-технической документации (НТД) [1, 2], требования заказчика, задания на автоматизацию, формируемые разработчиками смежных разделов, а также особенности законов регулирования конкретного технологического процесса. В результате значительная часть времени инженера затрачивается не на разработку собственно проектных решений, а на согласование, проверку, адаптацию оформления и устранение противоречий между источниками требований.

Дополнительную значимость рассматриваемой задаче придает цифровизация строительной отрасли Российской Федерации. К числу ключевых направлений этого процесса относятся формирование требований к информационной модели объекта капитального строительства, создание реестра машиночитаемой нормативной документации и представление отдельных документов в виде XML-файлов, подаваемых на экспертизу [3-8]. В этих условиях проектирование постепенно смещается от подготовки набора чертежей и текстовых документов к разработке цифровых объектов, которые могут автоматически

проверяться, сопоставляться и частично формироваться программными средствами. При этом традиционные CAD-инструменты по-прежнему решают преимущественно задачи оформления.

В перечне российского программного обеспечения (ПО) интеграционная готовность к автоматизированной экспертизе остается ограниченной, а в практике проектирования сохраняется выраженный дефицит инструментов, способных одновременно формировать документы, проверять их на соответствие НТД и учитывать особенности конкретного технологического процесса. В связи с этим применение искусственного интеллекта (ИИ) представляется перспективным как надстройка над формализованным проектным процессом.

Современные исследования в области проектирования АСУ, применения методов машинного обучения в задачах управления, генеративного ИИ и автоматизированной проверки нормативных требований показывают, что ИИ способен повышать качество инженерных решений на этапах анализа требований, синтеза архитектуры, моделирования, оптимизации и выбора контуров управления [9-17]. Однако для практического использования этих подходов в проектировании АСУ необходимо определить, какие задачи допускают формализацию, какие данные должны быть представлены в машиночитаемом виде и где проходят границы допустимой автономности алгоритмов.

Целью работы является определение возможностей применения ИИ в проектировании АСУ исходя из предположения о том, что наибольший эффект такие технологии обеспечивают не как автономный генератор документации, а как инструмент интеллектуальной поддержки, объединяющий нормативные требования, задание на проектирование, задание на автоматизацию и модели управления в единую цифровую среду принятия решений.

Для достижения поставленной цели в рамках исследования предметной области были проанализированы нормативно-техническая база, структура заданий на проектирование и автоматизацию, а также классифицированы режимы и законы регулирования. На основе полученных данных сформулированы следующие опорные положения: проектирование АСУ определяется сочетанием постоянных и переменных требований; основная доля замечаний заказчика связана с формой представления решений и полнотой документации; наиболее уязвимым источником ошибок выступает задание на автоматизацию технологического процесса; типизация оборудования, интерфейсов и схем способствует масштабированию проектных решений.

Методика исследования включала четыре этапа. На первом этапе выполнялся контент-анализ проектного процесса с выделением его основных сущностей: нормативных требований, задания на проектирование, типовых операций рабочего процесса, вариантов применяемого оборудования, режимов управления и типов контуров регулирования. На втором этапе выделенные сущности сопоставлялись с действующей цифровой и нормативной инфраструктурой, включая BIM-модель, реестр нормативных документов, XML-схемы, а также состав проектной и рабочей документации [3-7]. На третьем этапе был выполнен обзор научных публикаций, посвященных применению ИИ для анализа требований, автоматизированной проверки норм, проектирования с использованием больших языковых моделей и цифровых двойников [8-19]. На четвертом этапе была построена прикладная матрица применения ИИ к задачам проектирования АСУ.

Под формализацией проектного процесса в работе понимается представление проектных операций, документов, ограничений и задач в виде структуры, пригодной для машинной обработки. При этом существенное значение имеют не только форматы файлов, но и семантические связи между элементами проектного процесса: какой пункт задания на проектирование порождает конкретное техническое решение, какое требование НТД проверяется в определенном фрагменте схемы, какой набор параметров является достаточным для выбора контрольно-измерительных приборов и исполнительных механизмов, а также какая модель регулирования соответствует физике процесса.

Для оценки потенциальных точек внедрения ИИ использовались следующие критерии: структурированность входных данных, повторяемость проектной операции, стоимость ошибки, наличие типовых решений, возможность проверки результата на основе формальных правил и необходимость экспертной интерпретации. Если задача характеризовалась повторяемостью, высокой трудоемкостью и возможностью формализованной проверки, она рассматривалась в качестве приоритетной для применения ИИ.

Проведенный анализ показывает, что полный жизненный цикл проектирования АСУ может быть представлен в виде последовательности формализуемых стадий: извлечения и нормализации требований (НТД, задания на проектирование, задания на автоматизацию), синтеза типовой структуры системы, выбора оборудования и интерфейсов, моделирования и верификации алгоритмов управления, а также выпуска и контроля проектной документации [20, 21]. На каждой из этих стадий ИИ решает свой класс задач, поэтому корректнее говорить не об одном универсальном алгоритме, а о совокупности специализированных интеллектуальных сервисов, встроенных в общий проектный контур.

Схема, представленная на рис. 1, конкретизирует рассмотренные далее зоны применения ИИ в проектировании АСУ. Она показывает, что интеллектуальная поддержка строится на раздельной обработке постоянных требований и переменных исходных данных: нормативные документы и внутренние стандарты переводятся в систему правил, текстовые исходные материалы - в структурированные данные, а технологические и проектные решения формируются на основе шаблонов и прецедентов. Результаты такой формализации используются для верификации полноты задания и соответствия требованиям, синтеза проектных решений, интеграции данных в BIM/XML, генерации документации и последующей экспертизы.

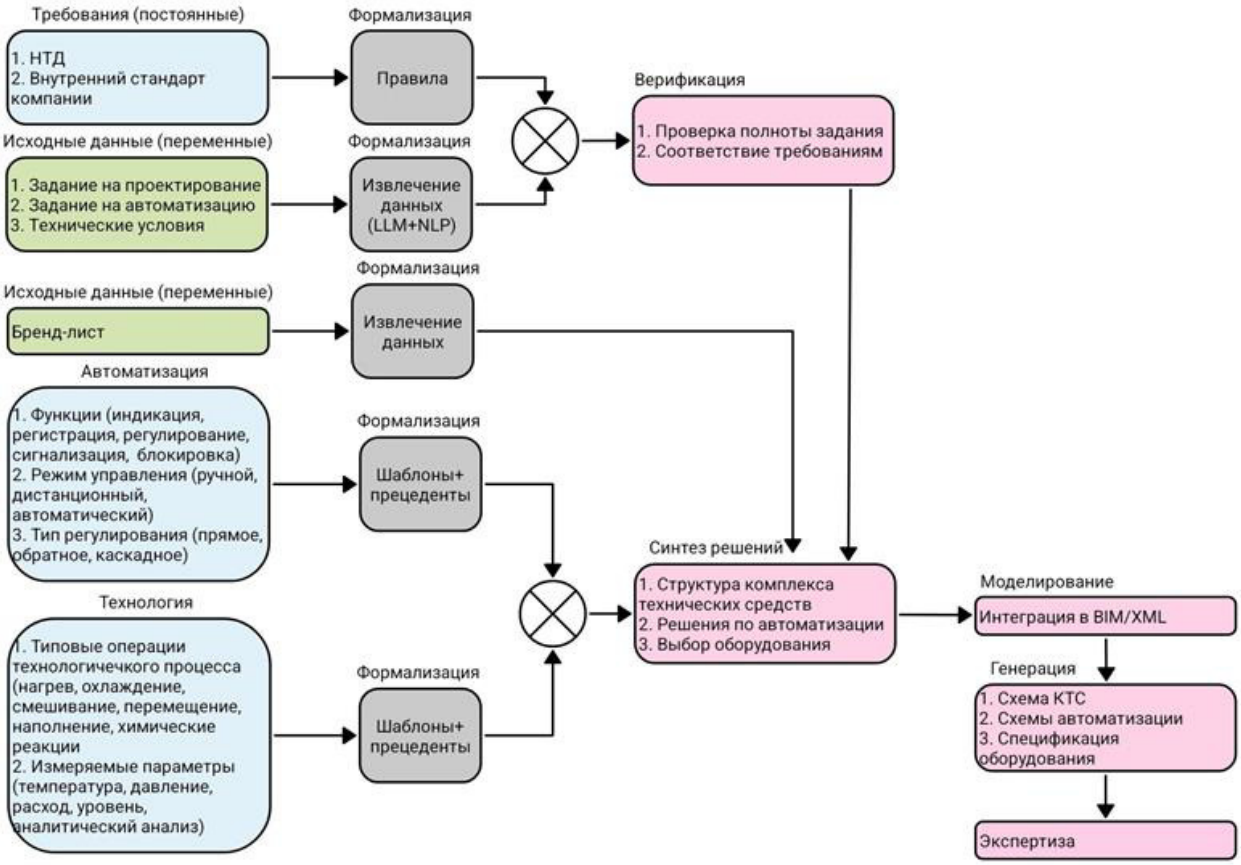


Рис. 1. Схема интеллектуальной поддержки проектирования АСУ на основе формализации требований и исходных данных

Первая зона применения ИИ связана с формализацией требований и интерпретацией исходных данных. При этом постоянные требования, содержащиеся в НТД и внутренних стандартах проектной организации, целесообразно представлять в виде формализованных правил, а задания на проектирование, технические условия, бренд-листы и иные переменные исходные материалы – в виде структурированных данных, получаемых методами извлечения информации. Большие языковые модели (LLM) и методы обработки естественного языка (NLP) позволяют автоматически извлекать из таких документов сущности, ограничения, перечни обязательных документов, требования к оформлению и ограничения на применение оборудования. Однако инженерная ценность таких результатов возникает только при их сопоставлении с базой нормативных документов, внутренними стандартами проектной организации и последующей формальной проверке [8, 18]. В противном случае возрастают риски смысловых ошибок и потери значимых проектных решений [10, 16].

Вторая зона применения ИИ связана с верификацией задания на автоматизацию, включающей контроль его полноты и соответствия установленным требованиям. Для описания технологических процессов требуется обязательное указание ряда параметров: наименования среды, ее агрегатного состояния, характеристик места отбора, включая материал и диаметр трубопровода, давления, температуры, а также требуемых функций, таких как контроль, сигнализация, регулирование, блокировка и регистрация. Эти требования допускают представление в виде машинно-проверяемой структуры. На практике это означает, что ИИ-система способна еще до начала проектирования выявлять отсутствующие данные, логические противоречия и несогласованности между заданием и формализованными требованиями. Если в задании указан контур регулирования уровня, но не определено положение исполнительного механизма или не согласованы границы блокировок, система формирует запрос на уточнение. Тем самым ИИ снижает вероятность переноса ошибок из смежного раздела в проект АСУ.

Третья зона применения ИИ связана с синтезом проектных решений, включая формирование структуры комплекса технических средств (КТС), решений по автоматизации и выбор оборудования. При использовании типовых технологических операций, типового оборудования и стандартных интерфейсов передачи данных, таких как RS-485 и Ethernet, появляется возможность масштабирования разработки АСУ. Это создает основу для проектирования на базе шаблонов и прецедентов: по совокупности признаков объекта ИИ сопоставляет текущую задачу с базой реализованных проектов, предлагает шаблон структуры КТС, перечень типовых документов и список решений, требующих уточнения. Встроенный механизм ранжирования может учитывать требования заказчика к оформлению, допустимые бренды оборудования, класс объекта и особенности экспертизы.

Четвертая зона применения ИИ связана с работой с информационной моделью объекта и автоматизированной экспертизой. Переход к машиночитаемым требованиям и информационной модели объекта строительства открывает возможность семантического сопоставления нормативных требований и элементов модели [3, 5-6, 8, 14-15, 19]. Для раздела автоматизации это означает проверку наличия обязательных позиций и согласованности данных между схемой автоматизации, структурной схемой КТС, спецификацией и пояснительной запиской. В этих условиях ИИ может использоваться как слой семантического выравнивания между BIM- или IFC-моделью, XML-документами и естественно-языковыми требованиями. Практическим результатом такого подхода является сокращение времени экспертизы и объема повторных корректировок.

Пятая зона применения ИИ связана с моделированием и предварительным определением контуров регулирования. На данном этапе необходимо выбирать режим управления, тип регулирования и место установки исполнительного органа с учетом физики процесса. Здесь ИИ не заменяет теорию автоматического управления, а расширяет ее инструментальные возможности. На основе цифрового двойника и архивов аналогичных объектов становится возможной оценка устойчивости решения в условиях неопределенности [9, 11-13, 17, 19, 21]. Для проектировщика это особенно ценно на стадии технического

проекта, когда необходимо быстро сравнить несколько вариантов структуры и получить обоснование выбора.

Шестая зона применения ИИ связана с генерацией и проверкой проектной документации. Генеративный ИИ может формировать варианты текстовой части, таблиц сигналов, ведомостей, фрагментов спецификаций и описаний алгоритмов, но только при наличии жестких шаблонов и формальных правил. С учетом требований экспертизы проектной документации применительно к разделу автоматизации перспективным представляется формирование структурной схемы КТС, схемы автоматизации и текстовой части в едином цифровом контуре с экспортом в XML. Наиболее рационален сценарий, при котором ИИ генерирует контент в пределах допустимого шаблона, а детерминированный валидатор проверяет выходной результат на полноту, непротиворечивость и соответствие требуемому формату.

Сводный результат исследования представлен в табл. 1. Данные, приведенные в ней, показывают, что по мере перехода от интерпретации требований к синтезу алгоритмов возрастает инженерная цена ошибки, а значит, снижается допустимая степень автономности ИИ. Напротив, для задач подготовки исходных данных, поиска несоответствий и выпуска типовой документации целесообразен более высокий уровень автоматизации.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать принципиальный вывод: эффективность применения ИИ в проектировании АСУ определяется не совершенством отдельной модели, а степенью формализации проектного процесса. Если исходные документы представлены только в виде разрозненных файлов без единой структуры атрибутов, ИИ остается инструментом лингвистической поддержки. Если же проектная организация формирует единые правила, шаблоны заданий, базы типовых решений и связи между цифровой моделью, схемами и спецификациями, ИИ становится полноценным участником цифрового контура проектирования.

Таблица 1. Матрица применения ИИ по стадиям проектирования АСУ

Стадия проектирования	Методы ИИ	Ожидаемый результат	Допустимая автономность
Интерпретация и формализация требований	LLM, NLP, экспертные правила	Автоматическое выделение сущностей, ограничений, перечней документов и требований к оформлению	средняя
Контроль задания на автоматизацию	Графы знаний, экспертные правила	Контроль полноты параметров, выявление пропусков и логических противоречий	высокая
Синтез типовых технических решений	Проектирование на базе прецедентов, ранжирование	Подбор шаблонов контуров, КТС и интерфейсов с учетом класса объекта	средняя
Интеграция с информационной моделью и экспертизой	Семантическое выравнивание, NLP, экспертные правила	Сопоставление требований, модели и документов, поиск несоответствий до подачи на экспертизу	высокая
Моделирование и предварительное определение контуров регулирования	Цифровой двойник, сценарный анализ	Сравнение вариантов алгоритмов и обоснование выбора структуры управления	низкая
Генерация и проверка проектной документации	Генеративный ИИ, шаблоны, валидатор	Формирование вариантов текстовой части, таблиц сигналов, спецификаций и XML-выгрузок	средняя

Полученный вывод согласуется с современными исследованиями. В работах, посвященных проектированию АСУ, подчеркивается, что наибольшую эффективность методы машинного обучения обеспечивают в сочетании с предметными ограничениями и инженерными моделями [9-10]. Исследования, посвященные применению больших языковых моделей в системной инженерии, также показывают, что надежность проектных рекомендаций возрастает при интеграции LLM с модельно-ориентированными

представлениями и онтологиями предметной области [16]. Следовательно, для проектирования АСУ предпочтителен не свободный диалоговый ИИ, а доменно-ограниченный интеллектуальный ассистент, опирающийся на нормативную базу, шаблоны проектной организации и архив типовых решений.

Отдельного обсуждения требует вопрос доверия к автоматически получаемым результатам. Для раздела автоматизации инженерная ошибка может приводить не только к задержке экспертизы, но и к принятию небезопасных решений по управлению оборудованием. Поэтому рекомендации ИИ должны быть объяснимыми и прослеживаемыми: каждое предложение по выбору оборудования, интерфейса, контура регулирования или состава документа должно сопровождаться ссылкой на исходные требования и примененные правила. Именно это отличает инженерные ИИ-инструменты от универсальных генеративных сервисов общего назначения.

Существенным ограничением остается качество исходных данных [22]. Основная доля ошибок связана с неполнотой задания на автоматизацию или коллизиями в нем. Если проектная организация не стандартизирует минимально необходимый набор атрибутов, внедрение ИИ не сократит, а лишь замаскирует существующую неопределенность. Следовательно, первым практическим шагом должно стать не внедрение модели как таковой, а создание формализованного шаблона задания на автоматизацию [22].

Наконец, отдельным перспективным направлением является построение цифрового двойника проектируемой АСУ. В отличие от традиционного имитационного моделирования, цифровой двойник может сопровождать объект от стадии технического проекта до пусконаладки и эксплуатации, уточняя модели по мере накопления реальных данных [17]. Это позволяет замкнуть контур между проектированием и эксплуатацией: ИИ не только предлагает первичное решение, но и возвращает в проектную базу знания о фактической эффективности контуров управления.

На основе анализа предметной области и современных публикаций установлено, что наибольший потенциал применения ИИ в проектировании АСУ сосредоточен в шести направлениях: интерпретации и формализации требований, контроле полноты задания на автоматизацию, выборе типовых проектных решений, интеграции с информационной моделью и автоматизированной экспертизой, моделировании и предварительном определении контуров регулирования, а также генерации и проверке проектной документации.

Ключевым условием успешного внедрения ИИ является переход от слабо структурированных документов к машиночитаемым и машинопонимаемым представлениям требований, функций автоматизации и проектных решений. Без такой формализации ИИ остается вспомогательным средством подготовки текста, но не инструментом проектирования, ориентированного на выбор обоснованных решений.

Практический вывод исследования состоит в том, что разработка специализированного программного обеспечения для проектирования АСУ должна опираться на гибридный подход: строгие правила и требования обеспечивают корректность, а ИИ-модули отвечают за извлечение знаний, ранжирование решений, подготовку проектных материалов и поддержку инженера при выборе обоснованного варианта.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на формализованное описание процесса проектирования АСУ, формирование шаблонов заданий на автоматизацию, разработку набора верификационных правил для раздела автоматизации, а также создание базы типовых проектных решений, пригодной для интеллектуальной поддержки выбора оборудования, структуры КТС и состава проектной документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ 34.201-89. Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании

автоматизированных систем. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200006974 (дата обращения: 08.04.2026).

2) ГОСТ 34.602-89. Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200006924 (дата обращения: 08.04.2026).

3) ГОСТ Р 57563-2017/ISO/TS 12911:2012. Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200146763 (дата обращения: 08.04.2026).

4) Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 (ред. от 21.10.2025) «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_75048/ (дата обращения: 08.04.2026).

5) Постановление Правительства РФ от 17.05.2024 № 614 «Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_476610/ (дата обращения: 08.04.2026).

6) Постановление Правительства РФ от 31.08.2023 № 1417 (ред. от 04.04.2025) «Об утверждении Правил формирования и ведения реестра требований, подлежащих применению при выполнении инженерных изысканий, осуществлении архитектурно-строительного проектирования, проведении экспертизы проектной документации и (или) экспертизы результатов инженерных изысканий, строительстве, реконструкции, капитальном ремонте, эксплуатации и сносе объектов капитального строительства, выявления, устранения противоречий между требованиями, включенными в реестр требований, а также между требованиями, включенными в реестр требований, и проектами документов, содержащими требования, подлежащие включению в реестр требований». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_456014/ (дата обращения: 08.04.2026).

7) Минстрой России. Задание на проектирование. XML-схемы. – URL: https://www.minstroyrf.gov.ru/tim/xml-skhemy/zadanie-na-proektirovanie/p12_1/ (дата обращения: 08.04.2026).

8) Шалфеева, Е.А. Вопросы создания машинопонимаемых SMART-стандартов на основе графов знаний / Е.А. Шалфеева, В.В. Грибова // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 969-988. – DOI: 10.15622/ia.23.4.2. – URL: https://journals.rcsi.science/2713-3192/article/view/265762 (дата обращения: 08.04.2026).

9) Machine learning in process systems engineering: Challenges and opportunities / P. Daoutidis, J.H. Lee, S. Rangarajan [et al.] // Computers & Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 181. – Art. 108523. – DOI: 10.1016/j.compchemeng.2023.108523. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135423003939 (дата обращения: 08.04.2026).

10) Generative AI and process systems engineering: The next frontier / B. Decardi-Nelson, A.S. Alshehri, A. Ajagekar, F. You // Computers & Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 187. – Art. 108723. – DOI: 10.1016/j.compchemeng.2024.108723. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135424001418 (дата обращения: 08.04.2026).

11) Nian, R. A review on reinforcement learning: introduction and applications in industrial process control / R. Nian, J. Liu, B. Huang // Computers & Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 139. – Art. 106886. – DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.106886. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135420300557 (дата обращения: 08.04.2026).

12) Recent Advances in Reinforcement Learning for Chemical Process Control / V.S. Devarakonda, W. Sun, X. Tang, Y. Tian // Processes. – 2025. – Vol. 13, no. 6. – Art. 1791. – DOI: 10.3390/pr13061791. – URL: https://www.mdpi.com/2227-9717/13/6/1791 (дата обращения: 08.04.2026).

13) Where Reinforcement Learning Meets Process Control: Review and Guidelines / R. de R. Faria, B.D.O. Capron, A.R. Secchi, M.B. Souza // Processes. – 2022. – Vol. 10, no. 11. – Art. 2311. – DOI: 10.3390/pr10112311. – URL: https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2311 (дата обращения: 08.04.2026).

14) Peng, J. Automated code compliance checking research based on BIM and knowledge graph / J. Peng, X. Liu // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Art. 7065. – DOI: 10.1038/s41598-023-34342-1. – URL: https://www.nature.com/articles/s41598-023-34342-1 (дата обращения: 08.04.2026).

15) Amor, R. The promise of automated compliance checking / R. Amor, J. Dimyadi // Developments in the Built Environment. – 2021. – Vol. 5. – Art. 100039. – DOI:

10.1016/j.dibe.2020.100039. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165920300363 (датаобращения: 08.04.2026).

16) Bringing Systems Engineering Models to Large Language Models: An Integration of OPM with an LLM for Design Assistants / Alarcia R.M. García, P. Russo, A. Renga, A. Golkar // Proceedings of the 12th International Conference on Model-Based Software and Systems Engineering - MBSE-AI Integration. – 2024. – P. 334-345. – DOI: 10.5220/0012621900003645. – URL: https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220/0012621900003645 (дата обращения: 08.04.2026).

17) Lukac, D. Using Digital Twins for the Optimization of Control Cabinet Engineering // IFAC-Papers On Line. – 2022. – Vol. 55, iss. 4. – P. 351-355. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.06.058. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405896322003731 (дата обращения: 08.04.2026).

18) Копылов, Е.А. Личные нейроконсультанты с применением больших языковых моделей / Е.А. Копылов, Е.А. Дзюба // Вестник Пензенского государственного университета. – 2025. – № 1. – С. 66-72. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/lichnye-neyrokonsultanty-s-primeneniem-bolshih-yazykovyh-modeley (дата обращения: 08.04.2026).

19) Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM / В.П. Куприяновский, А.А. Климов, Ю.Н. Воропаев, О.Н. Покусаев, А.П. Добрынин, И.В. Понкин, А.А. Лысогорский // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8, № 3. – P. 55-74. – URL: https://injoit.org/index.php/j1/article/view/906 (дата обращения: 08.04.2026).

20) Рябцев, В.Г. Информационная технология проектирования систем автоматизированного управления технологическими процессами / В.Г. Рябцев, Т.Ю. Уткина // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 1. – С. 207-238. – URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2016-01/09-Ryabtsev.pdf (дата обращения: 08.04.2026).

21) Когут, А.Т. Автоматизация проектирования электротехнических систем на основе математического моделирования / А.Т. Когут, А.А. Лаврухин, В.В. Петров // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 3(37). – С. 79-83. – URL: https://sibadi.org/upload/vestnik_3%2814%29.pdf (дата обращения: 08.04.2026).

22) Проблемные вопросы проведения информационного обследования как базового этапа разработки АСУ / О.В. Саяпин, О.В. Тиханычев, С.В.Чискидов, М.О. Саяпин // Программные продукты и системы. – 2019. – № 1. – С. 73-80. – DOI: 10.15827/0236-235X.125.073-080. – URL: https://swsys.ru/index.php?id=4559&page=article (дата обращения: 08.04.2026).

УДК 004.932

АДАПТИВНОЕ УСИЛЕНИЕ КОНТРАСТА В ЛОКАЛЬНО-ФРАГМЕНТАРНОЙ СХЕМЕ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С.М. Головкин, А.Б. Раухваргер

Научный руководитель - **А.Б. Раухваргер**, канд. физ.-мат. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В работе рассматривается задача повышения различимости деталей цифровых изображений в условиях низкого контраста. В качестве основы используется локально-фрагментарная схема обработки, позволяющая учитывать локальные статистические характеристики распределения яркости пикселей. Предлагается модификация известного метода усиления контраста, основанная на автоматическом выборе параметра, регулирующего степень локальной адаптивности преобразования. Предложенный метод использует глобальные характеристики изображения для определения оптимального режима обработки.

***Ключевые слова**: локально-фрагментарная схема, усиление контраста, цифровая обработка изображений, телевизионный алгоритм, локальные статистические характеристики, адаптивные методы, различимость деталей*

ADAPTIVE CONTRAST ENHANCEMENT IN A LOCALLY-FRAGMENTARY SCHEME FOR DIGITAL IMAGE PROCESSING

S.M. Golovkin, A.B. Raukhvarger

Scientific Supervisor - **A.B. Raukhvarger**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The paper addresses the problem of improving the distinguishability of details in digital images under low-contrast conditions. The study is based on a locally-fragmentary image processing scheme that takes into account the local statistical characteristics of pixel brightness distribution. A modification of a known contrast enhancement method is proposed, based on the automatic selection of a parameter that controls the degree of local adaptivity of the transformation. The proposed method utilizes global image characteristics to determine the optimal processing mode.

***Keywords**: locally-fragmentary scheme, contrast enhancement, digital image processing, television algorithm, local statistical characteristics, adaptive methods, detail distinguishability*

В цифровой обработке изображений одной из наиболее актуальных задач остаётся повышение различимости деталей в условиях слабоконтрастной съёмки – при низкой освещённости, наличии атмосферных искажений или ограниченном динамическом диапазоне сенсора. В подобных условиях визуально значимая информация оказывается сосредоточенной в узком диапазоне яркостей, что затрудняет зрительный анализ и последующую автоматическую обработку.

Алгоритмы усиления яркостного контраста, основанные на использовании глобальных статистических характеристик, обладают ограниченной адаптивностью. При их применении изменение яркости пикселей происходит относительно единого глобального уровня, что приводит к неоднородному результату: в одних областях детали становятся более различимыми, тогда как в других - могут теряться или искажаться. Данный эффект подробно отмечается в исследованиях, посвящённых телевизионному алгоритму изменения контраста [3], а также в работах по цифровой обработке изображений [1, 2].

С целью преодоления указанных ограничений в [3] была предложена локально-фрагментарная схема обработки изображений. В рамках данной схемы изображение рассматривается не как единое целое, а как совокупность перекрывающихся локальных

областей - фрагментов, последовательно перемещающихся по полю пикселей с шагом в один пиксель. Для каждого фрагмента вычисляются локальные статистические характеристики, на основе которых выполняется преобразование яркости. Результаты обработки затем накладываются друг на друга с усреднением в зонах перекрытия, что позволяет устранить резкие границы между фрагментами и сохранить целостность визуального восприятия.

Такой подход обеспечивает более высокий уровень адаптивности по сравнению с глобальными методами, поскольку позволяет учитывать пространственную неоднородность распределения яркости. Как показано в [3], локально-фрагментарная схема обеспечивает существенное улучшение различимости слабых деталей, особенно в тёмных и низкоконтрастных изображениях, при сохранении естественного внешнего вида.

Дальнейшее развитие данного подхода было связано с интеграцией в локально-фрагментарную схему классического телевизионного алгоритма изменения контраста [4]. В рамках этих исследований были предложены несколько вариантов его включения, различающиеся способом учёта глобальных и локальных статистических характеристик.

В частности, в [3] выделяются три базовых метода. Первый метод использует локальное среднее значение яркости при фиксированном коэффициенте усиления, что обеспечивает стабильность и естественность результата. Второй метод вводит зависимость коэффициента усиления от отношения глобального и локального среднеквадратичных отклонений, что приводит к более агрессивному усилению деталей, однако может сопровождаться потерей визуальной естественности. Для объединения преимуществ обоих подходов был предложен обобщённый вариант - Метод 3, в котором вводится дополнительный параметр $q \in [0,1]$, регулирующий степень влияния локальной статистики:

$$k_{\text{фр}} = \frac{\sigma_{\text{гл}.z}}{\sigma_{\text{фр}.y}} \left(\frac{\sigma_{\text{фр}.y}}{\sigma_{\text{гл}.y}} \right)^{1-q} - 1. \quad (1)$$

При $q = 0$данный метод сводится к более устойчивому первому варианту, тогда как при $q = 1$ он эквивалентен более чувствительному ко локальным изменениям второму варианту [3]. Таким образом, параметр q фактически определяет баланс между устойчивостью и адаптивностью обработки.

Однако существенным недостатком данной модели является необходимость ручного подбора параметра qдля каждого конкретного изображения. Как отмечается в [3], оптимальное значение параметра зависит от структуры сцены, уровня шума и распределения яркости, что снижает практическую применимость метода в автоматизированных системах обработки.

Настоящая работа направлена на развитие указанного подхода путём устранения данного ограничения. В ней предлагается модификация локально-фрагментарного метода, заключающаяся в автоматическом выборе параметра qна основе глобальных статистических характеристик исходного изображения.

Вместо ручной настройки используется следующее правило:

$$q = \min\left(1,\ \max\left(0, 1 - \frac{\sigma_{\text{гл}.y}}{80}\right)\right), \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{гл}.y}$- среднеквадратичное отклонение яркости исходного изображения.

Вычитание из единицы создаёт обратную зависимость: чем ниже глобальный контраст изображения (малое значение $\sigma_{\text{гл}.y}$), тем больше становится q. В этом случае Метод 3 сильнее учитывает локальную статистику каждого фрагмента и приближается по поведению к агрессивному Методу 2, помогая «вытягивать» скрытые детали в тёмных и монотонных областях. Число 80 в знаменателе выбрано эмпирически как характерное значение глобального среднеквадратичного отклонения для 8-битных фотографий с естественным, комфортным контрастом. Когда $\sigma_{\text{гл}.y}$ достигает значения близкое к 80, выражение внутри скобок становится равным нулю, и Метод 3 полностью переходит в

консервативный режим Метода 1. При ещё более высоком контрасте функция ограничения надёжно удерживает qна нуле, предотвращая любое переусиление.

Мы провели эксперимент, в котором сравнили обработку изображения при фиксированном и автоматически выбранном параметре qна изображениях с отличающимися контрастными характеристиками.Ниже приведён пример результатов.

На рис. 1 приведено исходное изображение в оттенках серого.

Рис. 1. Исходное изображение

На рис. 2 приведено сравнение результатов обработки изображения с использованием локально-фрагментарной схемы при различных способах задания параметра q.

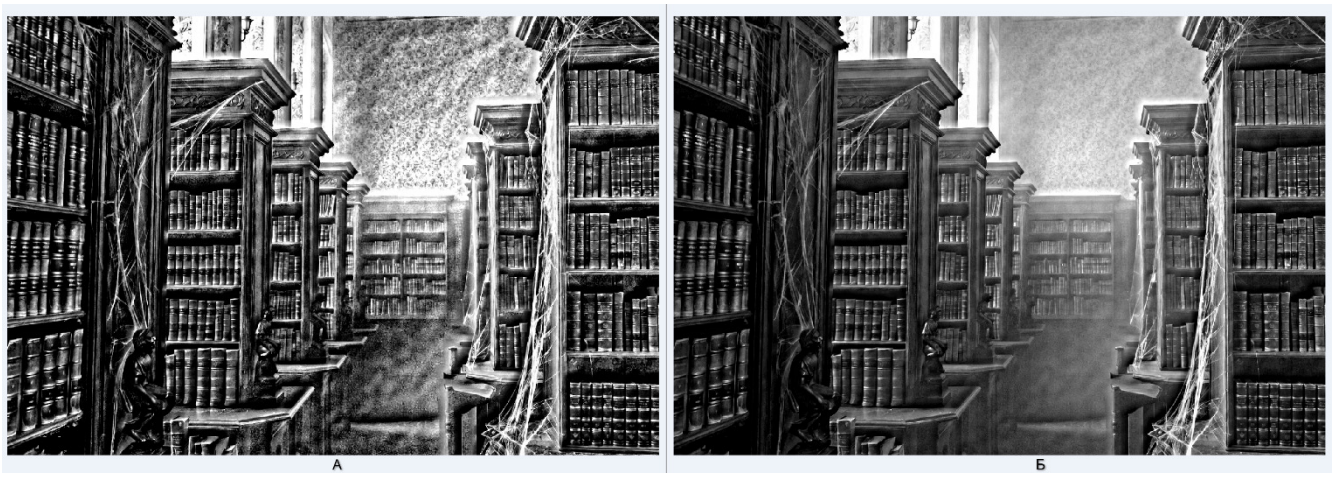


Рис. 2. Сравнение результатов обработки:
А - обработка при фиксированном параметре $q = 0{,}7$;
Б - обработка при автоматическом выборе параметра qпо формуле (2);
общие параметры: $\sigma_{\text{гл.}y} = 120$, размер фрагмента 15x15.

Автоматический выбор параметра qприводит к более сбалансированному и визуально естественному изображению. В случае фиксированного значения $q = 0{,}7$ (рис. 2А) наблюдается более агрессивное усиление локального контраста, что способствует лучшей различимости мелких деталей, однако сопровождается переусилением текстур, повышением зернистости и частичной потерей целостности тональных переходов. В то же время при автоматическом определении параметра (рис. 2Б), значение q снижается, что переводит алгоритм в более консервативный режим. Это обеспечивает сглаживание локальных вариаций и формирование более «человеко-ориентированного» восприятия изображения.

Изменим рис. 1, так чтобы изображение стало более темным и менее контрастным (рис. 3).

Рис. 3. Исходное изображение с изменением контраста

Аналогично действиям с рис. 2 проведем сравнение работы алгоритмов при разных параметрах (рис. 4).

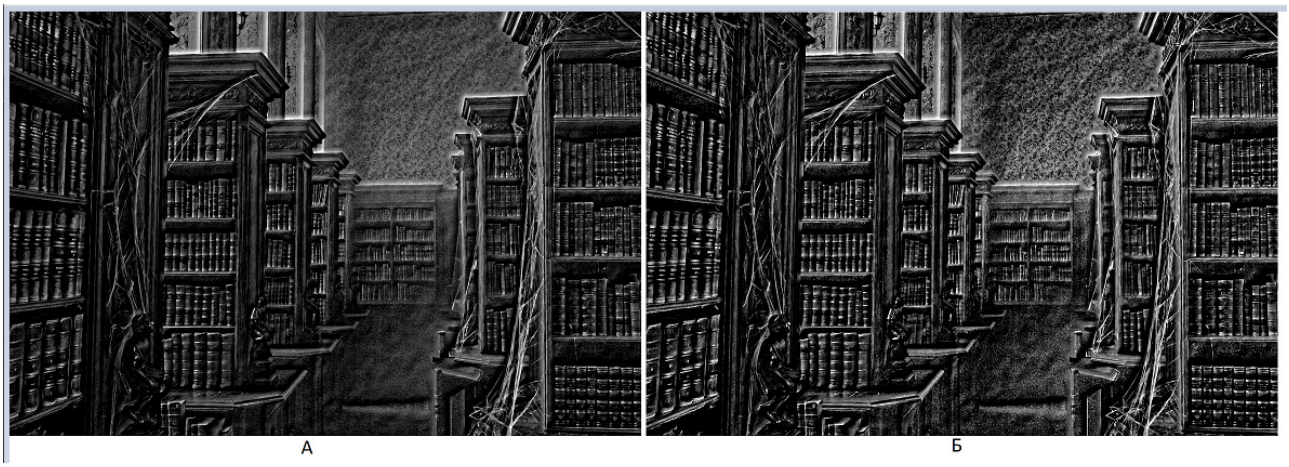


Рис. 4. Сравнение результатов обработки изображения 3:
А - обработка при фиксированном параметре $q = 0{,}5$;
Б - обработка при автоматическом выборе параметра q по формуле (2);
общие параметры: $\sigma_{\text{гл.}y} = 100$, размер фрагмента 11x11.

Результаты, представленные на рис. 4, демонстрируют иное поведение алгоритма по сравнению с предыдущим экспериментом. В случае фиксированного значения параметра $q = 0{,}5$ (рис. 4, А) наблюдается умеренное усиление локального контраста, при котором часть деталей становится различимой, однако изображение в целом сохраняет некоторую «приглушённость» тёмных областей.

При автоматическом выборе параметра q (рис. 4, Б) алгоритм, учитывая более низкое значение глобального среднеквадратичного отклонения, увеличивает вклад локальной статистики. Это приводит к более агрессивному усилению контраста в пределах фрагментов, что выражается в заметно лучшей проработке структуры сцены: становятся более различимыми элементы книжных полок, текстуры поверхностей и детали в глубине изображения. Одновременно повышается общее визуальное разделение объектов.

Таким образом, предложенная модификация сохраняет базовую структуру локально-фрагментарной схемы и телевизионного преобразования, но вводит дополнительный уровень

адаптивности, связанный с глобальным состоянием изображения. Это позволяет автоматически подстраивать поведение алгоритма под условия съёмки, уменьшая количество ручной настройки параметров обработки изображения.

Дополнительным преимуществом предлагаемого подхода является его вычислительная простота: для определения параметра qиспользуются уже доступные глобальные характеристики изображения, что не требует изменения общей структуры алгоритма и не увеличивает вычислительную сложность обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 456 с.

2) Фисенко, В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.

3) Раухваргер, А.Б. Об алгоритме изменения контраста цифрового изображения с учетом локальных статистических характеристик распределения яркости пикселей / А.Б. Раухваргер, Р.И. Абунагимов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 2. – С. 26–33.

4) Раухваргер, А.Б. Об управлении перемещением пикселя в RGB-пространстве при яркостно-контрастных преобразованиях цветных цифровых изображений и алгоритме частотно-пропорционального растяжения. // Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 15. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2020. – С. 231-244.

УДК 004.89

АНАЛИЗ АРХИТЕКТУРНЫХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВОПРОС-ОТВЕТНЫХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ С ХУДОЖЕСТВЕННЫМИ ТЕКСТАМИ

В.В. Гончарова, О.Ю. Марьясин

Научный руководитель – **О.Ю. Марьясин**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается сравнительный анализ двух архитектурных подходов к реализации вопрос-ответных систем, работающих с художественными текстами с применением технологии Retrieval-Augmented Generation: традиционного, основанного на векторном поиске по фрагментам текста, и перспективного подхода, использующего графы знаний. Результаты исследования позволяют сделать вывод о целесообразности использования систем на основе графов знаний в задачах анализа художественных текстов, где ключевым требованием является не дословное извлечение цитат, а глубинное понимание смысла повествования.

Ключевые слова: *обработка естественного языка, вопрос-ответные системы, retrieval-augmented generation, векторные базы, графы знаний, семантическая близость*

ANALYSIS OF ARCHITECTURAL APPROACHES TO CONSTRUCTING QUESTION-ANSWER SYSTEMS WORKING WITH LITERARY TEXTS

V.V. Goncharova, O.Yu. Maryasin

Scientific Supervisor – **O.Yu. Maryasin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This paper presents a comparative analysis of two architectural approaches to implementing question-answering systems for literary texts using retrieval-augmented generation technology: a traditional approach based on vector search across text fragments and a promising approach using knowledge graphs. The results of the study suggest the feasibility of using knowledge graph-based systems for literary text analysis, where the key requirement is not verbatim quotation extraction, but a deep understanding of the meaning of the narrative.

Keywords: *natural language processing, question-answering systems, retrieval-augmented generation, vector bases, knowledge graphs, semantic proximity*

Технология Retrieval-Augmented Generation (RAG) сейчас является преобладающей при построении различных вопрос-ответных систем с использованием больших языковых моделей (Large Language Model – LLM). RAG – подход к работе с LLM, при котором генерация ответа происходит на основе данных из внешних источников информации (Интернет, корпоративные базы данных, справочники, файлы и другие хранилища данных) [1].В отличие от LLM, чьи знания обычно ограничены объёмом данных, на которых они были обучены, и зафиксированы в момент завершения обучения, и которые могут предоставлять не только устаревшие, но и неверные ответы на вопросы, RAG привлекает внешние источники данных для поиска релевантного контекста, затем ранжирует полученную информацию по степени соответствия запросу, и на основе этих данных формирует ответ пользователю.

В данной работе рассматривается сравнительный анализ двух архитектурных подходов к реализации вопрос-ответных систем, работающих с художественными текстами с применением технологии RAG: традиционного RAG, основанного на векторном поиске по фрагментам текста, и перспективного подхода GraphRAG, использующего графы знаний. Традиционный RAG рассматривает знания как набор отдельных текстовых фрагментов. Он преобразует фрагменты текста в векторные эмбеддинги, где каждый фрагмент существует

независимо, а его связь с другими определяется лишь абстрактной близостью в многомерном векторном пространстве. GraphRAG, в отличие от традиционного RAG, использует связную сеть знаний [2]. В его основе лежит граф знаний – структура, состоящая из узлов, которые представляют собой сущности (люди, организации, места), и ребер, обозначающих отношения между ними.

Актуальность работы обусловлена растущей сложностью задач автоматической обработки естественного языка (Natural Language Processing – NLP), где стандартные методы зачастую не способны улавливать глубинные смысловые связи, характерные для художественной литературы, требующей не только фактологической точности, но и понимания сюжетных линий, мотивации персонажей и причинно-следственных связей. Художественные тексты, обладающие сложной структурой и причинно-следственными взаимосвязями между событиями и персонажами, представляют собой особенно сложный объект для автоматического анализа. При этом вопрос о том, какая архитектура RAG – классическая или графоориентированная (GraphRAG) обеспечивает наилучшее качество ответов при работе с такими текстами, остаётся открытым и требующим экспериментального исследования.

В качестве GraphRAG систем применялись системы LightRAG [3] и Nano-graphrag [4]. Традиционная RAG система была построена на базе инструментов LangChain и LangGraph. В качестве художественного текста для экспериментов использовалась повесть Чарльза Диккенса «A Christmas Carol in Prose, Being a Ghost Story of Christmas». В подготовку экспериментов входило составление перечня вопросов, состоящих из общих и частных вопросов по тексту повести Диккенса. Так как текст повести Диккенса был представлен на английском языке, то и вопросы были составлены на английском.

При первом запуске каждой системы исходный текст повести Диккенса загружался и разбивался на фрагменты определённого размера (чанки) с перекрытием. Затем для GraphRAG систем при помощи LLM из каждого чанка извлекались ключевые сущности, означающие места, персонажей, понятия и др., и отношения между ними. На основе этих данных для GraphRAG систем строился граф знаний. Для GraphRAG систем дополнительно также выполнялась кластеризация узлов в сообщества и были сгенерированы текстовые отчеты, обобщающих информацию внутри каждого сообщества.

В случае классического RAG чанки, при помощи модели эмбеддинга, преобразовывались в векторы, которые сохранялись в отдельную коллекцию векторной базы Qdrant. Далее выполнялся поиск в векторном хранилище, после которого возвращались релевантные фрагменты. Затем наиболее релевантный фрагмент вместе с вопросом подставлялся в готовый шаблон, после чего сформированный промпт направлялся LLM, которая генерировала ответ.

На следующем этапе исследования был осуществлён сбор ответов, сгенерированных LLMllama3.2:3b, запущенной локально через сервер Ollama. Все полученные ответы были собраны и зафиксированы в csv-файле для последующего сравнительного анализа качества и полноты генерации.

Далее была проведена оценка полученных ответов путём их сравнения с эталонными формулировками. Для этого использовались метрики, включающие в себя алгоритм ROUGE [5] для анализа лексического совпадения и модели реранкера [6] и кросс-энкодера [7]. В качестве модели реранкера была использована мультиязычная модель реранкера BAAI/bge-reranker-v2-m3. А в качестве кросс-энкодера применялась специализированная модель cross-encoder/ms-marco-MiniLM-L-6-v2.

Оценки релевантности ответов для модели кросс-энкодера представлены в табл. 1. Для каждого вопроса был определен лучший подход (LightRAG, Nanograph-RAG или традиционный RAG), а также посчитаны средние оценки для каждого из них.

Таблица 1. Оценки релевантности ответов с использованием кросс-энкодера

Система	Вопросы						
	1	2	3	4	5	6	7
LightRAG	3,14	4,33	5,26	7,40	2,59	3,43	4,64
Nanographrag	2,69	1,96	5,08	7,28	4,39	2,43	4,34
RAG	0,51	0,71	5,97	2,98	2,70	3,17	4,78

На основании анализа релевантности ответов, полученных с помощью кросс-энкодера, можно заключить, что LightRAG демонстрирует семантически более точные результаты по сравнению с другими системами. Из семи тестовых вопросов он показал наилучшие результаты в четырёх случаях, а его средняя оценка составила 4,40. Также LightRAG, продемонстрировал превосходные результаты на общих вопросах. Nanograph-RAG также показал результаты, которые в большинстве случаев были лучше, чем у традиционного RAG. Его средняя оценка составляет 4,02, что немного уступает LightRAG, но всё же выше, чем у RAG. Традиционный RAG провалился на первых двух общих вопросах, однако показал лучшие результаты на двух из семи вопросов. В то же время на остальных вопросах его оценки были средними или низкими. Таким образом, можно сделать вывод, что ответы LightRAG и Nanograph-RAG семантически более близки к эталонным, чем ответы традиционного RAG.

Оценки релевантности ответов для модели реранкера представлены в табл. 2. Для каждого вопроса определен лучший подход и посчитаны средние оценки для каждого из них.

Таблица 2. Оценки релевантности ответов с использованием реранкера

Система	Вопросы						
	1	2	3	4	5	6	7
LightRAG	2,00	4,18	5,28	4,36	3,40	2,51	3,60
Nanographrag	2,51	2,63	2,70	4,66	4,05	5,09	4,11
RAG	2,62	3,48	8,26	1,72	0,05	2,98	0,08

Результаты оценки релевантности по модели реранкера показали, что LightRAG получил наивысший средний балл (3,70). Nanograph-RAG, хоть и немного уступает ему (3,68), но всё же превзошёл LightRAG в пяти из семи случаев, тогда как LightRAG оказался лучшим только в двух. Традиционный RAG продемонстрировал лучшие результаты только в двух вопросах, а в остальных случаях его оценки были средними или низкими. Его средняя оценка также уступает оценкам GraphRAG подходов. Таким образом, GraphRAG подходы, судя по реранкеру, оказались эффективны для всех типов вопросов.

В таблице 3 представлены оценки качества генерации ответов для метрик ROUGE (ROUGE-1, ROUGE-2 и ROUGE-L).По результатам оценки лексической близости, проведённой с использованием метрик ROUGE-1, ROUGE-2 и ROUGE-L, классический RAG демонстрирует лучшие результаты практически во всех вопросах. Он занимает лидирующие позиции по метрике ROUGE-1 в пяти из семи случаев, по метрике ROUGE-2 – в четырёх, а по метрике ROUGE-L – в пяти. LightRAG и Nanograph-RAG в этом плане значительно ему уступают, демонстрируя более низкие результаты.

Таким образом, в работе рассматривается сравнительный анализ двух архитектурных подходов к реализации вопрос-ответных систем, работающих с художественными текстами с применением технологии RAG: традиционного RAG, основанного на векторном поиске по фрагментам текста, и перспективного подхода GraphRAG, использующего графы знаний. Результаты исследования позволяют сделать вывод о целесообразности использования систем на основе графов знаний в задачах анализа художественных текстов, где ключевым требованием является не дословное извлечение цитат, а глубинное понимание смысла повествования.

Таблица 3. Оценки качества ответов для метрик ROUGE

Система	Вопросы						
	1	2	3	4	5	6	7
ROUGE-1							
LightRAG	0,15	0,21	0,04	0,20	0,08	0,21	0,14
Nanographrag	0,35	0,44	0,16	0,34	0,10	0,31	0,21
RAG	0,59	0,40	0,36	0,43	0,26	0,31	0,34
ROUGE-2							
LightRAG	0,07	0,09	0,01	0,19	0,01	0,06	0,04
Nanographrag	0,12	0,14	0,03	0,13	0,03	0,08	0,08
RAG	0,29	0,10	0,07	0,08	0,02	0,13	0,14
ROUGE-L							
LightRAG	0,11	0,13	0,03	0,20	0,07	0,12	0,09
Nanographrag	0,17	0,21	0,09	0,22	0,08	0,18	0,18
RAG	0,39	0,21	0,23	0,20	0,17	0,22	0,26

Результаты работы могут быть использованы при разработке вопрос-ответных систем, работающих с художественными текстами с применением технологии RAG, а также в учебном процессе при изучении методов искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) RAG (Retrieval Augmented Generation) – простое и понятное объяснение. – URL: https://habr.com/ru/articles/779526/ (дата обращения: 27.03.2026)

2) Graph RAG: как RAG, только с графом знаний. – URL: https://blogs.epsilonmetrics.ru/graph-rag-kak-rag-tolko-c-grafom-znanij/ (дата обращения: 27.03.2026)

3) LightRAG: site – URL: https://github.com/HKUDS/LightRAG?ysclid=mmq06ky3p8484515235 (дата обращения: 27.03.2026)

4) Nano-graphrag: A simple, easy-to-hack GraphRAG implementation. – URL: https://github.com/gusye1234/nano-graphrag (дата обращения: 27.03.2026)

5) ROUGE: site. – URL: https://systems-analysis.ru/wiki/ROUGE (дата обращения: 27.03.2026)

6) Reranker. – URL: https://re-ii.ru/glossary/reranker/ (дата обращения: 27.03.2026)

7) Cross-encoder. – URL: https://re-ii.ru/glossary/cross-encoder/ (дата обращения: 27.03.2026)

УДК 004.056

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ РИДА-СОЛОМОНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КАНАЛАМ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ БПЛА.

В.А. Григорьев, А.В. Никитенко

Научный руководитель - **А.В. Никитенко**, канд. пед. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается проблема обеспечения целостности телеметрических данных при передаче по каналам связи. Обосновывается выбор кодов Рида-Соломона (RS) как оптимального метода коррекции многобитовых и пакетных ошибок. Предложена архитектура специализированного контроллера на базе программируемой пользователем вентильной матрицы (FPGA), реализующего алгоритмы кодирования и декодирования RS(255,223) над полем Галуа GF(2^8), при различных уровнях битовых ошибок (BER) и скоростях потока данных, характерных для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (от 10 до 100 Кбит/с)

Ключевые слова: *целостность данных, телеметрия, коды Рида-Соломона, коррекция ошибок, контроллер, поле Галуа, FPGA, BER, БПЛА*

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE RID-SOLOMON NOISE-RESISTANT CODING ALGORITHM APPLIED TO UAV TELEMETRIC INFORMATION TRANSMISSION CHANNELS

V.A. Grigoriev, A.V. Nikitenko

Scientific Supervisor - **A.V. Nikitenko**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the problem of ensuring the integrity of telemetry data during transmission over communication channels. The choice of Reed-Solomon (RS) codes as the optimal method for correcting multi-bit and packet errors is substantiated. A specialized controller based on a field-programmable gate array (FPGA) is proposed to implement RS(255,223) encoding and decoding algorithms over the Galois field GF(2^8) at various bit error rates (BER) and data flow rates typical for unmanned aerial vehicles (UAVs) (10 to 100 Kbps).

Keywords: *data integrity, telemetry, Reed-Solomon codes, error correction, controller, Galois field, FPGA, BER, UAV*

Современные телеметрические системы предъявляют высокие требования к достоверности передачи данных, особенно в условиях интенсивных помех, характерных для беспроводных каналов [9]. Искажения информации могут приводить к критическим последствиям, поэтому ключевое значение приобретают методы помехоустойчивого кодирования [1, 10], такие как коды Рида-Соломона (далее RS-коды). RS выделяются способностью исправлять многобитовые и пакетные ошибки на уровне символов [1, 2, 11]. Работая в поле Галуа GF(2^8) [5, 6], они позволяют эффективно восстанавливать данные при умеренных вычислительных затратах.

Целью исследования является оценка и анализ эффективности алгоритма помехоустойчивого кодирования Рида-Соломона применительно к каналам передачи телеметрической информации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при скорости 10-100 Кбит/с и BER до 10^{-3}.

RS-коды на основе полинома степени 8 работают в поле Галуа GF(2^8), задаваемое примитивным полиномом, как, $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ [5, 6]. При кодировании информационное сообщение представляется в виде полинома $I(x)$ степени $k-1$, где k - число информационных символов [1, 6]. Затем формируется генераторный полином $g(x)$, корни которого являются последовательными степенями примитивного элемента поля GF(2^8) [5, 6]. Кодовое слово получается путем деления сдвинутого полинома $I(x)\cdot x^{n-k}$ (2) на $g(x)$, где $\underline{n}$ - общая длина кода [1, 6]. При декодировании сначала вычисляются синдромы, позволяющие

обнаружить ошибки [1, 12]. Если синдромы ненулевые, применяется алгоритм Берлекэмпа-Мэсси для построения полинома локатора ошибок $\sigma(x)$ [12, 13], а затем метод Чиена находит их позиции [1, 12]. Величина ошибок определяется через полином-оценщик $\omega(x)$ [1]. После этого вносится корректировка в принятое слово [1, 11]. RS-коды способны исправлять до $t = (n-k)/2$ ошибок, где $n-k$ - число избыточных символов, что делает их мощным инструментом коррекции ошибок в системах хранения и передачи данных [1,2]. Схематичное кодирование кода Рида-Соломона представлено на рис. 1.

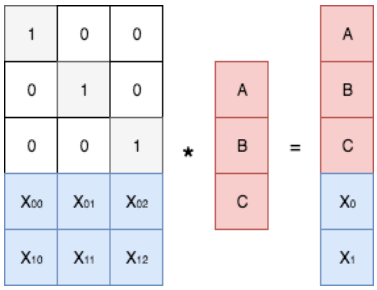


Рис. 1. Процедура кодирования

На рис. 2 представлена процедура декодирования.

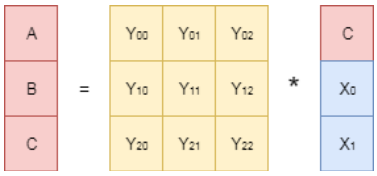


Рис. 2. Процедура декодирования

В ходе исследования, была проверена работа алгоритма RS, при BER от 0,1 до 10% и скорости потока данных реальных моделей БПЛА.

Рассмотрим ту скорость потока данных, которая используется в реальных БПЛА [7, 8]. В качестве примера возьмем Whoop-класс (BetaFPV, Happymodel): 11 Кбит/с и DJI Matrice 300: 70 Кбит/с [7, 14]. На рис. 3 продемонстрированы результаты измерений для Whoop-дрона при скорости 11 Кбит/с.

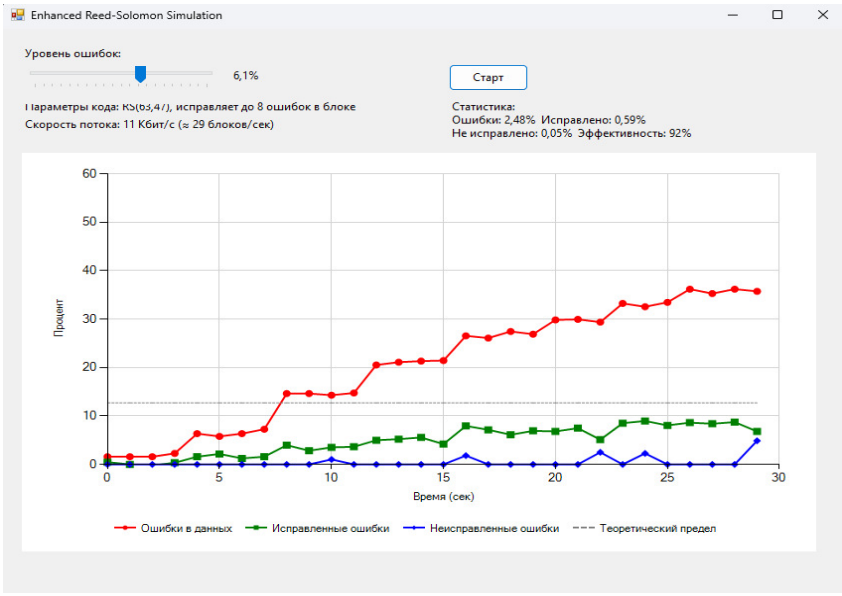


Рис. 3. Работа симулятора для Whoop-дрона при скорости передачи данных 11 Кбит/с

При 11 Кбит/с (примерно 29 блоков в секунду) алгоритм демонстрирует стабильную работу. Он исправляет 92% ошибок и оставляет около 0,05% неисправленных данных. Заметна небольшая задержка в обновлении графика в 2 секунды. При 70 Кбит/с (DJI Matrice 300, рис. 4) требуются дополнительные вычислительные ресурсы [3, 4]. До достижения лимита (8 ошибок на блок) программа корректирует большинство искажений. После превышения предела число пропущенных ошибок резко возрастает [1, 7], алгоритм RS сохраняет работоспособность, но требует баланса между скоростью передачи и устойчивостью к помехам [7, 8].

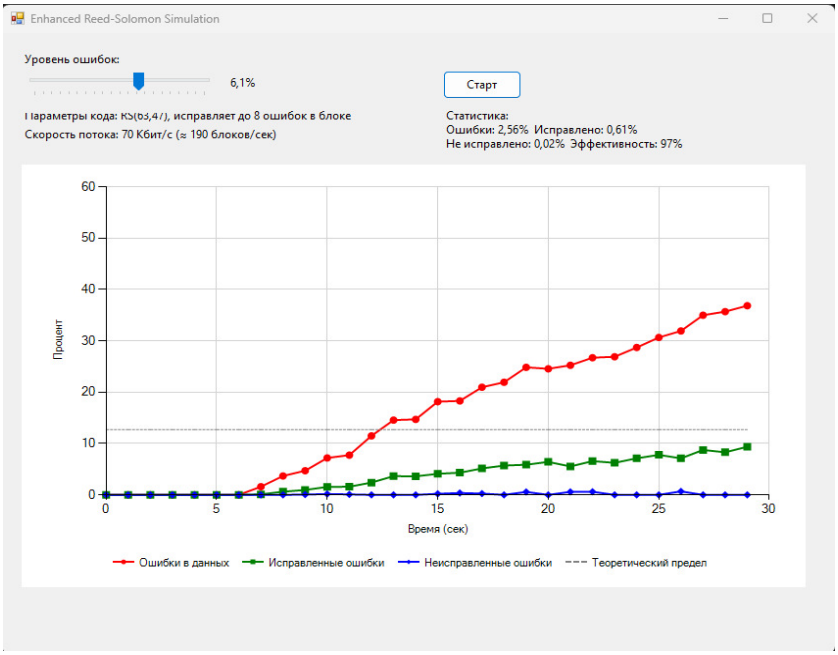


Рис. 4. Работа симулятора для DJI Matrice 300 при скорости передачи данных 70 Кбит/с

Программа при скорости телеметрии 70 Кбит/с (≈190 блок/с) показала, что при уровне помех 6,1% количество исправленных ошибок - 0,61%, неисправленных - 0,02%.

Далее проведем эксперимент для скоростей 10-100 кбит/с с шагом 10 кбит/с, то есть для диапазона, характерного для БПЛА. Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 5.

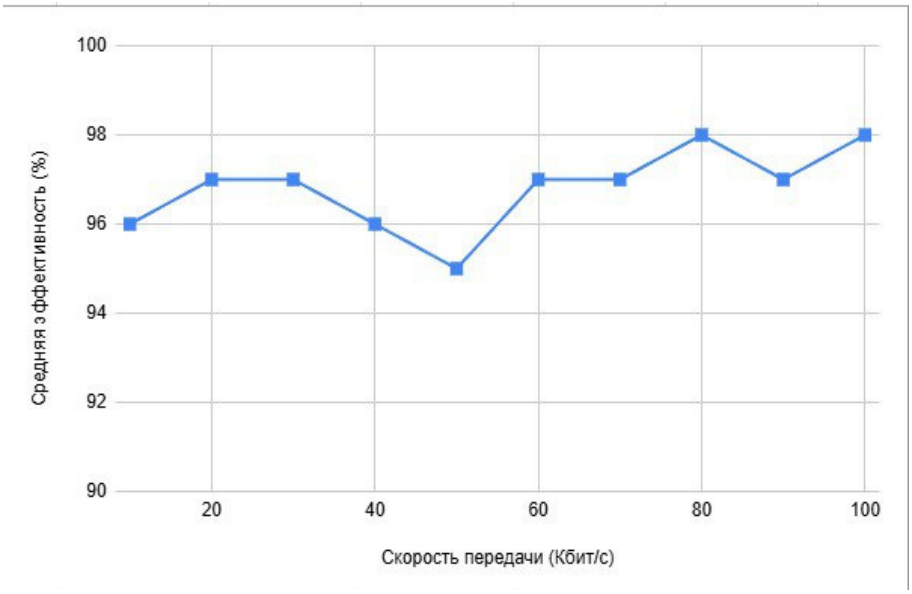


Рис. 5. Общий график эффективности при различных скоростях

Средняя эффективность при диапазоне от 10 до 100 Кбит/с диапазоне от 95 до 98%. Максимальная эффективность достигается при уровне ошибок от ~ 4 до ~ 7%. Эксперименты наглядно показали эффективность при обнаружении и исправлении ошибок и надежность использования кодов Рида-Соломона для обеспечения целостности телеметрии БПЛА.

В ходе исследования была проверена работа алгоритма кодирования и декодирования RS(255,223) над полем Галуа GF(2^8) в телеметрии БПЛА на управляемой пользователем FPGA. Результаты экспериментов подтвердили эффективность предложенного метода, RS-коды обеспечивают исправление до 16 ошибок на блок при BER, характерных для реальных условий эксплуатации БПЛА, и поддерживают скорость потока данных от 10 до 100 Кбит/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Asvial, M. Design and Analysis of Reed Solomon Code in 5G Release 18 Mobile Wireless Communication Technology / M. Asvial, P. Budyprawira // Journal of Communications. - 2024. - Vol. 19, no. 10. - P. 476-485. – DOI: 10.12720/jcm.19.10.476-485.

2) Zhang, X. VLSI Architectures for Reed-Solomon Codes: Classic, Nested, Coupled, and Beyond // IEEE Open Journal of Circuits and Systems. - 2020. - Vol. 1. - P. 157-169. – DOI: 10.1109/OICAS.2020.3019403.

3) FPGA Implementation and Verification of Reed-Solomon (63,47,8) Code in SDR System / Y.H. Chen, C.L. Chu, C.C. Yeh, K.F. Lin // Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. - Harbin, China, 2012. - P. 100-103. – DOI: 10.1109/IMCCC.2012.30.

4) Parvathi, P. FPGA based design and implementation of Reed-Solomon encoder & decoder for error detection and correction / P. Parvathi, P.R. Prasad // Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth. - Kurnool, India, 2015. - P. 261-266. – DOI: 10.1109/PCCCTSG.2015.7503941.

5) Трифонов, П.В. Основы помехоустойчивого кодирования: учебное пособие. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2022. - 231 с.

6) Коды Рида-Соломона // Теоретические основы цифровой связи. - URL: https://siblec.ru/telekommunikatsii/teoreticheskie-osnovy-tsifrovoj-svyazi/8-kanalnoe-kodirovanie-chast-3/8-1-kody-rida-solomona (дата обращения: 10.03.2026)

7) UAV Telemetry Equipment Market Size, CAGR, Trends and Forecast 2034 // Dimension Market Research: [site]. – 2025. – URL: https://dimensionmarketresearch.com/report/uav-telemetry-equipment-market/ (дата обращения: 10.03.2026)

8) Airborne Telemetry Market Size, Share, and Growth Analysis // SkyQuest Technology Consulting: [site]. - 2025. - URL: https://www.skyquestt.com/report/airborne-telemetry-market (дата обращения: 11.03.2026)

9) Рацеев, С.М. Об алгоритме Берлекэмпа - Месси и его применении для декодирования кодов / С.М. Рацеев, А.Д. Лавриненко, Е.А. Степанова // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. - 2021. - Т. 27, № 1. - С. 44-61.

10) Помехоустойчивое кодирование: описание, типы, применение // Docstech: [site].. - 2024. - URL: https://docstech.ru/pocmech/ (дата обращения: 11.03.2026)

11) Reed-Solomon code // Error Correction Zoo: [site]. - 2024. - URL: https://errorcorrectionzoo.org/c/reed_solomon (дата обращения: 14.03.2026)

12) Арифметика полей Галуа для кодирования информации кодами Рида-Соломона // Habr: [site]. - 2014. - URL: https://habr.com/ru/articles/212095/ (дата обращения: 15.03.2026)

13) Коды Рида - Соломона с точки зрения обывателя // АСВК МГУ: [site]. - 2023. - URL: https://asvk.cs.msu.ru/wp-content/uploads/2023/04/Kody-Rida-Solomona.pdf (дата обращения: 15.03.2026)

14) DJI Matrice 300 RTK Specifications // DJI: [site]. - 2020. - URL: https://www.dji.com/matrice-300 (дата обращения: 15.03.2026)

УДК 681.5:004.8

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОДХОДОВ К ФОРМИРОВАНИЮ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ АСУТП НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Г.В. Гурчиани, И.В. Тюкин

Научный руководитель – **И.В. Тюкин**, канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

Рассмотрены современные и перспективные подходы к формированию графовых моделей систем автоматизации на основе онтологических, процессно-событийных, лингвистических и мультимодальных методов искусственного интеллекта. На материале русско- и англоязычных источников показано, что наибольший практический эффект обеспечивают гибридные конвейеры, объединяющие онтологическое ядро, извлечение знаний из технической документации и процессно-событийное представление эксплуатационных данных. Выявлены ограничения существующих подходов и обосновано перспективное направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: *графовые модели АСУТП, искусственный интеллект, графы знаний, онтологическое моделирование, процессно-событийное представление, гибридный мультимодальный подход*

ANALYSIS OF CURRENT AND PROSPECTIVE APPROACHES TO FORMING GRAPH MODELS OF AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEMS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

G.V. Gurchiani, I.V. Tyukin

Scientific Supervisor – **I.V. Tyukin**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

The paper examines current and prospective approaches to forming graph models of automation systems using ontology-based, process-event, linguistic, and multimodal artificial intelligence methods. Based on Russian- and English-language sources, it is shown that the greatest practical effect is achieved by hybrid approaches combining an ontology core, knowledge extraction from technical documentation, and a process-event representation of operational data. The study identifies the limitations of existing approaches and substantiates a promising direction for further research.

Keywords: *graph models of automated process control systems, artificial intelligence, knowledge graphs, ontology-based modeling, process-event representation, hybrid multimodal approach*

Введение

Цифровизация промышленности и развитие промышленного интернета вещей привели к резкому росту количества разнородных инженерных источников данных, описывающих одну и ту же систему автоматизации: проектная и нормативная документация, эксплуатационные журналы, телеметрия, конфигурации PLC/SCADA, технологические схемы, экспертные описания и базы знаний. Для согласованного анализа таких данных требуется форма представления, которая одновременно сохраняет структуру объектов, их семантические связи и динамику поведения. Одним из наиболее естественных форматов такого представления выступает графовая модель системы автоматизации [1-4].

Интерес к графовым моделям в последние годы смещается от чисто структурного описания технических систем к более насыщенным представлениям, включающим графы знаний, онтологические слои, процессно-событийные графы и гибридные схемы интеграции данных [3-6]. При этом в литературе нет единого подхода к автоматическому формированию таких моделей для задач автоматизированных систем управления технологическими

процессами (АСУ ТП). Одни работы ориентированы на онтологическое проектирование и хорошо поддерживают интерпретируемость, но требуют значительного экспертного участия. Другие используют методы обработки естественного языка и большие языковые модели для извлечения сущностей и отношений из документов, однако сталкиваются с проблемами верификации результата. Третьи опираются на интеллектуальный анализ процессов (process mining) и журналы событий, но часто не обеспечивают достаточной семантической глубины [7-11].

На этом фоне возникает исследовательская задача сравнить существующие подходы не только по типу используемых алгоритмов, но и по тому, какие источники данных они способны обрабатывать, каков уровень автоматизации формирования графа, насколько получаемая модель пригодна для задач АСУ ТП и какие ограничения препятствуют практическому внедрению. Особенно важен вопрос, следует ли считать наиболее перспективным отдельный класс методов или же внимание должно быть смещено к гибридному мультимодальному конвейеру, который объединяет документы, таблицы, логи, телеметрию и экспертные знания в едином графовом слое [8-10, 12].

Цель настоящего исследования состоит в анализе методов и алгоритмов формирования графовых моделей систем автоматизации на основе искусственного интеллекта, выявлении их сильных и слабых сторон, определении существующих исследовательских пробелов и обосновании перспективного направления дальнейшего развития. В качестве рабочей гипотезы рассматривается тезис о том, что наибольший практический потенциал для АСУ ТП имеет гибридный конвейер, где онтологическое ядро обеспечивает семантическую согласованность, алгоритмы извлечения знаний из технической документации ускоряют наполнение графа, а процессно-событийное представление эксплуатационных данных обеспечивает связь модели с реальным поведением системы.

1. Классические подходы к графовому моделированию в АСУТП

Графовые представления давно применяются в задачах автоматизации как средство описания структуры технических объектов, связности подсистем, потоков материала и сигналов, а также логики управления. Для АСУ ТП особенно характерны структурные модели, где вершины соответствуют технологическим объектам, датчикам, исполнительным механизмам или функциональным блокам, а ребра отражают физические, информационные или управляющие связи. Такой подход хорошо виден в работах по структурному моделированию трубопроводного транспорта и инженерных объектов, где граф используется как компактная форма описания топологии и вычислительных зависимостей [1].

Следующим шагом стало развитие онтологического подхода, в котором граф перестает быть только структурным каркасом и превращается в носитель предметной семантики. Онтологии и графы знаний позволяют описывать не только отношения между сущностями, но и типы объектов, ограничения, контекст применения, причинно-следственные связи и правила вывода. Для промышленной автоматизации такой слой важен, поскольку одна и та же сущность может рассматриваться одновременно как элемент оборудования, источник данных, объект диагностики и часть технологического процесса [2-6, 13-15].

Отдельную линию образует интеллектуальный анализ процессов (process mining) и подход, основанный на построении процессно-событийных графов (process/event graph approach). Здесь внимание переносится на фактическое поведение системы, наблюдаемое через журналы событий, телеметрию и следы исполнения процессов. В отличие от классических структурных моделей, процессно-событийное представление позволяет анализировать не то, как система должна быть устроена по проекту, а то, как она реально функционирует во времени [10-11, 16]. Для АСУ ТП эта линия особенно ценна при анализе отклонений, поиске узких мест, диагностике отказов и восстановлении логики выполнения процессов на основе эксплуатационных данных.

Таким образом, анализ классических подходов позволяет выделить три базовых слоя будущей графовой модели: структурный, семантический и поведенческий. Современные AI-ориентированные (основанные на методах искусственного интеллекта) подходы отличаются

в первую очередь тем, что пытаются автоматизировать построение этих слоев и связать их между собой при помощи методов интеллектуальной обработки данных.

2. Формирование графовых моделей АСУТП на основе ИИ

Подходы, основанные на правилах (rule-based) и онтологиях (ontology-driven), остаются наиболее зрелой и инженерно понятной веткой. Их сильная сторона состоит в том, что граф формируется на базе заранее заданной предметной схемы, связанной со стандартами, классификаторами, инженерными описаниями и экспертными правилами. В промышленном контексте это позволяет согласовать данные разных подсистем и привязать граф к уже существующим формальным моделям предприятия [2, 4-5, 13-15]. Хорошие примеры такой линии демонстрируют работы по ISA-95-ориентированным онтологиям, процессно-ориентированным графам знаний промышленного интернета вещей (process-aware IIoT knowledge graphs), онтологическому описанию производственных систем и онтологическим моделям цифровых двойников [2, 5, 15, 17-18].

Главное достоинство онтологической ветки заключается в интерпретируемости и контролируемости результата. Если граф строится вокруг онтологического ядра предметной области, то облегчается проверка корректности связей, их типизация и повторное использование в прикладных задачах, включая поиск зависимостей, объяснимую диагностику и поддержку принятия решений. Однако именно здесь находится и ключевой барьер: разработка и сопровождение онтологий в большинстве случаев остаются дорогим и слабо автоматизированным этапом. Даже при наличии готовых стандартов схема предметной области требует адаптации под локальную терминологию, структуру документации и типы эксплуатационных данных конкретного предприятия [4, 14-15].

Быстрый рост интереса к методам обработки естественного языка (NLP), извлечения информации (IE) и большим языковым моделям (LLM) связан с тем, что значительная часть знаний о системах автоматизации находится не в готовых базах знаний, а в текстах: технических заданиях, регламентах, руководствах по эксплуатации, стандартах, описаниях технологических маршрутов и сервисной документации. Для таких источников критичным становится извлечение сущностей и отношений из технической документации и последующее преобразование их в представление, пригодное для построения графовой модели [7-9, 19-20].

Особенно показательным является подход, ориентированный на анализ документов, где большие языковые модели используются не как самостоятельный носитель знаний, а как компонент конвейера извлечения, работающий поверх онтологической схемы [7, 19-20]. Такой подход хорошо представлен, в частности, в работе OmEGa, посвященной построению предметно-ориентированного графа знаний на основе производственной документации с использованием онтологической схемы и большой языковой модели [7]. В русскоязычных исследованиях близкая идея реализуется в работах по машинопонимаемым SMART-стандартам и семантическому аннотированию табличных данных [19-20]. Преимущество этого подхода состоит в сокращении доли ручного труда и ускорении наполнения графовой модели. Его ограничение связано с тем, что большие языковые модели и смежные методы не снимают вопрос достоверности: в инженерной среде критичны не только полнота извлечения, но и проверяемость каждой связи, особенно если она затем будет использоваться в системах поддержки принятия решений и мониторинга [7-9, 19-20].

Для АСУ ТП нельзя ограничиться только проектными документами. Система автоматизации существует не только как описание, но и как поток событий, сигналов, отказов, действий оператора и изменений состояния оборудования. Именно поэтому существенное значение имеют подходы, связанные с процессно-событийными моделями, включающие интеллектуальный анализ процессов, анализ журналов событий и семантически аннотированные процессные представления [10-11, 16]. В рамках данного направления формируются не столько графы понятий, сколько процессно-событийные представления, отражающие реальную динамику объекта.

Сильная сторона таких методов состоит в непосредственной связи с эксплуатацией. Если подходы, ориентированные на анализ документов, позволяют восстановить, как

система должна быть устроена, то методы, опирающиеся на журналы событий и эксплуатационные данные, отвечают на вопрос, как она реально работает. Это делает их ценными для диагностики, анализа причин отклонений и построения моделей, учитывающих актуальное состояние технологического процесса [10-12, 16]. Однако в чистом виде интеллектуальный анализ процессов редко обеспечивает достаточную семантическую глубину: процессные графы хорошо описывают последовательности и зависимости, но хуже работают как база для интеграции проектной, нормативной и экспертной информации.

Наиболее перспективными представляются мультимодальные и гибридные конвейеры, в которых графовая модель формируется как интеграция нескольких слоев: документов, таблиц, изображений, схем, телеметрии, журналов событий и экспертных правил. Именно в этом направлении наиболее отчетливо проявляется переход от разрозненной обработки данных к целостному интеллектуальному представлению системы автоматизации. В англоязычных исследованиях эта линия представлена работами по построению мультимодальных графов знаний для эксплуатации и обслуживания промышленного оборудования, многослойным архитектурам графов знаний, онтологически управляемым моделям для сложных промышленных процессов и интеграции графов знаний с интеллектуальными производственными процессами [5, 8, 12, 15, 17-18, 21]. В русскоязычных публикациях сопоставимые идеи пока чаще выражаются через онтологическое проектирование, обзор графов знаний для промышленности и машинопонимаемые технические документы, чем через полноценные мультимодальные конвейеры [13-15, 19-20].

Для задач АСУ ТП гибридный конвейер важен по двум причинам. Во-первых, именно он позволяет объединить проектные и эксплуатационные данные в единой модели. Во-вторых, только такой подход способен преодолеть разрыв между семантическим и процессно-событийным слоями представления. При этом практическая проблема смещается с вопроса о том, какой один метод лучше, к вопросу о том, как автоматизировать наполнение и актуализацию многослойной графовой модели без потери контролируемости результата.

3. Сравнительный анализ подходов

Существующие подходы к формированию графовых моделей различаются не только по алгоритмической основе, но и по типу используемых источников данных, степени автоматизации и роли в общей архитектуре графовой модели. Для систематизации этих различий в табл. 1 приведена их сводная классификация.

Таблица 1. Классификация подходов формирования графовых моделей систем автоматизации

Класс подхода и источники	Что формируется	Входные данные	Основные методы	Роль в АСУ ТП
Подходы, основанные на правилах и онтологиях [2, 4, 5, 14, 15]	онтологии, семантические графы, графы знаний	стандарты, справочники, экспертные описания	онтологическое проектирование, правила, моделирование по схеме	формирует интерпретируемое онтологическое ядро
Методы обработки естественного языка, извлечения информации и LLM [7, 8, 19, 20]	сущности, отношения, триплеты знаний	технические тексты, регламенты, отчеты	распознавание сущностей, извлечение отношений, анализ с использованием LLM	ускоряет наполнение графа знаниями из текстов
Построение и пополнение графов знаний [3, 6, 12, 20]	доменные графы знаний и их пополнение	тексты, таблицы, справочники, базы знаний	построение графа, пополнение графа, логический вывод	интегрирует разнородные знания в едином слое
Процессные, событийные и зависимостные графы [10, 11, 16]	процессные и событийные представления	журналы событий, данные датчиков, трассы	интеллектуальный анализ процессов, аннотирование журналов	отражает фактическое поведение системы
Мультимодальные и гибридные конвейеры [5, 8, 12, 15, 17-18, 21]	многослойная графовая модель	документы, таблицы, изображения, логи, телеметрия	мультимодальное объединение, интеграция слоев	объединяет проектные и эксплуатационные данные в общей модели

Сопоставление работ, наиболее близких к тематике исследования, показывает, что подходы, ориентированные на анализ документов, журналов событий и онтологическое моделирование, по отдельности решают лишь часть задачи. Результаты такого сопоставления представлены в таблице 2. Это особенно заметно по уровню автоматизации. Подходы, ориентированные на анализ документов, лучше справляются с извлечением сущностей и отношений из текстов, но требуют тщательной верификации результата. Методы, опирающиеся на журналы событий и эксплуатационные данные, хорошо отражают фактическое поведение системы, но недостаточно полно представляют предметную семантику. Онтологические решения обеспечивают контролируемую схему модели, но плохо масштабируются без средств автоматического наполнения.

Рассмотренные группы методов можно представить в виде общей схемы, отражающей переход от частных способов построения графов к многослойным интегрированным решениям. Эта схема представлена на рис. 1.

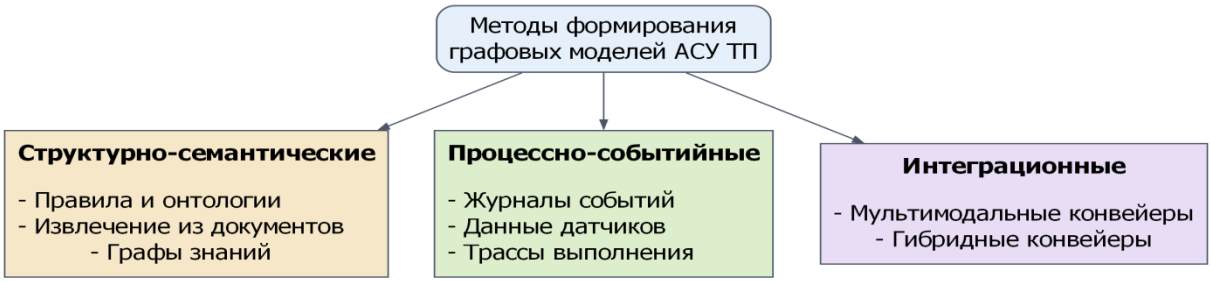


Рис. 1. Классификация методов формирования графовых моделей АСУТП

Таблица 2. Сопоставление представительных исследований по возможностям и ограничениям

Работа	Входные данные	Сильная сторона	Ограничение	Практическая ценность для АСУ ТП
Process-aware IIoT Knowledge Graph [5]	потоки данных датчиков, производственные действия, контекст процесса	связывает процессный и семантический слои в промышленной среде	высокая зависимость от качества онтологического проектирования	высока для интеграции IIoT и производственного контекста
OmEGa [7]	технические документы, изображения, таблицы	сильное решение для построения графа по документации с опорой на онтологию и LLM	требуется доменная адаптация и верификация извлечения	высока для работы с документацией и регламентами
Multimodal industrial O&M KG [8]	тексты, изображения, данные технического обслуживания	показывает возможности мультимодального построения промышленного графа знаний	высокая архитектурная сложность, вопросы переносимости и объяснимости	очень высока как ориентир для гибридных решений
Ontology-guided KG for blast furnace process [12]	знания о механизмах процесса, экспертные знания, технологические данные	связывает граф с задачами диагностики, прогнозирования и управления	модель ориентирована на конкретную установку и слабо переносима	очень высока для непрерывных технологических производств
Интеллектуальный анализ процессов в производстве [10, 11]	журналы событий, трассы выполнения, технологические данные	хорошо отражает реальное поведение системы	ограниченная семантическая глубина	высока для процессно-событийного слоя, но недостаточна как единственная модель
SMART-стандарты и семантическому аннотированию [19, 20]	стандарты, таблицы, технические документы	формируют сильную линию построения графов на русском инженерном материале	слабо связаны с телеметрией и журналами событий	высока для локального контекста и инженерной документации

Process-aware IIoT Knowledge Graph – процессно-ориентированный граф знаний промышленного интернета вещей;
OmEGa – онтологическая среда извлечения информации для построения предметно-ориентированного графа знаний по производственной документации;
Multimodal industrial O&MKG – мультимодальный промышленный граф знаний для эксплуатации и обслуживания оборудования;
Ontology-guided KG for blastfurnace process – онтологически управляемый граф знаний для процесса доменной плавки.

4. Ограничения существующих подходов к формированию графовых моделей АСУТП

Анализ рассмотренных исследований показывает, что ни один класс методов в отдельности не решает задачу формирования графовой модели системы автоматизации во всей ее полноте. Во-первых, в литературе практически отсутствует единый конвейер, одинаково уверенно работающий с текстами, таблицами, технологическими схемами, конфигурациями PLC/SCADA, журналами событий и телеметрией. Даже наиболее сильные современные работы обычно ограничиваются двумя-тремя типами исходных данных [5, 8, 12, 18, 21].

Во-вторых, разработка онтологий по-прежнему остается узким местом. Даже если граф строится с помощью современных алгоритмов извлечения, схема предметной области, словарь типов сущностей, правила нормализации и контроль ограничений часто остаются ручной работой эксперта [4, 14-15]. Именно поэтому в практическом плане главный барьер сегодня состоит не столько в нехватке методов представления графа, сколько в недостаточной автоматизации его наполнения и актуализации.

В-третьих, подходы, ориентированные на анализ документов и журналов событий, пока слабо интегрированы между собой. Работы по интеллектуальному анализу процессов и построению процессно-событийных графов хорошо отражают реальную динамику системы, но редко соединяются с графами знаний, несущими инженерную семантику. В результате одна группа моделей описывает поведение системы, а другая — ее предметный смысл, и литература пока не предлагает достаточно разработанного универсального механизма их объединения [10-11, 16].

В-четвертых, использование LLM для извлечения знаний заметно расширяет возможности построения графов на основе технической документации, но одновременно усиливает требования к верификации результата. Для инженерной области недостаточно получить правдоподобную структуру связей; необходимо показать, что каждая извлеченная сущность, тип связи и атрибут могут быть проверены по исходному документу или согласованы с предметной схемой. Без такого контура доверия LLM-компонент остается полезным средством ускорения работы, но не может рассматриваться как автономный механизм построения графа [7-9, 19].

Наконец, следует отметить ограниченное количество тестовых сценариев именно для АСУ ТП. Существуют работы, посвященные производству, техническому обслуживанию, промышленной безопасности, планированию процессов и цифровым двойникам, однако почти отсутствует общепринятый набор задач, на котором можно было бы объективно сравнивать качество конвейеров построения графов для систем автоматизации как сложных инженерных объектов. Это затрудняет сопоставление решений и скрывает проблему их переносимости между предприятиями и предметными областями.

5. Гибридный подход к формированию графовых моделей АСУТП

С учетом проведенного анализа наиболее обоснованным представляется гибридный мультимодальный конвейер формирования графовой модели, а не выбор одного “лучшего” класса методов. Такой конвейер должен объединять четыре функциональных слоя.

Первый слой представляет собой онтологическое ядро предметной области. Он определяет типы сущностей, базовые отношения, ограничения, словарь терминов и минимальные правила согласования. Этот слой не должен наполняться вручную целиком, но именно он обеспечивает инженерную интерпретируемость модели и делает возможной ее последующую проверку [4, 14-15].

Второй слой предназначен для извлечения сущностей и отношений из технической документации, стандартов, таблиц, описаний алгоритмов и эксплуатационных текстов. Здесь оправдано использование гибридного сочетания методов обработки естественного языка, извлечения информации и LLM, но не как “черного ящика”, а как инструмента, работающего под контролем онтологического ядра и с обязательной трассировкой к исходным документам [7-8, 19-20].

Третий слой строится на основе журналов событий, телеметрии, данных датчиков и трасс выполнения. Его задача состоит в том, чтобы отразить фактическое поведение системы и связать проектное описание объекта с реальной динамикой эксплуатации. Без этого графовая модель остается проектной, но не отражает текущее функционирование системы [10-11, 16].

Четвертый слой объединяет результаты предыдущих уровней, разрешает противоречия, связывает сущности между источниками, отслеживает происхождение данных и поддерживает актуализацию модели. Именно здесь должен быть сосредоточен основной алгоритмический прогресс ближайших лет, поскольку без такого слоя невозможно решить главную практическую проблему: как автоматизировать пополнение и обновление графовой модели при сохранении ее инженерной достоверности [9, 12, 18, 21].

Предлагаемая логика такого конвейера показана на рис. 2.

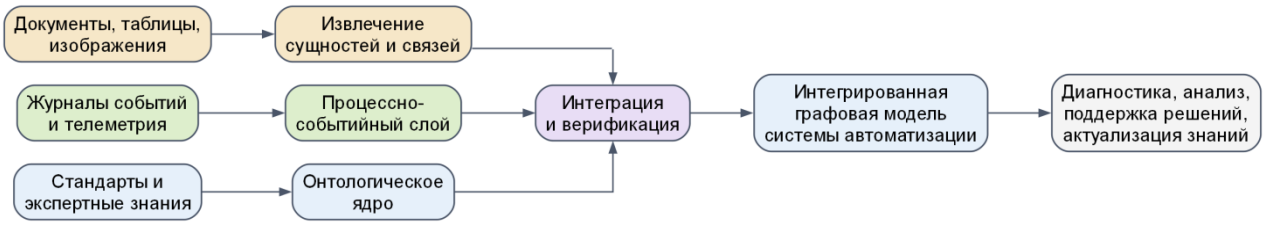


Рис. 2. Схема формирования графовых моделей АСУТП на основе гибридного подхода

Важно подчеркнуть, что в такой схеме ключевым объектом исследования становится не просто граф как структура данных, а механизм автоматизированного и верифицируемого формирования графовой модели на основе разнородных инженерных источников. Именно такая постановка позволяет совместить преимущества гибридного мультимодального подхода с акцентом на автоматизацию наполнения и актуализации графа.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что современное состояние исследований в области формирования графовых моделей систем автоматизации на основе методов искусственного интеллекта характеризуется высокой фрагментацией. Подходы, основанные на правилах и онтологиях, обеспечивают интерпретируемость и семантическую согласованность, но плохо масштабируются без автоматизации. Методы обработки естественного языка, извлечения информации и LLM ускоряют извлечение знаний из технической документации, но требуют жесткого контура верификации. Процессно-событийные подходы обеспечивают связь с реальным поведением системы, однако недостаточно богаты с точки зрения предметной семантики. Мультимодальные и гибридные конвейеры пока остаются наиболее перспективным, но и наиболее сложным направлением.

Для задач АСУ ТП наибольшим потенциалом обладает гибридный подход, в котором онтологическое ядро предметной области, извлечение знаний из документации, процессно-событийное представление и мультимодальная интеграция рассматриваются как части единого конвейера. При этом основным практическим вызовом следует считать не только выбор формата графового представления, но и автоматизацию его наполнения, актуализации и верификации на базе разнородных инженерных источников.

Таким образом, перспективное направление дальнейших исследований связано с разработкой гибридного мультимодального конвейера формирования графовой модели системы автоматизации, который будет сочетать интерпретируемость онтологического ядра, скорость извлечения знаний из документации и поведенческую информативность процессно-событийного слоя. Именно такая постановка позволяет перейти от разрозненных графовых представлений к целостной модели, пригодной для диагностики, аналитики, поддержки принятия решений и развития цифровых двойников в промышленной автоматизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Китов, А.А. Структурное моделирование магистрального трубопроводного транспорта в задачах АСУ ТП: оптимизация расчетных задач для программируемого логического контроллера / А.А. Китов, В.К. Тян / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2015. – Т. 23, № 4. – С. 18-26. – URL: https://journals.eco-vector.com/1991-8542/article/view/20106 (дата обращения: 09.04.2026).

2) Ahmadi Seyedamir, A. An ISA-95 based ontology for manufacturing systems knowledge description extended with semantic rules / A. Ahmadi Seyedamir, B.R. Ferrer, J.L. Martinez Lastra // 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – URL: https://researchportal.tuni.fi/en/publications/an-isa-95-based-ontology-for-manufacturing-systems-knowledge-desc (дата обращения: 09.04.2026).

3) Knowledge Graphs / A.Hogan [et al.] // ACM Computing Surveys. – 2022. – Vol. 54, № 4. – P. 1-37. – DOI: 10.1145/3447772.

4) Yahya, M. Semantic Web and Knowledge Graphs for Industry 4.0 / M. Yahya, J.G. Breslin, M.I. Ali // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, № 11. – P. 5110. – DOI: 10.3390/app11115110.

5) Process-aware IIoT Knowledge Graph: A semantic model for Industrial IoT integration and analytics / C. Diamantini, A. Mircoli, D. Potena, E. Storti // Future Generation Computer Systems. – 2023. – Vol. 139. – P. 224-238. – DOI: 10.1016/j.future.2022.10.003.

6) Knowledge graph-based manufacturing process planning: A state-of-the-art review / Y. Xiao, S. Zheng, J. Shi, X. Du, J. Hong // Journal of Manufacturing Systems. – 2023. – Vol. 70. – P. 417-435. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.08.006.

7) OmEGa: Ontology-based information extraction framework for constructing task-centric knowledge graph from manufacturing documents with large language model / M. Shim, H. Choi, H. Koo, K. Um, K.-H. Lee, S. Lee // Advanced Engineering Informatics. – 2025. – Vol. 64. – P. 103001. – DOI: 10.1016/j.aei.2024.103001.

8) A knowledge graphs construction method enhanced by multimodal large language model for industrial equipment operation and maintenance / Z. Zhang, J. Yu, B. Yang, K. Du, S. Wang, X. Qi // Advanced Engineering Informatics. – 2025. – Vol. 68. – P. 103705. – DOI: 10.1016/j.aei.2025.103705.

9) Unifying Large Language Models and Knowledge Graphs: A Roadmap / S. Pan, L. Luo, Y. Wang, C. Chen, J. Wang, X. Wu // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2024. – Т. 36, Vol, № 7. – P. 3580-3599. – DOI: 10.1109/TKDE.2024.3352100.

10) Yurtay, Y. Process Mining in Manufacturing: A Literature Review // Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 5, № 3. – P. 341-355. – DOI: 10.35377/saucis.05.03.1134293.

11) Rebmann, A. Enabling semantics-aware process mining through the automatic annotation of event logs / A. Rebmann, H. van der Aa // Information Systems. – 2022. – Vol. 110. – P. 102111. – DOI: 10.1016/j.is.2022.102111.

12) Ontology guided multi-level knowledge graph construction and its applications in blast furnace ironmaking process / X. Huang, C. Yang, Y. Zhang, S. Lou, L. Kong, H. Zhou // Advanced Engineering Informatics. – 2024. – Vol. 62. – P. 102927. – DOI: 10.1016/j.aei.2024.102927.

13) Апанович, З.В. Современные промышленные приложения графов знаний // Системная информатика. – 2025. – URL: https://www.system-informatics.ru/article/418 (дата обращения: 09.04.2026).

14) Шишенков, М.А. Подходы к автоматизации работ с онтологическими ресурсами // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 256-269. – DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-2-256-269.

15) Фомин, И.Н. Онтологии в проектировании индустриальных цифровых платформ // Онтология проектирования. – 2025. – Т. 15, № 4. – С. 535-551. – DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-535-551.

16) Брейман, А.Д. Многомерное хранение журналов событий для извлечения и анализа процессов / А.Д. Брейман, Е.М. Богословский // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/mnogomernoe-hranenie-zhurnalov-sobytiy-dlya-izvlecheniya-i-analiza-protsessov (дата обращения: 09.04.2026).

17) Ontologies in digital twins: A systematic literature review / E. Karabulut, S.F. Pileggi, P. Groth, V. Degeler // Future Generation Computer Systems. – 2024. – Vol. 153. – P. 442-456. – DOI: 10.1016/j.future.2023.12.013.

18) Knowledge Graphs in the Digital Twin: A systematic literature review about the combination of semantic technologies and simulation in industrial automation / F.G. Listl, D. Dittler, G. Hildebrandt, V. Stegmaier, N. Jazdi, M. Weyrich // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 187828-187843. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3514923.

19) Шалфеева, Е.А. Вопросы создания машинопонимаемых SMART-стандартов на основе графов знаний / Е.А. Шалфеева, В.В. Грибова // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 969-988. – DOI: 10.15622/ia.23.4.2.

20) Дородных, Н.О. Разработка предметных графов знаний на основе семантического аннотирования табличных данных / Н.О. Дородных, А.Ю. Юрин // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 555-568. – DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-555-568.

21) Digital Twin Meets Knowledge Graph for Intelligent Manufacturing Processes / G. Stavropoulou, K.Tsitseklis, L. Mavraidi, K.-I. Chang, A. Zafeiropoulos, V. Karyotis, S. Papavassiliou // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 8. – P. 2618. – DOI: 10.3390/s24082618.

УДК 004.8:004.932

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ YOLOV8X ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

И.А. Евдокимов

Научный руководитель – **Ю.М. Горовой,** канд. тех. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Предложен подход к обнаружению малоразмерных дронов на основе архитектуры YOLOv8x. Проведена адаптация модели с использованием предобработки изображений, аугментации данных и обучения на специализированном датасете. Достигнуты высокие показатели качества: точность – 0,857, полнота – 0,889, средняя точность – 0,906. Разработано веб-приложение для обработки изображений, видео и видеопотока в реальном времени. Результаты подтверждают эффективность предложенного метода для задач мониторинга воздушного пространства.

Ключевые слова: *компьютерное зрение, обнаружение объектов, YOLOv8x, беспилотные летательные аппараты, малые объекты, глубокое обучение, сверточные нейронные сети, Gradio*

APPLICATION OF THE YOLOV8X MODEL FOR THE DETECTION OF SMALL-SIZED UNMANNED AERIAL VEHICLES

I.A. Evdokimov

Scientific Supervisor – **Y.M. Gorovoi,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

A method for small-sized drone detection based on the YOLOv8x architecture is proposed. The model was adapted using image preprocessing, data augmentation, and training on a specialized dataset. High performance was achieved: precision – 0.857, recall – 0.889, and mean average precision – 0.906. A web application was developed for processing images, videos, and real-time video streams. The results confirm the effectiveness of the proposed approach for airspace monitoring tasks.

Keywords: *computer vision, object detection, YOLOv8x, unmanned aerial vehicles, small objects, deep learning, convolutional neural networks, Gradio*

Введение

Беспилотные летательные аппараты малого класса стали неотъемлемой частью современного технологического ландшафта, находя применение в промышленности при мониторинге нефтегазовой инфраструктуры, сельском хозяйстве для оценки посевов, в логистике при доставке грузов, а также активно используются частными лицами в рекреационных целях. Однако стремительный рост числа дронов и их доступность привели к появлению новых угроз, включая нарушение частной жизни, шпионаж, доставку запрещенных предметов, создание помех работе аэропортов и даже террористические атаки на критически важные объекты.

Особую сложность представляют беспилотные летательные аппараты малого класса, которые характеризуются низкой радиолокационной заметностью и способны незаметно преодолевать системы охраны периметра. Традиционные методы обнаружения демонстрируют ограниченную эффективность: радиолокационные станции плохо распознают объекты с малой эффективной поверхностью рассеяния, акустические системы теряют работоспособность в условиях городского шума и ветра, а радиочастотные сканеры становятся бесполезны при использовании дронами зашифрованных каналов связи или полностью без передачи данных.

В этих условиях особую значимость приобретают оптические методы обнаружения, основанные на анализе видеопотока. Однако автоматическое распознавание дронов в кадре сопряжено с рядом трудностей: малый размер объекта, часто составляющий менее 32×32 пикселей, разнообразие ракурсов, изменчивость освещения, а также сходство с птицами и другими летающими объектами. Детекция малых объектов остается одной из наиболее сложных задач компьютерного зрения, что обусловлено ограниченной информативностью таких объектов, потерей информации в процессе сверточных преобразований и наличием фонового шума.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальная оценка эффективности применения модели YOLOv8x для обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов в условиях, приближенных к реальным. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: анализ современных методов детекции объектов и обоснование выбора архитектуры YOLOv8x, сбор и подготовка данных для обучения включая предобработку и аугментацию, обучение модели и оценка ее качества по метрикам точности, полноты и средней точности, а также разработка пользовательского интерфейса для практического применения модели.

Научная новизна работы заключается в комплексной адаптации архитектуры YOLOv8x к задаче обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, включающей подбор оптимальных гиперпараметров обучения, применение специализированных методов аугментации, учитывающих особенности малых объектов, и экспериментальное подтверждение достижимости средней точности при пороге IoU = 0,5 выше 0,9 на открытом датасете.

1. Обзор методов детекции объектов и постановка задачи

Современные методы детекции объектов принято разделять на две крупные категории: двухэтапные и одноэтапные. Двухэтапные детекторы, к которым относятся R-CNN, FastR-CNN и FasterR-CNN, сначала генерируют области интереса, а затем классифицируют каждую область. Эти методы обеспечивают высокую точность, но имеют ограниченную производительность, составляющую 5-7 кадров в секунду, что делает их малопригодными для задач реального времени. Одноэтапные детекторы, включая YOLO, SSD и RetinaNet, предсказывают координаты ограничивающих рамок и классы объектов за один проход по изображению.

Семейство моделей YOLO (You Only Look Once) занимает лидирующие позиции в области детекции объектов благодаря оптимальному балансу скорости и точности. Эволюция этих моделей демонстрирует устойчивый прогресс: от первой версии YOLOv1, предложившей концепцию однократной детекции в 2015 году и обеспечившей точность около 40% при скорости 45 кадров в секунду, до современных версий. Значительным шагом вперед стала версия YOLOv3, внедрившая многомасштабное обнаружение, что повысило устойчивость к объектам различных размеров. Версия YOLOv4 привнесла архитектурные решения PANet и CSPNet, оптимизированные для работы на современных графических процессорах. YOLOv5, несмотря на то что разрабатывалась независимо от основного семейства, завоевала популярность благодаря простоте использования и высокой скорости обработки, что способствовало её широкому внедрению в прикладных задачах. Последующие версии YOLOv6 и YOLOv7 продолжили совершенствование архитектуры, а вышедшая в 2023 году YOLOv8 демонстрирует еще более высокие показатели точности при сохранении высокой скорости обработки.

Семейство YOLOv8, разработанное компанией Ultralytics, включает несколько подверсий, различающихся размеров и производительностью: YOLOv8n (nano), YOLOv8s (small), YOLOv8m (medium), YOLOv8l (large) и YOLOv8x (xlarge). Выбор наиболее мощной версии YOLOv8x для задачи обнаружения малых беспилотных летательных аппаратов обусловлен несколькими факторами. Увеличенная глубина сети, составляющая 209 слоев и содержащая 68,1 миллиона параметров, позволяет извлекать более сложные признаки, что критично для распознавания малоразмерных объектов. Использование механизмов

пространственного пирамидального пулинга (SPPF) обеспечивает адаптацию к различным масштабам, а возможность тонкой настройки на специализированном датасете позволяет сохранить обобщающую способность модели при ее адаптации к конкретной задаче.

2. Методы и материалы

Для обучения и тестирования модели использован открытый датасет «Drone Object Detection», доступный на платформе Kaggle. Данный набор данных содержит около 3000 изображений, собранных в разнообразных условиях съемки, включая различные времена суток, погодные условия и ракурсы. Изображения представлены в формате JPEG с разрешением от 640×480 до 1920×1080 пикселей. Аннотации выполнены в формате YOLO, представляющем собой текстовые файлы с нормализованными координатами ограничивающих рамок для каждого класса «дрон». Особую ценность датасету придает разнообразие фонов, включающих небо, облака, деревья, городские постройки, а также наличие изображений, полученных как при хорошем освещении, так и в сумерках, что позволяет получать модели, устойчивые к реальным условиям эксплуатации.

Предобработка изображений является критическим этапом подготовки данных для обучения нейросетевых моделей. В работе реализован следующий конвейер предобработки. На данном этапе все изображения приводятся к единому размеру 640×640 пикселей с сохранением пропорций путем добавления серых полос, что позволяет избежать геометрических искажений объектов. Выбор данного размера обусловлен необходимостью достижения баланса между детализацией малых объектов и вычислительной эффективностью. На втором этапе выполняется нормализация значений пикселей путем деления на 255, что приводит их к диапазону [0,1] и способствует стабильности градиентов в процессе обучения, ускоряя сходимость модели.

Для повышения обобщающей способности модели и предотвращения переобучения применялись методы аугментации данных с использованием библиотеки Albumentations. Применялись следующие преобразования: случайное изменение яркости и контрастности, повороты в пределах ±15 градусов, горизонтальное отражение, добавление гауссовского шума и размытие по Гауссу. Аугментация применялась выборочно к 10% изображений, что позволило избежать избыточной модификации данных при сохранении разнообразия обучающей выборки. Важно отметить, что все преобразования изображений сопровождались синхронным преобразованием аннотации для сохранения согласованности между визуальными данными и разметкой. Заключительным этапом предобработки стало формирование батчей размером 16, что является оптимальным значением для баланса между требованиями к видеопамяти и качеством градиента.

Архитектура модели YOLOv8x представляет собой глубокую сверточную нейронную сеть, состоящую из 209 слоев и содержащую 68 153 571 обучаемых параметра. Ключевыми компонентами архитектуры являются backbone, neck и head. Backbone отвечает за извлечение признаков и включает последовательность сверточных слоев с возрастающим числом каналов, где первые слои принимают входные данные в формате RGB (три цветовых канала) и выполняют свёртку, уменьшающую пространственное разрешение и увеличивающую количество каналов. Neck представляет собой часть сети, отвечающую за агрегацию признаков с разных масштабов, и использует структуру Feature Pyramid Network с дополнительными связями для улучшения детекции малых объектов. Head – выходные слои, предсказывающие координаты ограничивающих рамок и вероятности классов. В YOLOv8x используется разделенная голова, где задачи классификации и регрессии обрабатываются разными ветвями, что повышает точность предсказаний. Модуль пространственного пирамидального пулинга позволяет модели динамически адаптироваться к различным масштабам объектов, что имеет критическое значение для задач детекции, где объекты могут значительно различаться по размеру.

Обучение модели проводилось в среде Google Colab с использованием графического процессора NVIDIAA100. В качестве оптимизатора применялся AdamW, который определяет регуляризацию весов от обновления адаптивной скорости обучения, сочетая

преимущества алгоритма Adam с корректной L2-регуляризацией. Базовая скорость обучения была установлена равной 0,01, параметр снижения веса – 0,05. Применялась стратегия циклического затухания скорости обучения с коэффициентом 0,1, после каждых 15 эпох. Размер батча составил 16, количество эпох обучения – 50. Функция потерьпредставляла собой комбинацию потерь локализации, классификации и распределения (Distribution Focal Loss), что позволило улучшить оценку формы и размеров объектов. Критически важным аспектом стало применение трансферного обучения: начальная инициализация весов выполнялась предобученной на большом датасете COCO моделью YOLOv8x. Мониторинг процесса обучения осуществлялся по комплексу метрик, включающему потери локализации, потери классификации, потери распределения, точность, полноту, а также среднюю точность при пороге IoU=0,5 и среднюю точность при порогах IoU от 0,5 до 0,95. Валидация проводилась на отдельном наборе данных с частотой один раз в две эпохи, что позволило своевременно обнаруживать потенциальные проблемы переобучения.

3. Результаты и обсуждение

Динамика функции потерь в процессе обучения демонстрирует устойчивое снижение всех компонентов – потери локализации, классификации и распределения, что свидетельствует о корректной настройке процесса оптимизации рис. 1.

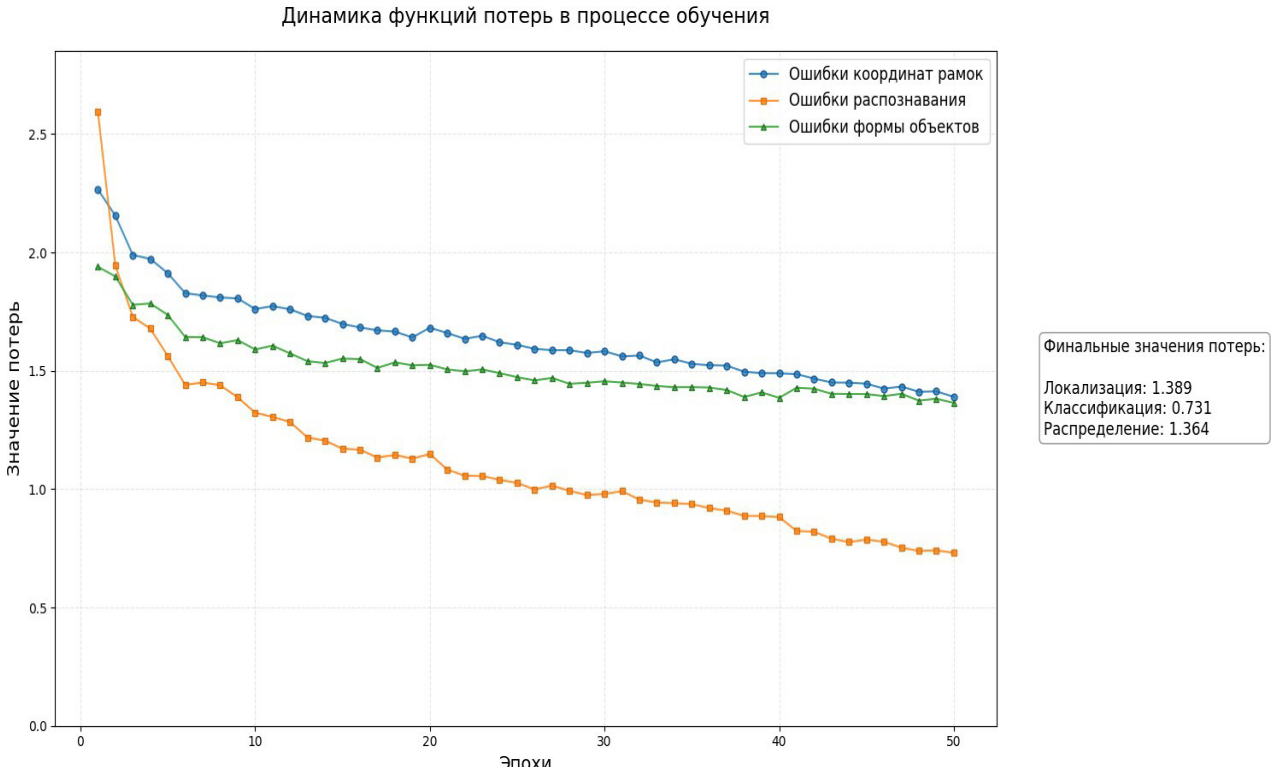


Рис. 1. Динамика функции потерь в процессе обучения модели YOLOv8x

Особенно заметно быстрое уменьшение потерь в первые 10 эпох, после чего кривые постепенно стабилизируются, что типично для процесса обучения нейронных сетей и указывает на достижение сходимости.

Итоговые метрики качества модели после 50 эпох обучения составили: точность – 0,857, полнота – 0,889, средняя точность при пороге IoU = 0,5–0,906. Достигнутое значение средней точности 0,906 означает, что при пороге пересечения 0,5 модель правильно обнаруживает и классифицирует более 90% объектов, что является высоким показателем, особенно учитывая сложность задачи детекции малых объектов.

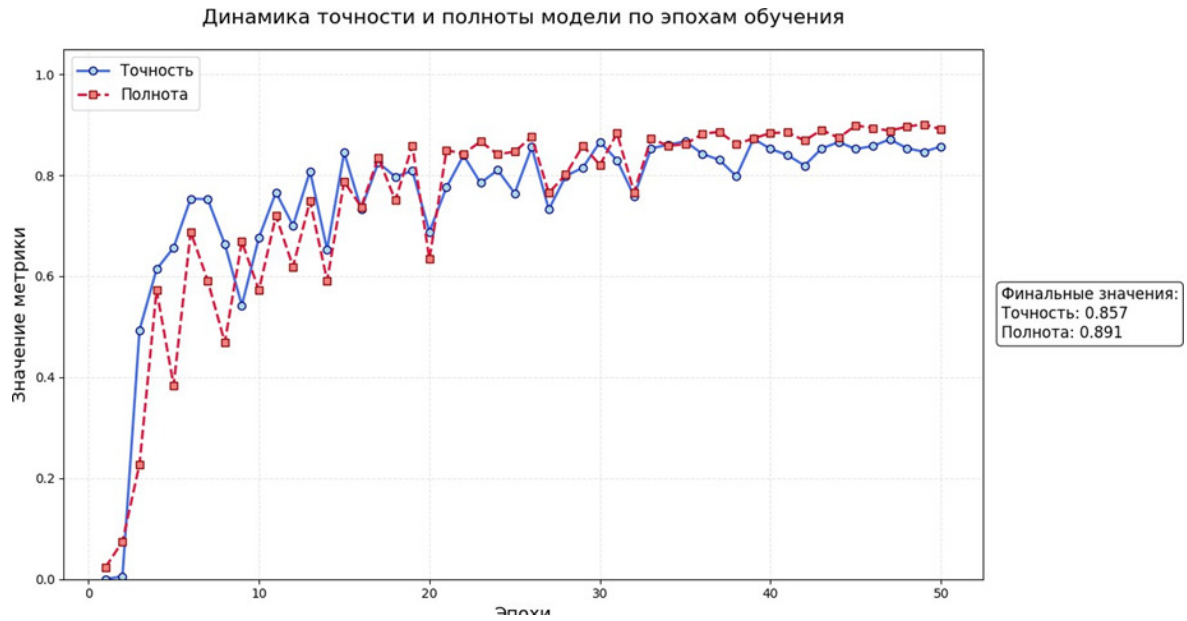


Рис. 2. Изменение точности (precision) и полноты (recall) модели YOLOv8x в процессе обучения

Как видно из рис. 2, обе метрики – точность и полнота – достигают приемлемых значений уже к 20-й эпохе и стабилизируются на высоком уровне, что свидетельствует о хорошем балансе между ошибками первого и второго рода: модель не только находит большинство объектов, но и редко ошибается, принимая фон за дрон.

Особый интерес представляет анализ способности модели обнаруживать объекты малого размера, составляющего менее 32×32 пикселей. Качественный анализ результатов показывает, что модель успешно справляется с детекцией дронов в сложных условиях. При наличии объектов на дальнем плане дроны размером 20×20 пикселей уверенно обнаруживаются при контрастном фоне. В случаях частичной окклюзии, когда дрон перекрывается ветвями деревьев или другими объектами, модель сохраняет работоспособность, если видимая часть составляет не менее 60%. На сложных фонах, включающих облака и небо, ложные срабатывания редки благодаря качественной аугментации в процессе обучения. Модель одинаково хорошо распознает дроны в различных ракурсах – в профиль, анфас и сверху, что подтверждает ее устойчивость к изменениям ориентации объектов. На рис. 3 приведён пример успешной детекции малоразмерного беспилотного летательного аппарата в сложных условиях съёмки.

Рис. 3. Пример детекции малоразмерного беспилотного летательного аппарата с использованием модели YOLOv8x

Сравнение полученных результатов с известными из литературы подходами к детекции беспилотных летательных аппаратов затруднено из-за различий в используемых датасетах. Тем не менее, достигнутый в настоящей работе результат (mAP@0.5 = 0,906) свидетельствует об эффективности выбранного подхода, основанного на применении YOLOv8x в сочетании с качественной предобработкой и аугментацией данных. Использование более мощной версии YOLOv8x позволяет повысить точность детекции за счёт увеличенной глубины сети и количества параметров.

Для практического применения разработанной модели создано веб-приложение с использованием библиотеки Gradio, значительно упрощающей процесс взаимодействия пользователей с алгоритмами машинного обучения. Интерфейс приложения организован в виде трех вкладок, обеспечивающих различные сценарии использования. Первая вкладка, предназначенная для работы с изображениями, позволяет пользователям загружать фотографии, настраивать порог уверенности для детекции с помощью интерактивного ползунка и визуализировать результаты анализа с отображением ограничивающих рамок вокруг обнаруженных объектов. Вторая вкладка, предлагает аналогичный функционал для обработки видеофайлов, обеспечивая покадровую обработку с возможностью скачать обработанное видео и связанные с ним аннотации в формате YOLO для дальнейшего использования. Третья вкладка предоставляет возможность анализа видеопотока в реальном времени с веб-камеры или по URL-адресу трансляции, что особенно важно для задач оперативного мониторинга воздушного пространства. Информационное поле статуса трансляции обеспечивает обратную связь в ходе операции при работе с потоковыми данными.

Обработка видео в приложении реализована с использованием библиотеки OpenCV, которая эффективно управляет видеопотоком, управляет преобразования цветовых пространств и сохранение выходных файлов. Применение контейнеров временных файлов позволяет избегать постоянного хранения ненужных данных на диске, оптимизируя использование ресурсов во время обработки медиафайлов. Отчеты формируются на основе количества распознанных объектов и характеристик модели, предоставляя пользователю полное представление о работе системы.

Заключение

В настоящей работе представлен подход к обнаружению малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе архитектуры YOLOv8x. Показано, что применение наиболее мощной версии YOLOv8x, содержащей 68 миллионов параметров, 209 слоев, в сочетании с трансферным обучением позволяет достичь высокого качества детекции малых объектов. Разработан конвейер предобработки данных, включающий приведение к единому размеру 640×640 пикселей, нормализацию и аугментацию с использованием библиотеки Albumentations, что обеспечивает повышение обобщающей способности модели и ее устойчивость к различным условиям съемки.

В результате эксперимента на датасете "Drone Object Detection», содержащем около 3000 изображений, получены следующие показатели: точность – 0,857, полнота – 0,889, средняя точность при пороге IoU = 0,5 – 0,906. Достигнутый результат подтверждает эффективность предложенного подхода. Экспериментально подтверждена устойчивость модели к сложным условиям съемки, включая частичную окклюзию, изменение освещения, разнообразные фоны и малый размер объектов вплоть до 20×20 пикселей.

Созданное веб-приложение на базе Gradio с интуитивно понятным интерфейсом обеспечивает загрузку изображений, видеофайлов и обработку видеопотока в реальном времени, что позволяет использовать разработанную систему для практических задач мониторинга воздушного пространства. Приложение может быть развернуто как локально, так и в облачной среде, обеспечивая гибкость использования для различных категорий пользователей, включая государственные организации, ответственные за безопасность, и коммерческие компании, эксплуатирующие критически важные объекты инфраструктуры.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем защиты аэропортов, промышленных предприятий, государственных учреждений и других объектов от угроз, связанных с несанкционированным использованием беспилотных летательных аппаратов малого класса. Направлениями дальнейших исследований могут стать интерпретация разработанной модели с системами радиочастотного и акустического обнаружения для создания мультимодальных решений, оптимизация модели для встраиваемых систем с использованием TensorRT, а также расширение датасета за счет синтезированных изображений и видеоряда с разных типов дронов для повышения универсальности системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Girshick, R. Fast R-CNN // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2015. – P. 1440–1448.

2) Focal Loss for Dense Object Detection / T.-Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, P. Dollár // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2020. – Vol. 42, no. 2. – P. 318–327.

3) Drone Object Detection Dataset // Kaggle: [site]. – URL: https://www.kaggle.com/datasets/dasmehdixtr/drone-object-detection-dataset (дата обращения: 20.10.2025).

4) Albumentations Documentation: site. – URL: https://albumentations.ai/docs/ (дата обращения: 17.11.2026).

5) Gradio Documentation: site. – URL: https://gradio.app/ (дата обращения: 9.12.2026).

6) You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // arXiv. – 2015. – 1506.02640. – URL: https://arxiv.org/abs/1506.02640 (дата обращения: 6.01.2026).

7) Bochkovskiy, A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection / A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, H.-Y.M. Liao // arXiv. – 2020. – 2004.10934. – URL: https://arxiv.org/abs/2004.10934 (дата обращения: 17.02.2026).

8) Ultralytics YOLOv8 Documentation / G. Jocher, A. Chaurasia, A. Stoken [et al.] // Ultralytics: [site]. – 2023. – URL: https://docs.ultralytics.com/ (дата обращения: 10.03.2026).

9) Feature Pyramid Networks for Object Detection / T.-Y. Lin, P. Dollár, R. Girshick, K. He, B. Hariharan, S. Belongie // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 2117–2125.

10) Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2020. – Vol. 42, no. 2. – P. 386–397.

УДК 004.94

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ФОРМУ И СТАТИСТИКУ ПЯТЕН

С.Д. Ерофеев, А.Б. Раухваргер

Научный руководитель – **А.Б. Раухваргер,** канд. физ.-мат. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена моделированию роста пятен на двумерном поле с использованием генераторов случайных чисел. Рассматривается алгоритм последовательного добавления точек с проверкой соседства по восьми направлениям. Исследуется влияние типа распределения и параметра sigma на форму кластера и статистику заполнения. Приводятся численные значения коэффициента компактности и скорости роста для равномерного и нормального распределений. Результаты могут быть применены в компьютерной графике и материаловедении.

Ключевые слова: *генератор случайных чисел, равномерное распределение, нормальное распределение, кластер, пятно, метод Бокса – Мюллера*

INFLUENCE OF RANDOM NUMBER GENERATOR PARAMETERS ON THE SHAPE AND STATISTICS OF SPOTS

S.D. Erofeev, A.B. Raukhvarger

Supervisor – **A.B. Raukhvarger,** Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article is devoted to modeling the growth of spots on a two-dimensional field using random number generators. An algorithm for sequential addition of points with checking neighborhood in eight directions is considered. The influence of the distribution type and the sigma parameter on the cluster shape and filling statistics is investigated. Numerical values of the compactness coefficient and growth rate for uniform and normal distributions are presented. The results can be applied in computer graphics and materials science.

Keywords*: random number generator, uniform distribution, normal distribution, cluster, spot, Box–Muller method*

Моделирование роста кластеров на плоскости является актуальной задачей в компьютерной графике, материаловедении и биологии [1, 2]. Во многих моделях новая точка может присоединиться только к уже существующей структуре, а порядок добавления точек определяется генератором случайных чисел [3]. При этом выбор параметров генератора существенно влияет на визуальные и статистические характеристики итогового кластера [4].

Цель данной работы – исследовать, как тип распределения (равномерное или нормальное) и параметр σнормального распределения влияют на форму пятна и статистику заполнения поля размером 500×500 пикселей. В отличие от классических моделей случайных блужданий, в данной работе используется алгоритм случайного выбора точек по всему полю с обязательной проверкой соседства [5].

Моделирование выполняется на квадратном поле размером 500×500 пикселей [6]. Первая точка ставится случайно. Далее многократно генерируются случайные координаты (x, y) в пределах поля. Точка добавляется, если она ещё не поставлена и граничит с любой уже поставленной точкой по одному из восьми направлений (вертикаль, горизонталь, диагонали). Процесс продолжается до полного заполнения поля. Все координаты поставленных точек записываются в порядке добавления [7].

Используется стандартный генератор C# System.Random [1]. Равномерное распределение получается прямым вызовом метода NextDouble(), возвращающего число в интервале [0, 1] [4].

Нормальное распределение моделируется методом Бокса – Мюллера [8].

Параметр σуправляет разбросом значений [9]. В экспериментах используются значения sigma = 0,1; 0,2; 0,3.

Для каждого эксперимента вычислялись:

- коэффициент компактности K = P²/(4πS), где P – периметр пятна, S – площадь (чем ближе K к 1, тем форма ближе к кругу) [6];
- количество шагов для достижения 50% и 90% заполнения поля;
- визуальная форма итогового кластера.

Каждый эксперимент повторялся трижды. Разброс результатов не превышал 3% [3].

При равномерном распределении пятно растёт неравномерно, граница получается изрезанной, с многочисленными выступами. При нормальном распределении (σ = 0,2) пятно более компактное и округлое, границы сглажены [2, 5] (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение распределений

Тип распределения	Коэффициент *K*	Шаги до 50%	Шаги до 90%
Равномерное	2,45	125 000	225 000
Нормальное (σ =0,2)	1,52	118 000	210 000

Равномерное распределение даёт более вытянутые и изрезанные формы (*K* = 2,45). Нормальное – более компактные (*K* = 1,52), что согласуется с теоретическими положениями [1, 6].

При σ = 0,1 значения координат сильно сжаты к центру, пятно почти не выходит за пределы центральной зоны. При σ = 0,3 распределение приближается к равномерному, форма пятна становится более изрезанной [9] (табл. 2).

Таблица 2. Влияние sigma (нормальное распределение)

σ	Коэффициент *K*	Радиус пятна (пикселей)
0,1	1,18	80
0,2	1,52	180
0,3	2,12	250

С ростом σ коэффициент *K* увеличивается, а форма пятна становится более изрезанной. Радиус пятна растёт пропорционально σ [9].

На начальном этапе (первые 10 000 шагов) скорость добавления точек низкая из-за малого количества соседей. В диапазоне от 50 000 до 200 000 шагов скорость максимальна. При заполнении более 90% поля скорость снова падает [3, 7].

Полученные результаты показывают, что выбор генератора случайных чисел существенно влияет на форму кластера и динамику его роста [1, 4]. Равномерное распределение даёт анизотропные структуры с неровной границей (*K* = 2,45). Нормальное распределение формирует компактные, близкие к кругу пятна (*K* = 1,52 при σ = 0,2) [2, 5].

Параметр sigma позволяет плавно регулировать размер и «компактность» кластера [9]. При sigma = 0,1 пятно почти не выходит за пределы центральной области (радиус 80 пикселей). При σ = 0,3 пятно занимает почти всё поле (радиус 250 пикселей), а его форма становится близкой к равномерному случаю [8].

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты могут использоваться при генерации текстур, моделировании колоний микроорганизмов и в учебных задачах по моделированию случайных процессов [3, 7].

Ограничением работы является использование только одного базового генератора (System.Random). В дальнейшем предполагается сравнить его с другими генераторами [1].

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты.

1. Тип распределения определяет форму кластера. Равномерное распределение даёт изрезанные структуры с коэффициентом компактности $K = 2{,}45$. Нормальное распределение ($\sigma = 0{,}2$) формирует компактные округлые пятна с $K = 1{,}52$ [1, 6].

2. Параметр sigma нормального распределения управляет размером пятна и степенью изрезанности границы. При $\sigma = 0{,}1$ радиус пятна составляет 80 пикселей, при $\sigma = 0{,}3$–250 пикселей [9].

3. Динамика роста имеет три характерных этапа: начальный медленный рост, этап максимальной скорости и замедление при заполнении поля [3, 7].

4. Количество шагов для достижения 50% заполнения поля при равномерном распределении составляет 125 000, при нормальном ($\sigma = 0{,}2$) – 118 000. Разница обусловлена более компактным ростом кластера в случае нормального распределения [3].

5. При малых значениях $\sigma(0{,}1)$ пятно остаётся в центральной зоне поля, не достигая границ. Это может быть полезно для моделирования локальных объектов без выхода за пределы области [9].

6. При $\sigma = 0{,}3$ форма пятна становится близкой к равномерному распределению ($K = 2{,}12$), что позволяет плавно переходить от компактных структур к хаотичным путём увеличения параметра σ [8, 9].

7. Для получения компактных округлых пятен рекомендуется использовать нормальное распределение с параметром $\sigma = 0{,}15$–$0{,}20$. Для хаотичных структур с неровными границами – равномерное распределение или нормальное с $\sigma > 0{,}3$ [2, 4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Кнут, Д. Искусство программирования. Том 2. Получисленные алгоритмы. – М.: Вильямс, 2018. – 832 с.

2) Бокс, Дж. Анализ временных рядов: прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М.: Мир, 1974. – 406 с.

3) Ермаков, С.М. Методы Монте-Карло и смежные вопросы. – М.: Наука, 1975. – 472 с.

4) Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing / W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. – 3rd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 1235 p.

5) Михайлов, Г.А. Моделирование случайных полей методом Монте-Карло // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1978. – Т. 18, № 5. – С. 1247–1257.

6) Stoyan, D. Stochastic Geometry and Its Applications / D. Stoyan, W.S. Kendall, J. Mecke. – 3rd ed. – Chichester: Wiley, 2013. – 560 p.

7) Gentle, J.E. Random Number Generation and Monte Carlo Methods. – 2nd ed. – New York: Springer, 2003. – 381 p.

8) Box, G.E.P. A Note on the Generation of Random Normal Deviates / G.E.P. Box, M.E. Muller // Annals of Mathematical Statistics. – 1958. – Vol. 29, no. 2. – P. 610–611.

9) Devroye, L. Non-Uniform Random Variate Generation. – New York: Springer, 1986. – 843 p.

УДК 004.8:37.012

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УЧЕБНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

М.А. Ерофеевский

Научный руководитель – **Е.И. Воеводина**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются подходы к прогнозированию академической успеваемости обучающихся с использованием методов искусственного интеллекта. Проанализированы ограничения традиционных статистических методов при работе с большими, разнородными и нелинейными образовательными данными. Рассмотрены современные методы машинного обучения, включая ансамблевые алгоритмы, нейронные сети и графовые модели. Показано, что наибольшую точность обеспечивают ансамблевые и графовые подходы при анализе образовательных данных.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, машинное обучение, прогнозирование учебных результатов, образовательная аналитика, нейронные сети, графовые модели, персонализированное обучение*

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PREDICTING ACADEMIC PERFORMANCE

M.A. Erofeevsky

Scientific Supervisor – **E.I. Voevodina**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article examines approaches to predicting students' academic performance using artificial intelligence methods. Limitations of traditional statistical approaches in handling large, heterogeneous, and nonlinear educational data are analyzed. Modern machine learning methods are considered, including ensemble algorithms, neural networks, and graph models. It is shown that ensemble and graph-based approaches provide the highest accuracy in analyzing educational data.

Keywords: *artificial intelligence, machine learning, prediction of learning outcomes, educational analytics, neural networks, graph models, personalized learning*

Образовательные организации в своей деятельности активно используют методы прогнозирования, которые выступают важным инструментом оптимизации учебного процесса. Такой анализ и оценка вероятных исходов позволяют своевременно корректировать образовательные программы и индивидуальные траектории обучения, а также снижать риски академической неуспеваемости и отчисления обучающихся.

Однако традиционные подходы имеют ряд ограничений. Несмотря на широкое распространение методов прогнозирования в образовании, традиционные подходы обладают рядом ограничений. В частности, они недостаточно эффективно учитывают сложные нелинейные зависимости и динамику изменения учебных показателей, а также испытывают трудности при работе с большими и разнородными массивами данных. Это снижает точность прогнозов и ограничивает возможности их практического применения.

В последние годы традиционные методы анализа и прогнозирования активно дополняются технологиями искусственного интеллекта, которые находят широкое применение в различных сферах — от медицины до информационных технологий. Современные алгоритмы машинного обучения и глубокие нейронные сети позволяют обрабатывать большие объёмы образовательных данных и выявлять скрытые закономерности, недоступные классическим методам.

Использование искусственного интеллекта обеспечивает учёт многомерных и динамических характеристик обучающихся, что способствует повышению точности прогнозирования учебных результатов. Интеграция технологий искусственного интеллекта в социальные сферы, включая образование, выступает важным направлением цифровой трансформации и формирования экономики данных. Применение интеллектуальных систем позволяет повысить эффективность использования образовательных ресурсов, обеспечить гибкость образовательных программ и способствует развитию персонализированного обучения. Последнее имеет особую значимость, поскольку напрямую влияет на снижение риска неуспеваемости и отчисления обучающихся. Согласно статистическим данным, одной из ключевых проблем дополнительного профессионального образования является недостаточный уровень персонализации и гибкости образовательных программ. Унифицированный подход к обучению приводит к тому, что значительная доля обучающихся – от 40 до 80% – не завершает курс [6].

Таким образом, использование методов искусственного интеллекта в задачах прогнозирования учебных результатов представляет собой актуальное направление научных исследований.

Прежде чем перейти к постановке задачи и исследованию темы важно дать определение искусственному интеллекту. Искусственный интеллект (ИИ) представляет собой совокупность современных технологий, которые на основе сбора и анализа больших объёмов данных и методов программного моделирования позволяют разрабатывать и применять методики обучения по индивидуальной траектории. Такие технологии способны имитировать речемыслительную деятельность человека, решать учебные, коммуникативные и профессиональные задачи, а также обеспечивать автоматизированный контроль знаний, предоставлять обратную связь и выполнять аналитическую обработку образовательных данных. [5].

Областью исследования является применение технологий искусственного интеллекта в задачах прогнозирования академической успеваемости обучающихся. Данное направление предполагает использование различных моделей машинного обучения, осуществляющих анализ исходных данных, характеризующих образовательную деятельность студентов (например, результаты обучения, посещаемость, активность и иные показатели), с целью формирования прогностических оценок их дальнейшей успеваемости. Качество получаемых прогнозов определяется степенью соответствия предсказанных значений фактическим результатам, достигнутым обучающимися в процессе обучения. Таким образом, эффективность применяемых моделей оценивается на основе точности предсказания и величины отклонения прогнозируемых показателей от реальных значений. Методы для решения могут быть разными.

Среди классических методов машинного обучения, применяемых для решения задач прогнозирования, широко используются линейные модели, в частности логистическая и линейная регрессии, а также метод опорных векторов. Логистическая регрессия представляет собой статистический метод, предназначенный для анализа зависимости между совокупностью независимых переменных (признаков) и зависимой переменной, принимающей бинарные значения [7]. В отличие от линейной регрессии, она используется преимущественно для задач классификации, позволяя оценивать вероятность наступления определённого события. В контексте прогнозирования академической успеваемости логистическая регрессия может применяться, например, для решения задач бинарной классификации результатов обучения (зачёт/незачёт). Модель формирует вероятностную оценку принадлежности объекта к одному из классов, принимающую значения в диапазоне от 0 до 1 [8], что позволяет интерпретировать результат как вероятность наступления соответствующего исхода. Преимуществами данного подхода являются простота реализации и интерпретируемость результатов, что делает его эффективным при работе с относительно небольшими объёмами данных. Однако при наличии сложных нелинейных зависимостей между признаками точность модели может снижаться, что ограничивает её применение в

более сложных задачах прогнозирования. Более высокую предсказательную способность в задачах анализа образовательных данных показывают ансамблевые методы, такие как Random Forest и градиентный бустинг, включая XGBoost. Эти алгоритмы основаны на объединении множества слабых моделей и позволяют эффективно моделировать нелинейные зависимости и взаимодействия признаков, что особенно важно при анализе разнородных данных об успеваемости студентов. Согласно результатам ряда исследований, ансамблевые методы часто демонстрируют более высокую точность по сравнению с линейными моделями при работе с табличными образовательными данными. Отдельную группу составляют нейросетевые подходы, представленные многослойными перцептронами (MLP) и другими архитектурами глубокого обучения. Данные модели обладают высокой способностью к аппроксимации сложных нелинейных функций и позволяют выявлять скрытые закономерности в образовательных данных, однако требуют большего объёма данных и обладают меньшей интерпретируемостью по сравнению с классическими методами. Кроме того, в современных исследованиях всё чаще применяются графовые модели, такие как Graph Attention Network (HAN) и Heterogeneous Graph Transformer (HGT), которые позволяют учитывать структурные связи между элементами образовательной среды, например, взаимодействие студентов, курсов и преподавателей. Использование графовых подходов позволяет более полно моделировать образовательный процесс как систему взаимосвязанных объектов.

Исследования, посвящённые прогнозированию академической успеваемости, демонстрируют неоднозначные результаты, обусловленные выбором моделей и используемых признаков.

В ряде исследований рассматривается задача прогнозирования академической успеваемости обучающихся на основе табличных данных, включающих демографические, организационные и социально-поведенческие признаки, а также промежуточные академические оценки. Установлено, что наибольший вклад в точность моделей вносят текущие академические результаты (оценки за четверть), при этом их информативность дополняется рядом факторов, включая количество пропусков занятий, мотив выбора образовательной организации, наличие дополнительного образования, возраст обучающегося и социально-экономические характеристики семьи. В указанных условиях алгоритмы машинного обучения, в частности деревья решений и случайный лес, демонстрируют высокую предсказательную способность, достигая точности 81,4 и 64,1% соответственно [4].

В другой работе рассматривается прогнозирование успеваемости студентов на основе данных образовательных платформ Math и xAPI, включающих демографические и поведенческие характеристики обучающихся. В качестве метода повышения качества моделей применяется отбор признаков с использованием регуляризации Lasso, что позволяет увеличить точность классификаторов (например, для метода k-ближайших соседей точность возрастает с 73,05% до 82,41%). Для оценки качества моделей используются методы holdout-валидации и k-fold кросс-валидации. В результате экспериментов установлено, что алгоритм случайного леса демонстрирует наилучшие показатели среди классических методов машинного обучения (93,8%), в то время как среди моделей глубокого обучения наилучший результат достигается моделью GBNN (91,9%) [2].

Сравнительный анализ различных моделей машинного обучения, включая логистическую регрессию, случайный лес, многослойный персептрон и метод опорных векторов, проведён на данных университетской платформы UNEMI и Moodle. Наибольшая обобщающая способность выявлена у логистической регрессии, для которой значение AUC-ROC на тестовой выборке составило 0,9354, что объясняется её высокой интерпретируемостью и устойчивостью к переобучению. Случайный лес продемонстрировал наибольшую точность (89%), однако уступил по значению AUC-ROC (0,9103). Модели многослойного персептрона и SVM показали более низкие результаты (86 и 85% точности соответственно), при этом наблюдались признаки переобучения многослойного персептрона на малых выборках (n = 591). Существенное влияние на качество прогнозирования

оказывают ранние академические оценки и активность обучающихся в системе Moodle, в то время как демографические признаки оказывают ограниченное влияние [1].

В рамках исследования на датасете OULA (Open University Learning Analytics Dataset) проводится сравнение классических моделей машинного обучения и графовых нейронных сетей, включая HGT и HAN. Показано, что графовые модели демонстрируют более высокую эффективность в задачах раннего прогнозирования успеваемости, особенно в условиях разреженных данных. Значение метрики валидации для модели HGT увеличивается с 0,686 на ранних этапах до 0,895 на поздних этапах обучения. Аналогичные результаты получены для модели HAN (0,68–0,89). Среди классических алгоритмов наилучшие результаты демонстрирует случайный лес, тогда как логистическая регрессия показывает более низкую эффективность (0,639–0,889). Повышенная эффективность графовых моделей объясняется учётом структурных связей между обучающимися и образовательными курсами, что позволяет учитывать динамический характер образовательного процесса [3].

Дополнительно в исследовании, основанном на датасете SAPData, проводится сравнение методов логистической регрессии, метода опорных векторов, k-ближайших соседей, наивного байесовского классификатора, дерева решений и многослойного персептрона. Наилучшие результаты продемонстрировала модель многослойного персептрона со средней точностью 79,58% и максимальным значением к 80,00%. Далее следуют SVM (75,89%/77,70%), логистическая регрессия (75,00%/76,87%), дерево решений (72,37%/73,95%) и k-NN (67,79%/70,00%). Наименьшую эффективность показал наивный байесовский классификатор (60,54%/61,66%). Установлено, что ключевыми факторами, влияющими на точность прогнозирования, являются поведенческие характеристики обучающихся, включая посещаемость и пропуски занятий, тогда как наивный байесовский классификатор демонстрирует ограниченную применимость в условиях смешанных типов признаков [8].

Проведенный анализ современного состояния исследований в области прогнозирования академической успеваемости подтверждает высокую актуальность и практическую значимость внедрения технологий искусственного интеллекта в образовательный процесс. В условиях цифровой трансформации и перехода к экономике данных традиционные статистические подходы демонстрируют ограниченную эффективность при работе с большими, разнородными массивами и сложными нелинейными зависимостями, характерными для динамики учебных показателей. Как показано в обзоре, интеграция методов машинного обучения и глубоких нейронных сетей позволяет преодолеть эти ограничения, обеспечивая более точный учет многомерных характеристик обучающихся и способствуя переходу к персонализированным траекториям обучения. Сравнительный анализ различных архитектур моделей выявил неоднозначность результатов, зависящую от объема выборки, набора используемых признаков и этапа обучения. Классические ансамблевые методы, в частности Random Forest, демонстрируют устойчиво высокие показатели точности (до 93,8%) на табличных данных и хорошо интерпретируемы, что делает их предпочтительным выбором при наличии структурированных демографических и поведенческих данных. В то же время, логистическая регрессия сохраняет свою ценность для задач бинарной классификации на малых выборках благодаря устойчивости к переобучению и высокой обобщающей способности (AUC-ROC до 0,9354). Наиболее перспективными для учета структурных связей в образовательной среде (взаимодействие студент-курс-преподаватель) представляются графовые нейронные сети (HGT, HAN), чья эффективность особенно возрастает по мере накопления данных в течение семестра. Глубокие нейросетевые модели (MLP) обладают высоким аппроксимирующим потенциалом, однако их применение требует значительных вычислительных ресурсов и больших объемов данных для предотвращения переобучения. Обобщая рассмотренные исследования, следует подчеркнуть, что доминирующее влияние на качество прогноза оказывают не демографические, а академические и поведенческие факторы: текущая успеваемость, активность в цифровой среде (LMS) и посещаемость. Это подтверждает необходимость

развития систем образовательной аналитики, нацеленных на сбор и оперативную обработку именно этих данных. Дальнейшее развитие данного научного направления связано с гибридизацией подходов, разработкой более интерпретируемых моделей ИИ, а также с их внедрением в практику дополнительного профессионального образования для снижения высокого процента отчислений (40–80%) и повышения гибкости учебных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Airlangga, G.A Comparative Analysis of Machine Learning Models for Predicting Student Performance: Evaluating the Impact of Stacking and Traditional Methods // Brilliance: Research of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 4, № 2. – P. 491–499. – DOI: 10.47709/brilliance.v4i2.4669.

2) Evaluating and Enhancing Artificial Intelligence Models for Predicting Student Learning Outcomes / H. Farhood, I. Joudah, A. Beheshti, S. Muller // Informatics. – 2024. – Vol. 11, № 3. – P. 46. – DOI: 10.3390/informatics11030046.

3) Muresan, A. Predicting Student Success with Heterogeneous Graph Deep Learning and Machine Learning Models / A. Muresan, M. Cardei, I. Cardei // Proceedings of the 18th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2025). – Palermo, Italy: International Educational Data Mining Society, 2025. – P. 265–275. – URL: https://educationaldatamining.org/edm2025/proceedings/2025.EDM.long-papers.38/index.html (дата обращения: 08.04.2026).

4) Побединская, Т.В. Использование алгоритмов машинного обучения для прогноза успеваемости учащихся основной школы / Т.В. Побединская, О.Ю. Заславская // Вестн. МГПУ. Сер.: Информ. и информатизация образования. – 2022. – №4 (62). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-algoritmov-mashinnogo-obucheniya-dlya-prognoza-uspevaemosti-uchaschihsya-osnovnoy-shkoly (дата обращения: 06.04.2026).

5) Сысоев, П.В. Искусственный интеллект в образовании: осведомлённость, готовность и практика применения преподавателями высшей школы технологий искусственного интеллекта в профессиональной деятельности // Высшее образование в России. – 2023. – № 10. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-obrazovanii-osvedomlyonnost-gotovnost-i-praktika-primeneniya-prepodavatelyami-vysshey-shkoly-tehnologiy (дата обращения: 09.04.2026).

6) Воеводина, Е.И. Цифровая трансформация системы дополнительного профессионального образования как инструмент повышения эффективности человеческого капитала / Е.И. Воеводина, Д.В. Наумов, А.Н. Новиков // Теоретическая экономика. – 2025. – №. 10. – С. 77-92. DOI: https://doi.org/10.52957/2221-3260-2025-10-77-92

7) Григорьев, С.Г. Роль и место логистической регрессии и ROC-анализа в решении медицинских диагностических задач / С.Г. Григорьев, Ю.В.обзин, , Н.В. Скрипченко // Журнал инфектологии. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 36–45. – DOI: 10.22625/2072-6732-2016-8-4-36-45.

8) Sandeepa, A.G.R. Evaluation of Machine Learning Models in Student Academic Performance Prediction / A.G.R.andeepa, S. Mohottala, / 2025 5th International Conference on Advanced Research in Computing (ICARC). – Belihuloya, Sri Lanka: IEEE, 2025. – С. 1–6. – DOI: 10.1109/ICARC64760.2025.10963104.

УДК 004.932.72'1

ИССЛЕДОВАНИЕ ИИ-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ 3D-ПЕЧАТИ

Е.А. Есин

Научный руководитель – **Ф.А. Черногоров**, канд. техн. наук,
Е.В. Александрова, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В работе рассматривается задача автоматического обнаружения дефектов 3D-печати с использованием методов компьютерного зрения и глубокого обучения. Разработана модель на основе архитектуры YOLO, обученная на размеченном и аугментированном датасете распространенных дефектов.

Ключевые слова: *3D-печать, аддитивные технологии, компьютерное зрение, обнаружение дефектов, глубокое обучение, YOLO, нейронные сети*

RESEARCH ON AI MODELS FOR SOLVING 3D PRINTING DEFECT DETECTION TASKS

E.A. Esin

Scientific Supervisor – **F.A Chernogorov**, Candidate of Technical Sciences,
E.V. Aleksandrova, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

Abstract.Thispaperaddressestheproblemofautomaticdetectionofdefectsin3Dprinting using computer vision and deep learning methods.A model based on the YOLO architecture was developed and trained on an annotated and augmented dataset of common printing defects.

Keywords*: 3D printing, additive manufacturing, computer vision, defect detection, deep learning, YOLO, neural networks*

1. Обзор области исследования

Технологическое развитие не стоит на месте, за всю историю человечество прошло несколько этапов индустриализации, и сейчас относительно недавно мы вошли в новую технологическую эпоху.

Четвертая промышленная революция – это концепция Клауса Шваба, описанная в книге 2016 года – «индустрия 4.0» [1]. Ее идея заключается во внедрении киберфизичексих систем в заводские процессы, и в переходе к новым моделям производства, основанных на интеграции современных технологий, делая производство гибким, и благодаря этому данная технологическая модель становится привлекательней для пользователей, поскольку они получают возможность заказывать продукцию в соответствии со своими индивидуальными требованиями [2].

Теперь станки должны производить не одну вещь, а несколько разных по запросу потребителя [2]. За счет этого усиливается конкуренция между производителями, ведь они должны сделать унифицированный продукт быстро и качественно. И поэтому крупные предприятия нуждаются во внедрении гибких и технологически совершенных методов производств.

Одним из таких современных и перспективных направлений развития стала аддитивная технология. На момент 2025 года объем рынка 3D-печати оценивался в 4,31 миллиарда долларов США. По мнению экспертов, к 2026 году он вырастет с 5,22 миллиарда долларов до примерно 27,72 миллиарда долларов, а среднегодовой темп роста составит 22,61% в период с 2026 по 2035 год [3].

Суть аддитивной технологии заключается в послойном создании объекта по цифровой модели, что помогает оптимизировать производство, сократить время изготовления продукта и позволяет создавать уникальные детали без необходимости в трудной перенастройке оборудования [4].

Благодаря, гибкости технологии 3D-печати, она начинает внедряться в большое количество отраслей промышленности. К примеру, на момент 2023 года уровень внедрения технологии в аэрокосмической промышленности достиг примерно 65% среди крупных компаний, что обуславливается упрощением создания сложных и легких деталей для авиационной техники. В медицине более 55% производителей оборудования используют 3D-печать, например, для создания протезов, имплантов под отдельно взятого человека [5].

Также и в автомобильной отрасли технология 3D-печати активно применяется, около 30% компаний используют 3D-печать для изготовления инструментов и производственных приспособлений, для прототипирования деталей. Данная технология затрагивает и бытовую потребительскую сферу, более половины компаний для создания потребительских товаров экспериментируют с 3D-печатью для создания уникальных текстур, аксессуаров и индивидуальных изделий [5].

Можно сделать вывод, что аддитивная технология активно внедряется во все сферы промышленности. Она упрощает производство сложных деталей, сокращает время производства, позволяя делать на одних и тех же станках печати, как уникальные детали, так и стандартные, без сложной настройки. Поэтому данная технология является ведущей технологией «индустрия 4.0».

Но быстрый рост доступности и популяризации новой технологии привел к увеличению проблем, связанных с обеспечением контроля качества аддитивной продукции. Принтеры, несмотря на значительный прогресс в технологии 3D-печати, все еще подвержены ошибкам и дефектам в процессе производства деталей.

Исследования специалистов из Carnegie Mellon University говорят, что современные системы аддитивного производства все еще сталкиваются с высоким уровнем отказов. Компания Prusa сообщает, что примерно 7% процессов печати завершаются неудачей, а еще около 19% требуют вмешательства пользователя для предотвращения возможных дефектов. Это значит, что около четверти процессов 3D-печати нуждаются в дополнительном контроле, что усложняет промышленное производство. В современных промышленных стандартах значение допустимых дефектов около 0,1%. Поэтому даже 7% неудачных печатей превышают допустимые показатели качества, что снижает конкурентоспособность аддитивного производства по сравнению с традиционными методами [6].

Традиционные методы контроля качества определяют брак при окончании производственного цикла печати. Это исключает возможность внесения оперативных изменений в процесс, требуя полной остановки производства и переделки изделия. В связи с этим, становится очевидной необходимость внедрения систем мониторинга в режиме реального времени. Поэтому развитие 3D-печати напрямую связано с необходимостью использования современных методов контроля качества [7].

Проблема контроля качества является одной из ключевых и актуальных задач в аддитивной промышленности, при отсутствии своевременного способа контролировать качество печати, может произойти брак, перерасход материал, снижение качества готового изделия. В рамках разнообразная сфер, для которых применятся аддитивное производство, например медицина или авиастроение, такие ошибки печати могут быть критическими.

Данная проблема стимулирует развитие систем автоматического мониторинга процессов печати, включая использование технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта, позволяющие обнаруживать дефекты на ранних этапах производства. Классические методы детекции дефектов уступают нейросетевым моделям, которые способны работать в сложных условиях освещения и при изменении геометрии объекта [8].

Для оптимизации и автоматизации определения дефектов можно использовать систему компьютерного зрения, интегрированных с нейронной сетью. Камеры, установленные в зоне печати, позволяют получать изображения каждого слоя, а алгоритмы анализа в режиме реального времени выявлять отклонения. Данная система станет автоматизацией контроля качества, которая сможет помогать пользователю в осуществлении визуального осмотра, и при наличии дефекта сможет сама остановить печать.

2. Анализ существующих архитектур нейронных сетей

Рассмотрим существующие архитектуры нейронных сетей. Сверточные нейронные сети (CNN) лежат в основе большинства современных систем, анализирующих изображения. Их цель – это классификация изображений, то есть определение наличия того или иного объекта или признака. Модели AlexNet, VGG и ResNet могут, выявить дефект на снимке, но не укажут его точное местоположение или форму. Эти сети работают быстро и относительно просты в создании, но не подходят для задач, требующих точного определения координат и контуров дефекта [9].

Двухстадийные детекторы, такие как R-CNN, Fast R-CNN и Faster R-CNN, обнаруживают объекты в два шага. Сначала они предлагают возможные области, где может находиться объект, а затем классифицируют их и уточняют границы. Этот метод обеспечивает высокую точность, особенно при работе со сложными или мелкими объектами. Но из-за своей многоступенчатости такие модели работают медленнее и требуют значительных вычислительных мощностей. Их использование в системах, работающих в реальном времени, сильно зависит от производительности оборудования[10].

Одностадийные детекторы, например SSD и YOLO, одновременно определяют местоположение и классифицируют объекты за один проход по сети. Это обеспечивает очень высокую скорость работы, что делает их идеальными для мониторинга в реальном времени. При этом точность обнаружения остается на высоком уровне, но в сложных ситуациях они могут немного уступать двухэтапным моделям. Данный тип модели предлагает хороший компромисс между скоростью и качеством распознавания, а также они легко интегрируются в различные приложения [11].

Сегментационные модели, U-Net и Mask R-CNN, позволяют выделять объекты на уровне отдельных пикселей, обеспечивая максимально точную локализацию дефекта. Они демонстрируют очень высокую точность и способны определить точную форму повреждений или отклонений. Однако эти модели требуют большего количества размеченных данных и значительных вычислительных ресурсов, а их скорость зависит от конкретной архитектуры и реализации. В задачах, где критически важна детальная геометрия дефекта, сегментационные подходы являются наиболее информативными, но более сложными в разработке и обучении [12, 13].

В итоге из анализа выше, можно составить табл. 1 для наглядного просмотра информации о существующих аналогах.

Таблица 1. Сравнение существующих аналогов

Тип модели	Примеры архитектур	Скорость работы	Точность	Подходит для реального времени	Преимущества	Недостатки
Сверточные нейронные сети (CNN)[9]	AlexNet, VGG, ResNet	Высокая	Средняя	Нет	Простота реализации, высокая точность классификации	Не выполняют локализацию дефекта
Двухстадийные детекторы [10]	R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN	Низкая/средняя	Очень высокая	Ограниченно	Высокая точность обнаружения мелких объектов	Высокие вычислительные затраты, задержка инференса
Одностадийные детекторы [11]	SSD, YOLO	Очень высокая	Высокая	Да	Баланс скорости и точности, простота интеграции	Может уступать двухстадийным моделям в точности на сложных сценах
Сегментационные модели [12, 13]	U-Net, Mask R-CNN	Средняя	Очень высокая	Зависит от версии	Высокая детализация дефектов, точное определение формы	Большие вычислительные затраты, сложность обучения

Ключевыми факторами выбора архитектуры для обнаружения дефектов 3D-печати, являются скорость, точность локализации и вычислительные возможности, чтобы в реальном времени определять наличие дефекта. Двухстадийные детекторы точны, но медленны. Сегментационные модели дают максимальную детализацию, но требуют много усилий для подготовки данных. Одностадийные детекторы показывают наилучшее сочетание точности и скорости. Поэтому для автоматического обнаружения дефектов в реальном времени предпочтительны одностадийные CNN-архитектуры.

Для системы контроля качества в режиме реального времени наиболее целесообразным является использование алгоритмов семейства YOLO. Но для того, чтоб разработать и обучить модель, нужно определить дефекты, с которыми приходиться сталкиваться при 3D-печати, и по наиболее часто встречаемым собрать датасет.

3. Анализ дефектов

Существующие дефекты при 3D-печати можно разделить на:

– термические деформации: усадка (изменение размеров из-за сжатия материала при остывании) и коробление (отрыв краев детали от платформы из-за неравномерного охлаждения).

– нарушения целостности слоев: смещение слоев (из-за сбоев оборудования), расслоение (недосплав, слабая адгезия между слоями) и загиб кромок (из-за локальных термических напряжений).

– проблемы с подачей материала: зазоры (недостаточное заполнение), недоэкструзия (уменьшенная подача филамента, ведущая к пористости), переэкструзия (избыточная подача, вызывающая утолщения и потерю точности), нитевидные образования (тонкие пластиковые нити между элементами), полосчатость (периодические отклонения по высоте слоя) и наплывы (локальные избыточные скопления материала), засор сопла, спагетти дефект.

– структурные дефекты: трещины (внутренние или поверхностные напряжения), поры (пустоты в объеме изделия) и молекулярное расщепление [14].

Перечисленные дефекты различаются по размеру, природе возникновения и локализации, однако все они оказывают влияние на механические и эксплуатационные характеристики напечатанных изделий. На рис. 1 можно увидеть дефекты 3D-печати [14].

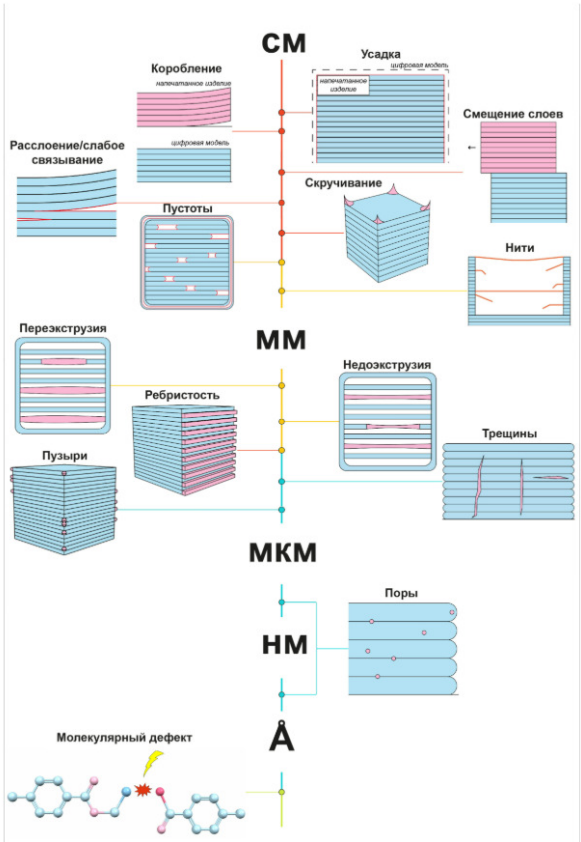


Рис. 1. Дефекты печати

Для того чтобы определить из всех вышеперечисленных дефектов наиболее частые, для создания датасета, обратимся к Google Trands. Данный инструмент позволяет оценить относительную частоту поисковых запросов по выбранным ключевым словам за определенный период времени и в конкретном регионе.

Показатели в Google Trends представлены в нормализованной шкале от 0 до 100. Значение 100 соответствует наивысшему уровню интереса к запросу среди рассматриваемых терминов в выбранном регионе и временном диапазоне. Значение 50 означает, что популярность запроса вдвое ниже максимального значения. Показатель 0 указывает на недостаточный объем данных для анализа по данному запросу в заданных условиях. Представленные значения отражают не абсолютное количество поисков, а относительный уровень интереса к теме. Были рассмотрены дефекты по запросам и далее будут перечислены 6 наиболее популярных: «Засор сопла», «Спагетти дефект», «Прыщи дефект», «Нити между объектами дефект», «Недоэкструзия дефект», «Недосплав дефект», их графики по частоте запросов можно увидеть на рис. 2.

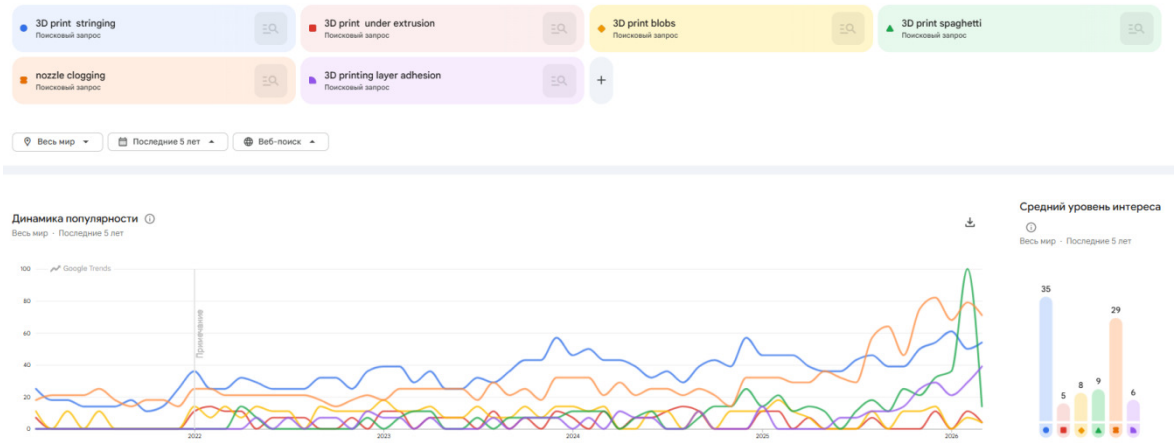


Рис. 2. Частота дефектов по запросам

Анализ самых частых дефектов при 3D-печати:

– «Засор сопла» – В процессе 3D-печати, принтеру нужно расплавлять и экстрадировать много пластика. Этот пластик принтер проталкивает через сопло, и оно забивается. Это происходит из-за того, что внутри сопла что-то мешает пластику проходить. Это может привести к перегреву принтера, и дальнейшей его поломке.

– «Спагетти дефект» – частая проблема при 3D-печати, при которой вместо задуманной модели получается комок из тонких нитей пластика, напоминающий спагетти. Это связано с тем, что деталь отклеивается от печатного стола, и принтер начинает печать в воздухе, наматывая пластик.

– «Прыщи дефект» – это образование на поверхности изделия неровностей, возникающих из-за частых остановок и возобновлений подачи пластика экструдером во время перемещения от одной точки к другой. Этот дефект ухудшает внешний вид и точность деталей, создает сложности при покраске и ведет к излишнему использованию пластика.

– «Нити между объектами дефект» – небольшие тонкие ниточки, которые остаются натянутыми между частями детали при перемещении сопла. Они ухудшают внешний вид изделия, требуют дополнительной шлифовки, а при попытке удаления могут повредить саму деталь.

– «Недоэкструзия дефект» – возникает при подаче недостаточного количества материала, что вызывает появление пустот между слоями. Это снижает прочность изделия, и функциональные детали могут стать непригодными для использования.

– «Недосплав дефект» – происходит, когда слои модели плохо сцепляются друг с другом, из-за чего деталь легко разваливается даже при незначительном механическом

воздействии. Проблема связана с плохой адгезией между слоями, что отрицательно влияет на прочность и эксплуатационные характеристики детали, а также ведет к лишнему расходу материала [15].

Данные дефекты отлично поддаются определению через камеры с помощью моделей детекции объектов, таких как YOLO, и по их изображениям можно собрать датасет, чтобы обучить данную модель (рис. 3).

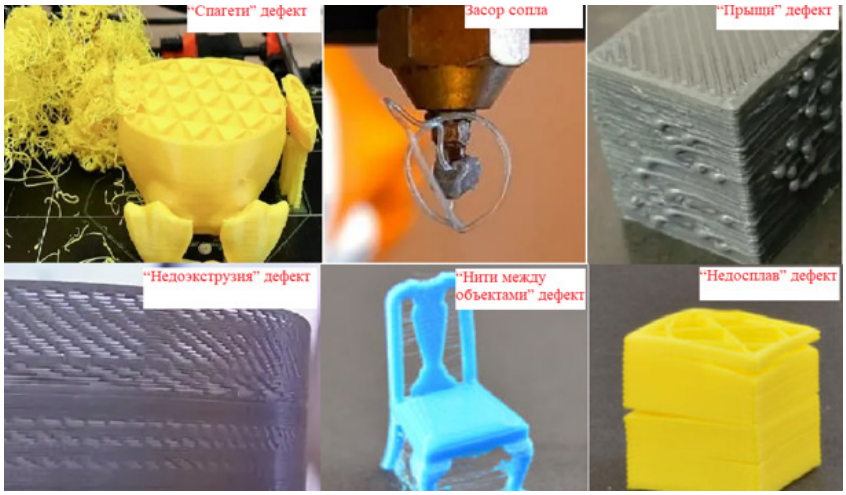


Рис. 3. Частые дефекты печати

4. Разработка модели

Для обучения модели очень важно количество и качества данных. Большой и разнообразный датасет улучшает обучение модели и способность классифицировать новые данные. Для обучения были использованы размеченные и агентированные изображения, полученные из открытых видеодатасетов, а также кадры с GitHub и Kaggle. При выборе материалов обращалось внимание на качество изображений и разнообразие изображений дефекта.

Сегментация и разметка дефектов проводились с помощью Python и Roboflow. Вручную выделялись дефекты, маркировались цветом и подписывались по типу для последующей классификации (рис. 4). Отдельно отмечались кадры без дефектов, что обеспечило баланс классов и высокое качество датасета.

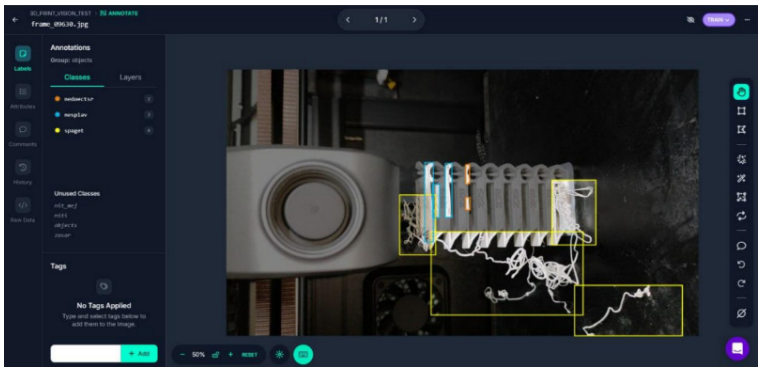


Рис. 4. Разметка датасета

Для повышения точности модели была применена аугментация изображений. Некоторые из картинок с дефектами были аугментированы автоматически, но из-за ограниченного набора быстрых преобробразований Roboflow, которые включали в себя лишь повороты, и изменения контраста, для моделирования реалистичных условий, таких как шумы, помехи и снижение разрешения, использовался Paint (рис. 5, 6).

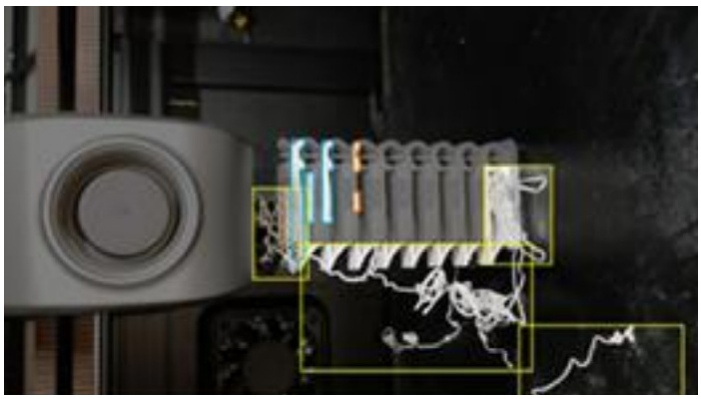


Рис. 5. Наложение шумов на изображение

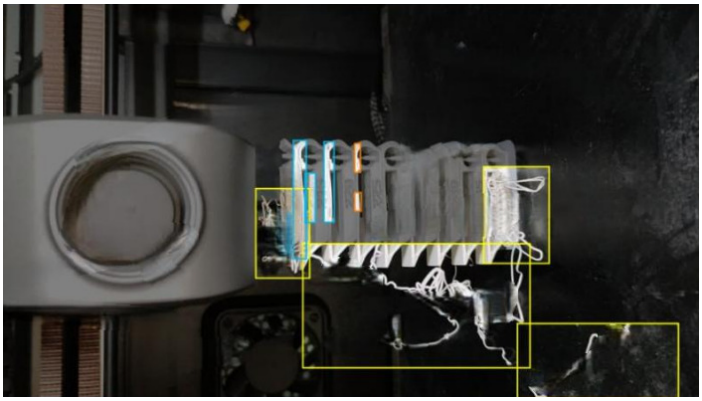


Рис. 6. Сжатия изображения и потеря качества

Каждый из шести классов дефектов «Засор сопла», «Спагети дефект», «Прыщи дефект», «Нити между объектами дефект», «Недоэкструзия дефект», «Недосплав дефект», был представлен примерно 800 изображениями. Класс «без дефектов» насчитывал около 1000 изображений. Данные были разделены на обучающую 70%, валидационную 15% и тестовую 15% выборки.

Обучающая выборка служила для настройки модели, валидационная – для мониторинга и подбора гиперпараметров, а тестовая – для финальной оценки производительности на новых данных. После подготовки датасета, была выбрана целевая сверточная нейронная сеть (YOLOv11).

Для обучения нейронной сети был выбран облачный сервис Google Colab. Данная платформа предоставляет бесплатный доступ к графическим процессорам Tesla T4 с 16 ГБ видеопамяти, что существенно ускоряет процесс обучения нейронных сетей благодаря возможностям параллельной обработки данных. Интеграция с Jupyter Notebook обеспечивает удобство разработки, а облачное хранение кода и результатов упрощает контроль версий проекта.

В качестве языка программирования был выбран Python, что обусловлено наличием библиотек для машинного обучения и обработки изображений. В процессе работы применялись NumPy, OpenCV и Matplotlib. Для построения и отладки моделей использовался фреймворк PyTorch. Конфигурация рабочей среды включала Python версии 3.8.10, CUDA Toolkit 11.2, cuDNN 8.1 и PyTorch 1.13.1+cu112, что позволило использовать мощности GPU.Ограничения бесплатного тарифа Google Colab на количество эпох обучения являлись сдерживающим фактором для масштабирования процесса.

Работа с моделью осуществлялась с использованием библиотеки ultralytics. Датасет был импортирован локально из ZIP-архива, что обеспечило возможность автономной работы, в отличие от прямого импорта с платформы Roboflow.

Для обучения были задействованы: базовая конфигурация, определенная файлом yolo11n.yaml, и предобученная модель yolo11n.pt. Процесс обучения был сконфигурирован с параметрами: epochs=40, batch=16, imgsz=640, с указанием директорий для сохранения артефактов обучения. Использование GPU позволило ускорить обучение, который на 40 эпохах занимал 3–4 часа, варьируясь в зависимости от загрузки вычислительных ресурсов Colab. По завершении обучения были рассчитаны и представлены в табл. 2 метрики производительности.

Таблица 2. Результаты обучения модели

Class	Box (Precision)	mAP50
All	0.892	0.905
Blobs	0.868	0.873
Nesplav	0.876	0.897
Zasor	0.929	0.947
Spaghetti	0.876	0.883
Stringing	0.884	0.895
Under_extrusion	0.917	0.935

Показатель Box (Precision) измеряет, насколько точно модель определяет объекты, отражая долю правильных предсказаний. Значение, близкое к 1, указывает на минимальное количество ошибок. mAP50, или средняя точность при пороге пересечения 0,5, оценивает качество обнаружения объектов, которые относительно легко идентифицировать. В нашем исследовании модель продемонстрировала высокую точность в обнаружении дефектов: средняя точность по всем классам составила 89,2%, а mAP50 – 90,5%. Графики обучения базовой модели детекции объектов можно увидеть на рис. 7.

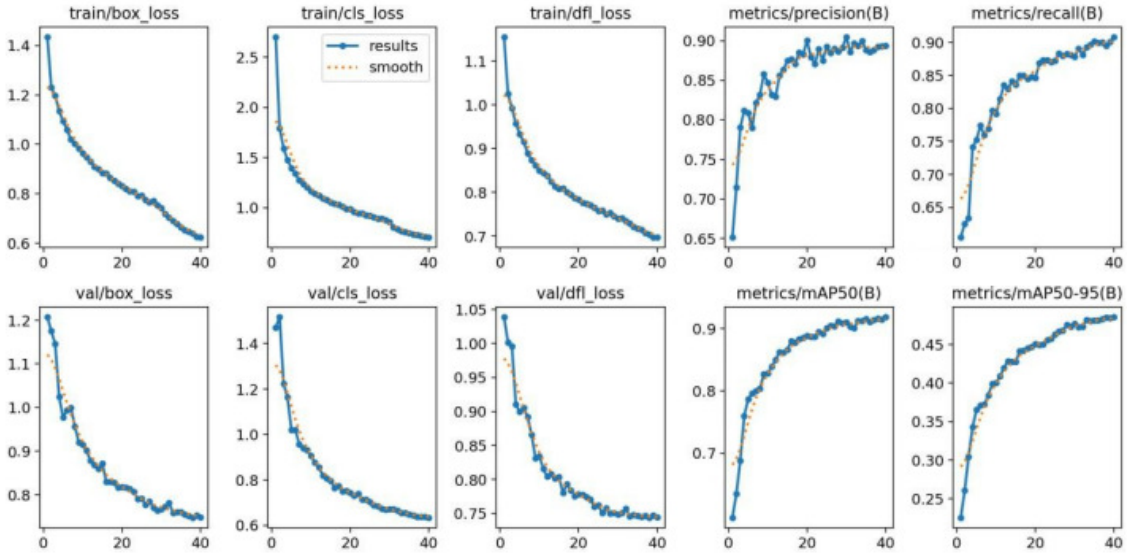


Рис. 7. Метрики на графиках обучения модели

Для надежной оценки эффективности сверточной нейронной сети необходимо проверить ее на данных, которые были не задействованы в процессах обучения, тестирования и валидации. С этой целью были записаны видеоматериалы в лабораторных условиях, где были зафиксированы дефекты «Спагети дефект» и «Недосплав дефект». Дополнительно было взято видео печати из интернета, демонстрирующее дефект «Нити между объектами дефект». Рис. 8 показывает, как нейронная сеть успешно идентифицировала дефекты «Спагети дефект» и «Недосплав дефект» на изображениях, полученных из нашего видео.

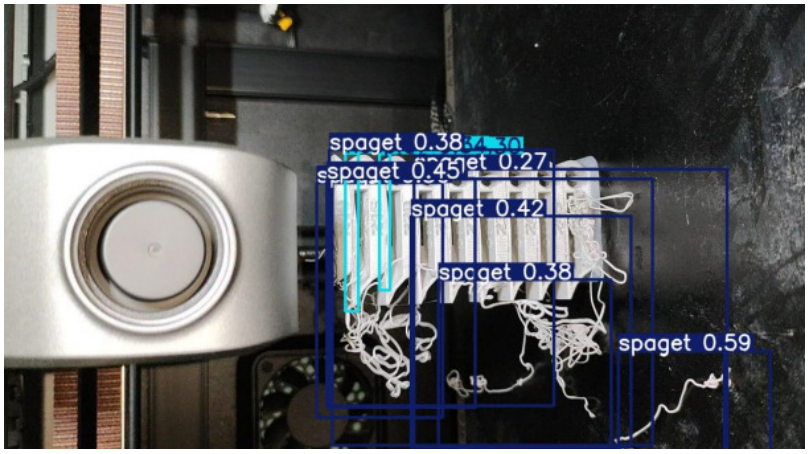


Рис. 8. Обнаружение «Спагети дефект» и «Недосплав дефект» на новых данных

На рис. 9 представлено изображение из открытых источников, на котором сверточная нейронная сеть обнаружила дефект «Нити между объектами дефект».

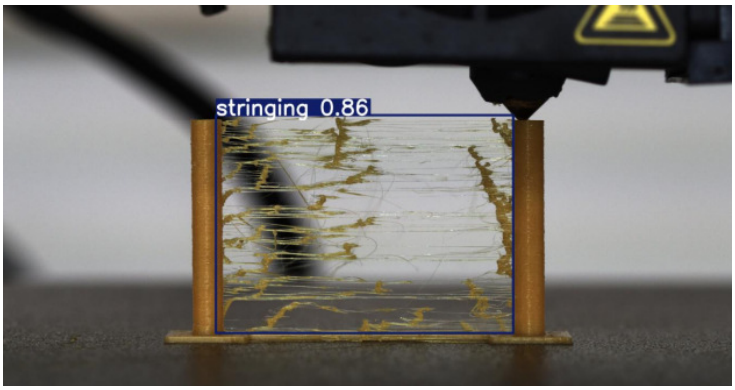


Рис. 9. Обнаружение «Нити между объектами дефект» на новых данных

Обработка изображений осуществляется на графическом процессоре T4 в Google Colab в течение 50 миллисекунд. Такая скорость является оптимальной для применения в сценариях реального времени. Размещение модели на локальном вычислительном ресурсе (компьютере или сервере) позволяет выполнить мгновенную обработку и вывод результатов.

5. Результаты

В результате работы была разработана модель обнаружения дефектов 3D-печати на основе модели YOLO. Для обучения был собран, размечен и аугментирован датасет, содержащий частые дефекты 3D-печати:«Засор сопла», «Спагетти дефект», «Прыщи дефект», «Нити между объектами дефект», «Недоэкструзия дефект», «Недосплав дефект». Данные были разделены на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 70/15/15.

Обучение модели происходило в Google Colab с применением библиотеки PyTorch на GPU Tesla T4. В результате обучения достигнуты высокие показатели точности: средняя точность по классам составила 89,2%, значение метрики mAP50 – 90,5%. Результаты показывают высокую точность разработанной модели, что может свидетельствовать о возможности ее применения для автоматического контроля качества при 3D-печати в режиме реального времени.

Заключение

Задача автоматизации контроля качества при 3D-печати является актуальной. Данная технология имеет широкий спектр применения, несвоевременное определение брака продукта 3D-печати может быть критическим. Большинство дефектов 3D-печати можно

идентифицировать с помощью компьютерного зрения с использованием методов глубокого обучения, в частности модели YOLO. Данное решение является эффективным для задач оперативного мониторинга. Полученные результаты подтверждают перспективность использования разработанного подхода для автоматизированного контроля качества 3D-печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – Москва: Эксмо, 2016. – (Top Business Awards).

2) Индустрия 4.0: понятие, концепции и тенденции развития // CyberLeninka: [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/industriya-4-0-ponyatie-kontseptsii-tendentsii-razvitiya/viewer (дата обращения: 05.02.2026).

3) Industrial 3D Printing Market Size and Forecast // Precedence Research: [site]. – URL: https://www.precedenceresearch.com/industrial-3d-printing-market (дата обращения: 11.02.2026).

4) Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки // CyberLeninka: [сайт]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-3d-pechati-preimuschestva-i-nedostatki/viewer (дата обращения: 18.02.2026).

5) 3D Printing Industry Statistics // Gitnux: [site]. – URL: https://gitnux.org/3d-printing-industry-statistics (дата обращения: 22.02.2026).

6) Researchers Use Agentic AI to Monitor and Correct 3D Prints // Tom’s Hardware: [site]. – URL: https://www.tomshardware.com/3d-printing/researchers-use-agentic-ai-to-monitor-and-correct-3d-prints-system-catches-errors-in-real-time-uses-modular-design-to-work-on-different-makes-and-models (дата обращения: 25.02.2026).

7) Real-Time Defect Detection for Additive Manufacturing // ScienceDirect: [site]. – DOI: 10.1016/S2214-7853(20)38103-7. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320381037 (датаобращения: 03.03.2026).

8) Defect detection in 3D printing: a review of image processing and machine vision techniques // ResearchGate: [site]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/395031728_Defect_detection_in_3D_printing_a_review_of_image_processing_and_machine_vision_techniques (дата обращения: 06.03.2026).

9) A survey of deep learning-based object detection methods // ACM Digital Library: [site]. – DOI: 10.1145/3065386. – URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3065386 (дата обращения: 09.03.2026).

10) Deep learning for object detection: a comprehensive review // IEEE Xplore: [site]. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7485869 (дата обращения: 11.03.2026).

11) Deep learning-based object detection methods and applications // IEEE Xplore: [site]. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7780460 (дата обращения: 13.03.2026).

12) Object detection in computer vision: a review // Springer: [site]. – DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28 (дата обращения: 14.03.2026).

13) Real-time object detection using deep learning // IEEE Xplore: [site]. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8237584 (дата обращения: 15.03.2026).

14) Defects in 3D printing and strategies to enhance quality of FFF additive manufacturing: a review // ResearchGate: [site]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/374427434_Defects_in_3D_Printing_and_Strategies_to_Enhance_Quality_of_FFF_Additive_Manufacturing_A_Review (дата обращения: 16.03.2026).

15) Часто задаваемые вопросы по 3D-печати // 3DPT: [site]. – URL: https://3dpt.ru/page/faq (дата обращения: 17.03.2026).

УДК 323.2

УМНЫЙ ГОРОД: КАК ИИ УПРАВЛЯЕТ ГОРОДСКИМ ТРАНСПОРТОМ

А.Р. Жомова, Н.А. Личак

Научный руководитель – **Н.А. Личак**, д-р культурологии

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются проблемы дорожных пробок в городах и способы её решения с помощью технологий искусственного интеллекта. Описаны интеллектуальные системы управления светофорами, прогнозирования трафика, оптимизации общественного транспорта и беспилотные транспортные средства. Приведены примеры внедрения, показано, что ИИ-технологии позволяют ускорить транспортные процессы, снизить выбросы CO_2 и уменьшить аварийность.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, умный город, управление светофорами, интеллектуальная транспортная система, беспилотный транспорт, прогнозирование трафика*

SMART CITY: HOW AI MANAGES URBAN TRANSPORT

A.R. Zhomova, N.A.Lichak

ScientificSupervisor – **N.A. Lichak**, Doctor of Cultural Studies

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the problems of traffic jams in cities and ways to solve them using artificial intelligence technologies. It describes intelligent traffic light control systems, traffic forecasting, public transport optimization, and unmanned vehicles. Examples of implementation are given, and it is shown that AI technologies make it possible to speed up transport processes, reduce CO_2 emissions and reduce accidents.

Keywords: *artificial intelligence, smart city, traffic light control, intelligent transport system, unmanned transport, traffic forecasting*

Многие жители крупного города сталкивались с ситуацией, когда на дорогу приходится тратить гораздо больше времени, чем запланировано.На первый взгляд причина очевидна: машин стало слишком много, а полотна дорог – недостаточно. Вместе с тем, транспортный коллапс вызван не одной, а сразу несколькими причинами.

Рост уровня жизни населения и развитие автомобильной промышленности привели к стремительным темпам прироста количества автомобилей в крупных городах, с чем не справляется транспортная инфраструктура. Темпы ввода новых дорожных мощностей не успевают вовремя справляться с ситуацией.

Традиционные системы управления дорожным движением основаны на статичных или сезонных настройках светофорных объектов. Светофоры работают по заранее спланированному расписанию, не всегда реагируя на реальную ситуацию.

Аварии также являются одной из наиболее очевидных причин заторов. Однако не менее значимыми, хотя и менее заметными, выступают спонтанные действия водителей: невнимательность, неравномерный темп движения, позднее перестроение. Водитель может притормозить, чтобы сохранить безопасную дистанцию до впереди идущей машины. Это вызывает цепочку аналогичных действий у водителей за ним, что приводит к пробке на пустом месте. В Японии в целях эксперимента создали замкнутую дорогу, где каждый водитель должен был двигаться с одинаковой скоростью и дистанцией без светофоров и знаков. Спустя время на трассе образовались заторы из-за невозможности водителей контролировать этот процесс в полной мере. Итогом стало то, что человеческий фактор сам по себе, без каких-либо внешних помех, способен генерировать пробки [6].

Технологии искусственного интеллекта. Решение проблемы лежит не в строительстве большего числа новых дорог (что экономически и экологически не всегда оправданно), а в интеллектуализации управления.

К одним из ключевых направлений относится адаптивное управление светофорными объектами. В отличие от статичных систем, ИИ-светофоры получают данные с детекторов

транспорта (индукционные петли, радарные датчики, видеокамеры) и в реальном времени вычисляют оптимальную длительность фаз. Приоритет отдается направлениям с максимальной загрузкой, а также общественному транспорту. Алгоритмы машинного обучения позволяют системе «понимать» типичные сценарии (утренний час пик, вечерний отток, проведение массовых мероприятий) и адаптироваться к ним [4].

Такие технологии уже активно применяются в Москве, Санкт-Петербурге и многих других городах России. Так, например, в столице Татарстана Казани внедрена система «умных светофоров», интегрированная с движением трамваев и автобусов. Датчики на подходах к перекрестку передают информацию о приближении общественного транспорта, и светофорный контроллер в приоритетном порядке включает для него зеленый сигнал. В результате даже в часы пик автобусы и трамваи следуют с минимальными задержками, что повышает их конкурентоспособность по сравнению с личным автомобилем.

Используя данные прошлых событий, погодные условия и текущую ситуацию, ИИ строит краткосрочные (15-30 минут) и среднесрочные (1-3 часа) прогнозы загрузки дорог. Это позволяет не только реагировать на уже возникший затор, но и предотвращать его: например, заблаговременно перенаправлять потоки или корректировать режим светофоров на подходах к потенциальному месту [1].

Интеллектуальные системы в реальном времени корректируют маршруты автобусов, троллейбусов и трамваев. GPS/ГЛОНАСС-трекинг позволяет диспетчерскому центру видеть отклонения от графика и давать команды водителям. Синхронизация светофоров с движением общественного транспорта (предоставление «зеленого коридора») повышает регулярность и скорость сообщения, делая его более привлекательным по сравнению с личным автомобилем [7].

Московская интеллектуальная транспортная система, включающая в себя более тысячи светофоров, камер видеонаблюдения и детекторов мониторинга, является одной из важнейших составляющих проекта «Умный город».Все полученные данные в реальном времени стекаются в Ситуационный центр Центра организации дорожного движения (ЦОДД), где их анализируют как автоматические алгоритмы, так и диспетчеры. Система позволяет оперативно выявлять ситуации на дорогах, прогнозировать развитие при планируемых изменениях, оценивать последствия решений до их фактического принятия.

Полностью автономные транспортные средства (беспилотные автомобили, беспилотные трамваи) способны поддерживать оптимальную дистанцию и равномерную скорость с точностью, недоступной человеку. Массовое внедрение таких систем радикально снижает риск возникновения фантомных пробок, поскольку исчезает первичный импульс – спонтанное замедление. Более того, беспилотные автомобили могут координироваться между собой и с инфраструктурой [5].

Инструментарий: камеры, детекторы, навигация и динамические знаки. Технологическая база интеллектуальных транспортных систем включает несколько уровней сбора и воздействия.

Видеокамеры с компьютерным зрением (в том числе на основе нейронных сетей) распознают транспортные средства, их тип, скорость, траекторию, а также фиксируют нарушения и ДТП[6].

Детекторы транспорта (магнитные, радарные, инфракрасные) дополняют видеонаблюдение, обеспечивая точные данные о потоке в любых погодных условиях.

GPS/ГЛОНАСС-трекеры на общественном транспорте и в данных от навигационных приложений (Яндекс.Карты, 2ГИС, Google Maps) формируют картину реального движения с участием миллионов автомобилей.

Светодиодные динамические знаки (информационные табло переменной информации) позволяют воздействовать на водителей в реальном времени: например, временно снижать разрешенную скорость на определенном участке, чтобы выровнять скорость потока и предотвратить зарождение волны затора. Как показали исследования, даже небольшое, но синхронизированное снижение скорости всех водителей на подходах к потенциально опасному участку может сгладить неровности движения.

Ожидаемые эффекты. Внедрение ИИ в управление дорожным движением мультипликативный положительный эффект.

Ускорение транспортных процессов. Сокращение времени в пути для пассажиров и грузов – экономия времени и, как следствие, денег миллионами людей ежедневно.

Представленные способы позволяют снизить выбросы CO_2 и вредных веществ. В пробках автомобили работают на холостом ходу или в режиме частых разгонов-торможений, что резко повышает расход топлива и выброс парниковых газов.

Снижение числа ДТП. Предотвращение аварийных ситуаций через прогнозирование опасных сценариев, автоматическое информирование водителей, а также уменьшение стрессовых ситуаций за счет равномерного движения [2].

Итак, проблема дорожных заторов не имеет единственной причины — она коренится одновременно в инфраструктурной недостаточности, несовершенстве управления и фундаментальных особенностях человеческого поведения (неравномерность, спонтанные замедления, порождающие волновые заторы). Технологический ответ XXI века заключается в передаче ключевых функций управления от человека к искусственному интеллекту: от статичных светофоров – к адаптивным, от фиксации пробок – к их прогнозированию, от хаотичного водительского поведения – к скоординированному движению беспилотных транспортных средств.

Опыт многих городов показывает, что «умные» транспортные системы не только ускоряют движение и экономят время, но и снижают выбросы CO_2, уменьшают количество ДТП и повышают качество городской среды. Интеллектуальная транспортная система становится не просто вспомогательным сервисом, а базовой инфраструктурой современного города, без которой невозможно устойчивое развитие в условиях продолжающегося роста автомобилизации. Будущее городской мобильности – за взаимодействием человека, транспортного средства и «умной» дороги, где искусственный интеллект выступает в роли главного диспетчера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Андрюков, А.В. Искусственный интеллект на страже дорог: как технологии меняют транспортные системы городов // Оригинальные исследования. – 2025. Т. 15. № 5. – С. 158-163.

2) Калмыков, Б.Ю. Организация безопасности дорожного движения с использованием искусственного интеллекта / Б.Ю. Калмыков, А.В. Лозовик // Актуальные вопросы современной науки: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2025. - С. 26-28.

3) Каримов, К.С. Цифровая трансформация транспортной отрасли России: стратегические приоритеты и внедрение технологий искусственного интеллекта // Вестник юридических исследований. – 2025. – Т. 4, № 5. – С. 58-63.

4) Коновалов, Д.Е. Интеграция искусственного интеллекта в цифровые транспортные сервисы: аналитический обзор применения нейронных сетей в логистике // Лучшая студенческая статья 2025. – Пенза, 2025. – С. 48-52.

5) Косоногова, Л.Г. Современные технологии ис**к**усственного интеллекта в транспортной отрасли / Л.Г. Косоногова, Г.И. Нечаев, А.С. Короташ // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 6 (48). – С. 86-93.

6) Тюрина, О.Д. Применение искусственного интеллекта в управлении транспортом / О.Д. Тюрина, А.Д. Тюрина, Я.Д. Чуркин // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных (15-18 апреля 2024 года). – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2024. – С. 148-151.

7) Харитонов, С.О. Искусственный интеллект для оптимизации городского управления и улучшения инфраструктуры // Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании. Т.2: сборник статей II Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием (14-15 ноября 2024 года). – Брянск: РИСО БГУ, 2025. – С. 110-115.

УДК 004.85

АДАПТИВНАЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА КАК МЕХАНИЗМ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНОСТЬЮ МОДЕЛИ

А.Р. Зайнагутдинов, А.В. Иванов

Научный руководитель - **Т.П. Никитина**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В работе рассматривается проблема регуляризации моделей градиентного бустинга, применяемых для решения задач классификации и регрессии на табличных данных. Показано, что традиционный подход, основанный на использовании фиксированных гиперпараметров, не учитывает итеративную природу построения ансамбля и различие ролей отдельных этапов обучения. Предлагается концепция адаптивной регуляризации, при которой параметры модели изменяются в процессе обучения в зависимости от состояния ансамбля и динамики целевой метрики. Рассматриваются механизмы динамического изменения шага обучения, адаптации глубины базовых алгоритмов и модифицированной ранней остановки на основе анализа тренда метрики качества. Обосновывается, что такой подход позволяет более эффективно контролировать сложность модели и снижать риск переобучения. Отмечается связь адаптивной регуляризации с современными методами автоматизации машинного обучения и оптимизации гиперпараметров.

Ключевые слова: *градиентный бустинг, регуляризация, адаптивная регуляризация, переобучение, learning rate, ранняя остановка, ансамблевые методы, машинное обучение*

ADAPTIVE REGULARIZATION OF GRADIENT BOOSTING AS A MECHANISM FOR DYNAMIC CONTROL OF MODEL COMPLEXITY

A.R. Zaynagutdinov, A.V. Ivanov

Scientific Supervisor – **T.P. Nikitina**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This paper examines the problem of regularizing gradient boosting models used to solve classification and regression problems on tabular data. It is shown that the traditional approach, based on fixed hyperparameters, does not account for the iterative nature of ensemble construction and the distinct roles of individual training stages. A concept of adaptive regularization is proposed, in which model parameters are modified during training depending on the ensemble state and the dynamics of the target metric. Mechanisms for dynamically changing the training step, adapting the depth of base algorithms, and implementing a modified early stopping mechanism based on quality metric trend analysis are discussed. It is argued that this approach allows for more effective control of model complexity and reduces the risk of overfitting. The connection between adaptive regularization and modern methods of automated machine learning and hyperparameter optimization is noted.

Keywords*: gradient boosting, regularization, adaptive regularization, overfitting, learning rate, early stopping, ensemble methods, machine learning*

Градиентный бустинг относится к числу наиболее эффективных ансамблевых методов машинного обучения при работе с табличными данными [4]. Его высокая точность обусловлена способностью поэтапно уточнять модель за счёт последовательного добавления базовых алгоритмов. Однако значительная выразительная способность ансамбля обуславливает риск переобучения, что делает регуляризацию центральным элементом практического применения метода [1].

В современных библиотеках градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM, CatBoost) регуляризация традиционно реализуется через фиксированный набор гиперпараметров: шаг обучения, глубину деревьев, число итераций и процедуры ранней остановки [3]. Такой подход предполагает, что параметры выбираются до начала обучения и остаются неизменными на протяжении всего процесса построения ансамбля. При этом он не учитывает различие ролей отдельных этапов обучения: ранние итерации направлены на

выявление глобальных закономерностей, тогда как поздние итерации выполняют функцию уточнения модели и более чувствительны к шуму. Вследствие этого использование одинаковых параметров на всех этапах может приводить либо к недообучению, либо к избыточной адаптации модели. Между тем динамический характер бустинга как итеративной процедуры позволяет рассматривать регуляризацию не как статическую настройку, а как адаптивный механизм управления сложностью модели.

Градиентный бустинг строит итоговую модель в виде аддитивной композиции базовых алгоритмов:

$$F_M(x) = F_0(x) + \sum_{m=1}^{M} \gamma_m \, h_m(x),$$

где $F_0(x)$ – начальное приближение; $h_m(x)$ – базовая модель на m-й итерации; γ_m – коэффициент её вклада; M – число итераций [4]. Обновление ансамбля осуществляется по правилу

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \nu\gamma_m h_m(x),$$

где ν – шаг обучения. В классическом варианте ν = const, что отражает традиционную интерпретацию регуляризации как фиксированной настройки параметров. Однако вклад различных итераций в итоговую модель неодинаков, а значит, и влияние параметров должно изменяться в процессе обучения, что открывает возможность их адаптивной корректировки.

Адаптивная регуляризация предполагает, что параметры становятся функциями номера итерации или состояния модели. В частности, шаг обученияν может изменяться по мере роста ансамбля. На ранних этапах допустимо использование большего значения для быстрого приближения к оптимальной области, тогда как на поздних итерациях шаг уменьшается, обеспечивая более плавную настройку и снижая риск переобучения. Такой подход согласуется с наблюдениями о высокой чувствительности модели к величине learning rate [1, 5], однако принципиальное отличие состоит в том, что параметр перестаёт быть фиксированным и становится управляемым во времени. Дополнительно изменение шага обучения позволяет контролировать дисперсию модели: уменьшение ν на поздних этапах снижает вариативность предсказаний и повышает устойчивость ансамбля.

Дополнительно следует отметить, что адаптивная регуляризация может распространяться и на стохастические компоненты обучения. В частности, доля подвыборки объектов и признаков (subsample, colsample) может изменяться по мере итераций. На ранних этапах использование большей выборки способствует выявлению глобальных закономерностей, тогда как на поздних этапах уменьшение подвыборки повышает разнообразие базовых моделей и снижает их коррелированность. Такой механизм дополнительно усиливает регуляризующий эффект за счёт введения контролируемой случайности и может рассматриваться как динамическое обобщение стохастического градиентного бустинга [1].

Аналогичная логика применима к структурным характеристикам базовых алгоритмов. В стандартной практике глубина деревьев задаётся заранее и остаётся неизменной [3]. Между тем начальные итерации ансамбля ориентированы на выявление глобальных закономерностей, что допускает использование более сложных деревьев. По мере накопления модели возникает необходимость ограничивать её выразительность, чтобы предотвратить подгонку под шум. В этом случае глубина деревьев может адаптивно уменьшаться, что позволяет дифференцированно регулировать сложность базовых компонентов ансамбля. С точки зрения теории машинного обучения это соответствует управлению балансом смещения и дисперсии: более глубокие деревья уменьшают смещение, тогда как их последующее упрощение снижает дисперсию модели. Дополнительно возможно учитывать структуру ошибок модели: при наличии сложных нелинейных зависимостей глубина может временно увеличиваться, что делает адаптацию ещё более гибкой.

Существенное изменение претерпевает и механизм ранней остановки. Традиционно обучение прекращается при отсутствии улучшения метрики в течение фиксированного числа

итераций [2]. В адаптивной постановке учитывается не только факт отсутствия улучшения, но и характер изменения метрики. В задачах классификации и регрессии в качестве таких метрик могут выступать LogLoss, AUC или RMSE, отражающие качество обобщения модели на валидационных данных [2, 4]. При этом важным становится не только значение метрики, но и скорость её изменения: замедление улучшения может свидетельствовать о достижении предела обобщающей способности модели. Если наблюдается устойчивое замедление роста качества или увеличение его нестабильности, процесс обучения может быть завершён раньше. Напротив, при наличии положительного тренда допускается продолжение обучения, даже если краткосрочные улучшения отсутствуют. Таким образом, анализируется не абсолютное значение метрики, а её динамика, что позволяет более точно выявлять момент начала переобучения.

Важно отметить, что адаптивная регуляризация влияет не только на процесс обучения, но и на обобщающую способность модели. Динамическое изменение параметров позволяет избежать ситуаций, при которых модель либо чрезмерно упрощается, либо излишне усложняется на отдельных этапах. Это приводит к более устойчивому поведению ансамбля на новых данных и снижает чувствительность к шуму в обучающей выборке. В результате модель демонстрирует более стабильные значения метрик качества на независимых выборках, что является ключевым критерием её практической применимости [5].

Таким образом, регуляризация в градиентном бустинге может рассматриваться не как набор фиксированных гиперпараметров, а как динамическая система управления сложностью модели. В отличие от традиционного подхода, адаптивная регуляризация обеспечивает согласованное изменение параметров в процессе обучения, учитывая вклад каждой итерации в формирование ансамбля. Это позволяет повысить устойчивость модели и улучшить её обобщающую способность без существенного усложнения процедуры настройки.

Дополнительно следует отметить, что предложенный подход тесно связан с современными методами автоматизации машинного обучения. Адаптивная регуляризация может рассматриваться как шаг в сторону AutoML, где управление параметрами модели частично переносится с этапа предварительного подбора на сам процесс обучения. Это открывает возможности интеграции с методами оптимизации гиперпараметров, такими как байесовская оптимизация или алгоритмы поиска, реализованные в системах автоматического подбора моделей, что делает обучение более гибким и менее зависимым от ручной настройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Никитина Т.П. Алгоритмы и их реализация в C++ / Т.П. Никитина. – Ярославль: ЯГТУ, 2018. – 172 с.

2) Shwartz-Ziv, R. Tabular data: Deep learning is not all you need / R. Shwartz-Ziv, A. Armon // Information Fusion. – 2022. – Vol. 81. – P. 84–90.

3) Practical guidelines for the use of gradient boosting for molecular property prediction / D. Boldini [et al.] // Journal of Cheminformatics. – 2023. – Vol. 15 (1). – Art. 73.

УДК 004.8

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ РАЗРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ: ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ

Э.А. Зорина, О.А. Аничкина

Научный руководитель **- Е.И. Воеводина**, ст. преподаватель,
И.С. Басалов, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается применение методов машинного обучения (МО) как ключевого инструмента цифровой трансформации в области материаловедения, с акцентом на многокомпонентные фотополимерные системы, применяемые в технологиях аддитивного производства. Проанализированы современные алгоритмы МО – от случайных до глубокого обучения – в контексте прогнозирования механических, тепловых и физических свойств полимерных материалов. Рассмотрены стратегии формирования обучающих выборок, методы молекулярных дескрипторов, проблемы качества данных и интерпретируемости моделей.

***Ключевые слова**: машинное обучение, фотополимеры, аддитивное производство, предиктивное моделирование, цифровая трансформация, многокомпонентные системы, прогнозирование свойств материалов*

DIGITAL TRANSFORMATION OF MATERIALS DEVELOPMENT: APPLICATION OF MACHINE LEARNING MODELS FOR PREDICTIVE ANALYSIS OF PROPERTIES OF MULTICOMPONENT PHOTOPOLYMER SYSTEMS

E.A. Zorina, O.A. Anichkina

Scientific Supervisor – **E.I. Voevodina**, Senior Lecturer,
I.S. Basalov, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article examines the application of machine learning (MO) methods as a key tool for digital transformation in the field of materials science, with an emphasis on multicomponent photopolymer systems used in additive manufacturing technologies. Modern MO algorithms, ranging from random to deep learning, are analyzed in the context of predicting the mechanical, thermal, and physical properties of polymer materials. Strategies for the formation of training samples, methods of molecular descriptors, problems of data quality and interpretability of models are considered.

***Keywords**: machine learning, photopolymers, additive manufacturing, predictive modeling, digital transformation, multicomponent systems, prediction of material properties*

Разработка новых полимерных материалов традиционно опирается на длительные серии экспериментов, основанных на принципе проб и ошибок. Этот подход сопряжен с высокими трудозатратами и стоимостью, особенно в случае многокомпонентных систем с большим числом степеней свободы – таких как тройные и четвертичные фотополимерные рецептуры, используемые в аддитивном производстве (АМ). Машинное обучение (МО) предлагает принципиально иную парадигму: анализ накопленных данных, выявление скрытых структурно-свойственных зависимостей и построение прогностических моделей, способных существенно сократить экспериментальный цикл [6].

Особую актуальность данная проблематика приобретает в контексте фотополимерных систем, применяемых при фотополимеризации в ванне (Vat Photopolymerization), стереолитографии (SLA) и цифровой светодиодной печати (DLP). Многокомпонентный

характер таких систем – сочетание жёстких и эластомерных мономеров, фотоинициаторов, функциональных добавок – порождает огромное композиционное пространство, систематическое исследование которого экспериментальными методами нецелесообразно [1]. Именно здесь МО демонстрирует наибольший потенциал: оно позволяет навигировать в многомерном пространстве составов, предсказывая ключевые свойства – модуль Юнга, прочность при растяжении, предельную деформацию, твёрдость – с точностью, сопоставимой с экспериментальной.

Процессы цифровой трансформации, охватывающие ведущие промышленные предприятия мира, создают институциональный контекст для внедрения МО-технологий в производственные и исследовательские цепочки. В России данное направление также становится приоритетным: анализ цифровых инициатив отечественных промышленных компаний выявляет как значительный потенциал, так и специфические системные барьеры для перехода к данно-ориентированным методам разработки материалов [12].

Фотополимерные системы для АМ представляют собой сложные многокомпонентные смеси, в которых итоговые свойства отверждённого материала определяются как химической природой составляющих, так и параметрами процесса фотополимеризации. С точки зрения МО-моделирования, данные системы характеризуются следующими особенностями:

Во-первых, высокой размерностью входного пространства. Состав определяется долями нескольких мономеров (в случае тройных систем – трёх компонентов с двумя независимыми переменными на симплексе), типом и концентрацией фотоинициатора, наличием модификаторов. Параметры процесса – интенсивность и длина волны излучения, толщина слоя, время экспозиции – добавляют дополнительные измерения [3]. Совокупное пространство признаков оказывается весьма высоким, что требует применения методов снижения размерности или специальных стратегий выборки.

Во-вторых, нелинейными взаимозависимостями между компонентами. Сополимеризация в тройных системах приводит к нелинейным и неаддитивным зависимостям свойств от состава, что делает линейные модели принципиально недостаточными и требует применения нелинейных алгоритмов – ансамблевых методов, нейронных сетей или ядерных методов [2]. Согласно имеющимся данным, хорошо настроенные искусственные нейронные сети, ансамбли деревьев и регрессия на опорных векторах обеспечивают ошибку прогнозирования прочности и модуля упругости менее 5–10% [3].

В-третьих, малым объёмом размеченных данных. Экспериментальное измерение механических характеристик отвержденных образцов – ресурсоемкая процедура, требующая 3D-печати образцов, проведения испытаний и обработки данных. В результате обучающие выборки нередко насчитывают десятки, а не тысячи точек, что предъявляет особые требования к выбору алгоритмов и методов регуляризации [8]. Именно в этом контексте стратегия активного обучения (Active Learning, AL) приобретает ключевое значение – она позволяет интеллектуально выбирать наиболее информативные точки для следующего экспериментального шага, минимизируя общее число опытов при максимальной информационной ценности каждого нового измерения [1].

Среди традиционных алгоритмов МО наибольшее распространение в задачах прогнозирования свойств полимеров получили случайные леса (Random Forest, RF), метод опорных векторов (SVR) и регрессия Ridge. Исследования демонстрируют, что метод Random Forest обеспечивает наилучшие результаты при предсказании тепловых характеристик полимеров: коэффициент детерминации R^2 достигает 0,71 для температуры стеклования, 0,73 для температуры термического разложения и 0,88 для температуры плавления [9]. Ансамблевые методы, основанные на агрегировании множества деревьев решений, демонстрируют устойчивость к переобучению и хорошую обобщающую способность даже при ограниченных обучающих выборках.

Ядерная регрессия (Kernel Ridge Regression, KRR) также зарекомендовала себя как эффективный инструмент для построения интерпретируемых предсказательных моделей

механических свойств пористых структур, напечатанных на 3D-принтере. В работе [2] показано, что KRR-модель, обученная на экспериментальных данных для гироидных решёток, обеспечивает точность, сопоставимую с численным моделированием методом конечных элементов, при на порядки меньших вычислительных затратах. Простота интерпретации таких моделей – важное достоинство для практического применения в промышленности.

Искусственные нейронные сети (ANN) и архитектуры глубокого обучения открывают доступ к многомасштабному моделированию полимерных систем: от молекулярного уровня до макроскопических свойств. Их применение особенно перспективно при наличии достаточно больших обучающих выборок и разнородных входных данных – молекулярных дескрипторов, параметров процесса, структурных характеристик [4]. Графовые нейронные сети (GNN) позволяют работать непосредственно с молекулярными структурами, представленными в виде графов, обходя необходимость ручного конструирования дескрипторов.

В контексте многокомпонентных фотополимерных систем нейронные сети способны улавливать нелинейные взаимодействия между мономерами при сополимеризации, выходящие за пределы возможностей линейных или слабонелинейных моделей. Вместе с тем глубокое обучение предъявляет высокие требования к объему и качеству данных, а также сопряжено с проблемами интерпретируемости – одним из ключевых ограничений для внедрения в регулируемых отраслях [7].

Активное обучение (AL) занимает особое место в задачах разработки новых материалов, поскольку напрямую адресует проблему дефицита данных. В стратегии AL алгоритм итеративно выбирает наиболее информативный состав для следующего эксперимента, руководствуясь критериями неопределенности (uncertainty sampling) или ожидаемого улучшения целевой функции (expected improvement). Такой подход позволяет эффективно картировать пространство мономерных составов, достигая надежной предсказательной точности при минимальном числе опытов [1].

Демонстративным примером является работа, в которой AL-алгоритм применялся для исследования тройного мономерного пространства – от жёстких до эластомерных полимеров. Разработанная МО-модель позволила прогнозировать состав, обеспечивающий заданное значение модуля Юнга с точностью не менее 10% [1]. На основе выбранных составов была успешно напечатана многоматериальная конструкция («рука» с мягкой «кожей» и жёсткими «костями»), наглядно демонстрирующая практическую применимость подхода. Это подтверждает, что AL в сочетании с МО-суррогатами способен кардинально ускорить материальный скрининг в пространстве фотополимерных рецептур.

В более широком контексте вычислительного материаловедения активное обучение рассматривается как механизм снижения зависимости МО-моделей от больших наборов данных, а моделирование – как критически важный инструмент генерации данных мгновенно [8]. Интеграция AL с методами молекулярной динамики или квантово-химическими расчётами открывает путь к замкнутым системам автономного проектирования материалов.

Качество предсказательных МО-моделей критически зависит от адекватного представления входных данных. Для полимерных систем разработан широкий арсенал молекулярных дескрипторов и методов представления признаков, охватывающих конституциональные, топологические, геометрические и электронные характеристики мономеров и полимерных цепей [5]. В задачах предсказания свойств фотополимеров основными классами входных переменных выступают:

Мольные или массовые доли компонентов в рецептуре – простейшее и наиболее непосредственное представление состава для тройных или многокомпонентных систем. Несмотря на кажущуюся упрощённость, такое представление в сочетании с нелинейными алгоритмами позволяет строить точные модели при достаточном покрытии симплекса составов [1].

Молекулярные дескрипторы мономеров, рассчитываемые квантово-химическими или хемоинформатическими методами (HOMO/LUMO энергии, дипольный момент, топологические индексы). Их преимущество – способность переноса модели (transfer learning) на новые, не представленные в обучающей выборке мономеры [4]. Параметры процесса полимеризации – энергозатраты, высота слоя, ориентация построения – особенно важны для аддитивного производства, где технологические режимы существенно влияют на итоговые свойства [3].

Стандартизация и очистка данных являются необходимыми этапами перед обучением моделей: удаление выбросов, нормализация признаков, обработка пропущенных значений. Отсутствие стандартизированных метрик ошибок и несогласованные протоколы измерений – одна из главных причин сложности сравнения моделей между различными исследовательскими группами [5].

Модуль Юнга, предел прочности при растяжении, деформация при разрыве и твёрдость – наиболее востребованные мишени для МО-моделирования в задачах аддитивного производства. Для тройных фотополимерных систем было показано, что МО-модель, обученная на данных активного обучения, способна предсказывать модуль Юнга с точностью ±10% от целевого значения [1]. Для пористых структур (гироидных решёток из фотополимеров) ядерная регрессия позволяет быстро прогнозировать механические свойства в зависимости от пористости и типа материала матрицы без необходимости дорогостоящего численного моделирования [2].

Важно отметить, что большинство существующих МО-моделей сосредоточены на статических механических свойствах. Прогнозирование усталостных характеристик, ударной стойкости и деградационного поведения – значительно менее исследованная область, в которой дефицит данных ощущается особенно остро [3]. Это ограничение критично для применений, где материал подвергается циклическим нагрузкам или агрессивным средам.

Температура стеклования (*Tg*), температура термического разложения и температура плавления – ключевые характеристики, определяющие область применения фотополимерных материалов. Метод Random Forest продемонстрировал наилучшие результаты в их предсказании по структурным дескрипторам полимера: R^2 = 0,71–0,88 в зависимости от свойства [9]. Для эластомерных фотополимерных систем точное предсказание Tg критически важно для обеспечения эластичности и функционирования при рабочих температурах.

Практические задачи разработки фотополимерных материалов, как правило, являются многокритериальными: требуется одновременная оптимизация механической прочности, эластичности, тепловой стабильности и, возможно, биосовместимости или экологической безопасности. Подходы многоцелевой оптимизации на основе МО – методы Парето-фронта, многозадачное обучение, генеративные модели – позволяют системно исследовать компромиссы между свойствами и выявлять составы, лежащие на границе технологически достижимого [4]. Эта стратегия открывает путь к рациональному дизайну фотополимеров с заранее заданным сочетанием характеристик.

Применение МО не ограничивается предсказанием свойств отверждённых материалов – оно охватывает весь технологический цикл аддитивного производства. На этапе разработки рецептуры МО-суррогаты обеспечивают быстрый скрининг мономерных пространств и выбор составов с требуемыми свойствами. На этапе оптимизации процесса модели типа нейронных сетей и деревьев градиентного бустинга связывают технологические параметры (высота слоя, энергозатраты, ориентация построения) с конечными механическими характеристиками деталей [3].

Особую роль МО играет в контроле качества при АМ: обнаружение дефектов, прогнозирование пористости, мониторинг процесса *in situ* с использованием методов компьютерного зрения и анализа акустических сигналов. Применительно к полимерным композитам – в том числе армированным фотополимерным матрицам – МО-алгоритмы успешно снижают частоту дефектов и ускоряют разработку новых материалов [7].

Интеграция МО с системами автоматизированного проектирования (CAE/CAD) и численного моделирования (CFD, МКЭ) формирует цифровые двойники производственного процесса, способные в реальном времени адаптировать параметры печати к изменяющимся условиям [10].

В контексте замкнутых систем автономного материалостроения (self-driving laboratories) МО является ключевым звеном, объединяющим роботизированный синтез, автоматическое тестирование и вычислительный отбор кандидатов. Для фотополимерных систем такой подход означает автоматизацию полного цикла: от смешивания мономеров и фотополимеризации образцов до механических испытаний и выбора следующей рецептуры на основе AL-алгоритма [4].

Несмотря на значительный прогресс, широкое промышленное внедрение МО в разработку фотополимерных материалов сдерживается рядом системных проблем. Во-первых, дефицит данных: экспериментальные базы данных по свойствам фотополимерных многокомпонентных систем остаются небольшими, фрагментированными и несовместимыми между собой из-за различий в протоколах синтеза и тестирования [7]. Создание публичных стандартизированных репозиториев данных – критически важная инфраструктурная задача для сообщества.

Во-вторых, интерпретируемость моделей. Большинство высокоточных МО-алгоритмов – глубокие нейронные сети, ансамблевые методы – являются «черными ящиками», что затрудняет их принятие материаловедами, привыкшими к физически интерпретируемым моделям. Развитие методов объяснимого ИИ (XAI) – SHAP-анализ, LIME, методы внимания – призвано преодолеть этот барьер [5]. В-третьих, разрыв между моделированием и экспериментом. Даже при высоких показателях R^2 на тестовой выборке модели могут демонстрировать неудовлетворительную точность при переходе к новым классам мономеров или условиям процесса, выходящим за область обучения. Интеграция физических ограничений в архитектуру модели (physics-informed ML) рассматривается как перспективный путь к повышению обобщающей способности [8].

Отдельную проблему представляет ограниченный охват квазистатических явлений: усталости, ударного нагружения, влагопоглощения и фотодеградации. Расширение МО-подходов на эти критически важные для практики режимы нагружения требует специализированных протоколов сбора данных и, возможно, физико-информированных архитектур моделей [3].

Цифровая трансформация промышленных предприятий создаёт необходимые предпосылки для внедрения МО-технологий в разработку материалов. Анализ процессов цифровизации российской промышленности выявляет ключевые тренды: развитие цифровой инфраструктуры, автоматизация производства, внедрение систем промышленного интернета вещей (IIoT) и аналитики больших данных [12]. Вместе с тем идентифицируются и существенные препятствия: дефицит кадров, способных работать на стыке материаловедения и МО, недостаточное развитие отраслевых баз данных, а также организационные барьеры при внедрении цифровых инструментов на производстве.

Применительно к разработке эластомерных и фотополимерных материалов отечественными исследователями апробированы технологии онтологических моделей деятельности (Business Ontology) для рецептуростроения резин, а также методы аналитики больших данных для оптимизации состава эластомерных материалов на основе синтетического полиизопрена [11]. Эти опыты свидетельствуют о принципиальной применимости МО-методологии в отечественных условиях и намечают контуры дальнейшего развития – прежде всего в направлении создания отраслевых баз данных и разработки специализированных инструментов для конкретных классов материалов.

Для успешного внедрения МО-подходов в практику разработки фотополимерных систем необходима реализация комплекса мер: создание стандартизированных протоколов экспериментального тестирования и баз данных материальных свойств; подготовка специалистов в области вычислительного материаловедения; развитие открытого

программного обеспечения для работы с полимерными данными; выстраивание взаимодействия между академическими исследовательскими группами и промышленными предприятиями в формате открытых инноваций.

Применение методов машинного обучения к предиктивному анализу свойств многокомпонентных фотополимерных систем представляет собой одно из наиболее перспективных направлений цифровой трансформации материаловедения. Современный арсенал МО-алгоритмов – от случайных лесов и ядерной регрессии до глубокого обучения и активного обучения – в принципе позволяет решать задачи прогнозирования механических, тепловых и функциональных свойств фотополимеров с точностью, достаточной для практического применения [1]. Стратегия активного обучения является особенно ценной в условиях малых данных, характерных для экспериментальной химии полимеров, поскольку позволяет интеллектуально управлять экспериментальным циклом и строить надёжные модели при минимальном числе опытов.

Вместе с тем для реализации полного потенциала МО в данной области необходимо преодолеть ряд системных ограничений: дефицит стандартизированных данных, низкую интерпретируемость сложных моделей и недостаточный охват нестатических режимов нагружения. Ответами на эти вызовы служат развитие физико-информированного машинного обучения, создание публичных баз данных и применение методов XAI для повышения доверия к МО-предсказаниям со стороны материаловедческого сообщества [5]. В перспективе интеграция МО с роботизированными платформами синтеза и тестирования позволит реализовать полностью автономные циклы разработки фотополимерных материалов – от молекулярного дизайна до готовой функциональной детали, напечатанной методами аддитивного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Machine-Guided Discovery of Acrylate Photopolymer Compositions/ J. Ayush, A. Connor, J. Roshan, R. Rampi, Qi Jerry // ACS Applied Materials & Interfaces – 2024. – Vol. 16, no. 14. – P. 17992–18000. – URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38534124/ (дата обращения: 07.04.2026).

2) Prediction of tensile performance for 3D printed photopolymer gyroid lattices using structural porosity, base material properties, and machine learning / J. Peloquin, A. Kirillova, C. Rudin, L.C. Brinson, K. Gall // Materials & Design. – 2023. – Vol. 232. – Article 112126. – URL: https://colab.ws/articles/10.1016%2Fj.matdes.2023.112126 (дата обращения: 07.04.2026).

3) Machine Learning for Predicting Mechanical Properties of 3D-Printed Polymers from Process Parameters: A Review / S. Koltsakidis, E.K. Tzimtzimis, D. Tzetzis // Polymers. – 2026. – Vol. 18, no. 4. – Article 499. – URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12944521/ (дата обращения: 07.04.2026).

4) Machine learning in polymer science: A new lens for physical and chemical exploration / Xiaoqin Cao, Yongqing Zhang, Zhenghua Sun, Hongyao Yin, Yujun Feng // Progress in Materials Science. – 2026. – Vol. 156. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079642525001227 (дата обращения: 07.04.2026).

5) Applications of Machine Learning in Polymer Materials: Property Prediction, Material Design, and Systematic Processes / G. Hongtao, L. Shuai, L. Shu // Computers, Materials & Continua. – 2026. – Vol. 87, no. 3. – URL: https://www.techscience.com/cmc/online/detail/25897 (дата обращения: 08.04.2026).

6) Machine learning applied to the design and optimization of polymeric materials: A review / S. Pai, K. Shah, S. Sunder, R. Albuquerque, C. Brütting, H. Ruckdaeschel // Next Materials. – 2025. – Vol. 7. – Article 100449. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949822824003472 (дата обращения: 08.04.2026).

7) Machine learning revolutionizing polymer composite development and optimization / K. Manickaraj, T. Ramakrishnan, P. Sivasubramanian, N. Sudha, E.S.M. Ehab, A. Nadir // Journal of Materials Chemistry A. – 2025. – URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/ta/d5ta00982k (дата обращения: 08.04.2026).

8) Sobin, A. Computational methods and machine learning for materials discovery and design / A. Sobin, J. Meng, L. Tengfei // MRS Bulletin. – 2025. – Vol. 50. – P. 1212–1224. – URL: https://link.springer.com/article/10.1557/s43577-025-00959-y (дата обращения: 08.04.2026).

9) Estimation and Prediction of the Polymers' Physical Characteristics Using the Machine Learning Models / I. Malashin, V. Tynchenko, A. Gantimurov, V. Nelyub, A. Borodulin // Polymers. – 2023. – Vol. 16. – URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38201778/ (дата обращения: 08.04.2026).

10) Machine learning for the modelling of manufacturing processes for polymer composites / S. Cassola, M. Duhovic, T. Schmidt, D. May // Composites Part B: Engineering. – 2022. – Vol. 246. – Article 110208. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836822005820 (дата обращения: 08.04.2026).

11) Применение технологий цифровой трансформации в процессе разработки эластомерных материалов / Л.Р. Люсова, С.В. Чернышов // Производство и использование эластомеров. – 2022. – №3-4. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologiy-tsifrovoy-transformatsii-v-protsesse-razrabotki-elastomernyh-materialov (дата обращения: 09.04.2026).

12) Инновационные подходы к цифровой трансформации в современной промышленности России: перспективы и вызовы / А.Х. Казанбиева, А.Д. Гасанова // Вестник Академии знаний. – 2024. – №3 (62). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-podhody-k-tsifrovoy-transformatsii-v-sovremennoy-promyshlennosti-rossii-perspektivy-i-vyzovy (дата обращения: 09.04.2026).

13) Ключевые глобальные тренды рынка цифрового инверсного проектирования / А.А. Крутов, Е.А. Бычков, Е.И. Воеводина, А.М. Сальников // Теоретическая экономика. – 2025. – №11(131). – С. 163–181. – DOI: 10.52957/2221-3260-2025-11-163-181.

УДК 519.688

АЛГОРИТМ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СОПЕРНИКА В ИГРЕ «КОРИДОР»

А.О. Карпунин

Научный руководитель – **А.В. Николаев,** д-р физ.-мат. наук

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

В работе рассматривается алгоритм для управления стратегией противника в игре «Коридор». Суть этой игры состоит в том, чтобы довести свою фишку до противоположной стороны поля быстрее, чем это сделает соперник. Описываются такие методы, как Минимакс и его улучшенная версия – альфа-бета отсечение, а также их применение в данной задаче.

***Ключевые слова**: коридор, альфа-бета отсечение, Минимакс, игровые алгоритмы*

AUTOMATIC BEHAVIOR ALGORITHM IN THE “QUORIDOR” GAME

A.O. Karpunin

Scientific Supervisor – **A.V. Nikolaev,** Doctor of Physics and Mathematics Sciences

P.G. Demidov Yaroslavl State University

The paper examines different automatic behavior algorithms in the “Quoridor” game. Both players have to beat each other in making their pawn reach opposite side of the game field faster than the opponent. Such methods as alpha-beta pruning and Minimax are described in the text below.

***Keywords**: quoridor, alpha-beta pruning, Minimax, game algorithms*

Введение

Настольная игра «Коридор» была выпущена в 1997 году. Ее создатель Мирко Маркези создал ее на основе другой своей игры под названием «Блокада», которая, в свою очередь, была выпущена в 1995 году.

Правила игры (рис. 1) таковы: каждый игрок должен довести свою фишку до противоположной стороны квадратного игрового поля быстрее соперника. На каждом ходу есть выбор – усложнить путь противника через строительство преграды на его пути или же продвинуть свою фишку на одну из смежных клеток, таким образом став ближе к достижению конечной цели. Количество таких преград, или стен, у каждого игрока ограничено. Однако нельзя строить стены в любом месте поля – они не должны пересекаться, а также блокировать возможность дойти до победной стороны поля ни одному из игроков. Поскольку поле квадратное, существуют вариации игры как на двух, так и на четырех игроков, причем правила в зависимости от количества игроков не меняются [2].

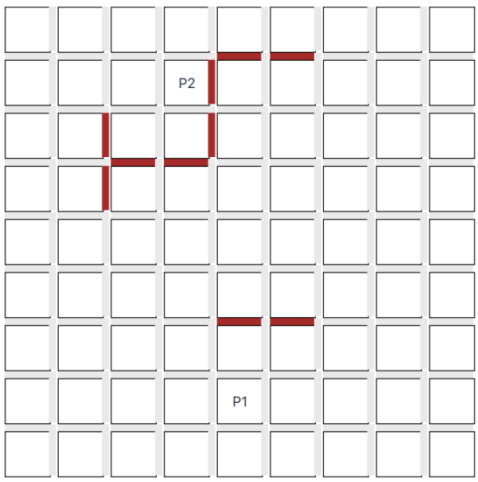


Рис. 1. Пример партии в игре «Коридор»

В 1998 году «Коридор» получила титул игры года по версии американского журнала “Games”[1]. Игра завоевала такую большую популярность, что даже некоторые образовательные учреждения приняли решение использовать ее в образовательном процессе.

1. Первая версия алгоритма стратегического поведения противника

При инициализации игры пользователь должен сделать выбор относительно сложности алгоритма, против которого ему предстоит играть. От этого параметра зависит ограничение времени до приемлемых значений, в течение которого противник должен будет предоставить свой ход. Это сделано для того, чтобы можно было по-настоящему играть, а не проводить большую часть партии в ожидании ходов алгоритма. Помимо этого, от сложности зависит и глубина анализа партии на текущем ходу по формуле

$$depth = k \cdot N \div N_0, \quad (1)$$

где $depth$ – изменяемая глубина поиска, N – выбранный размер игрового поля, N_0 –размер стандартного игрового поля, а k – параметр, который принимает различные значения в соответствии с выбранной сложностью игры.

В начале разработки модуля стратегического поведения противника в игре «Коридор» выбор пал на алгоритм Minimax [3]. Его основой является итерирование по глубине поиска, начиная с минимальной, то есть одного шага, и до максимального значения, которое вычислено ранее. На каждой итерации сохраняется лучший на текущий момент ход алгоритма, который и будет сыгран в случае, если все итерации пройдут или время, которое было выделено на поиск лучшего ответа, подойдет к концу.

Каждая итерация состоит из нескольких шагов:

1. Алгоритм получает все возможные ходы с текущей клетки игрового поля. Важно заметить, что учитываются все возможные передвижения фишки, но не все потенциальные расположения стен на поле, а лишь те, что улучшат его оценку, то есть усложнят путь противнику. Также все стены проверяются на предмет возможности ее строительства на выбранных клетках поля. Для этого проверяется наличие пути обоих игроков к их победным позициям в случае, если предполагаемая стена будет построена и проверке наличия стен у игрока, поскольку по правилам игры количество стен ограничено. Проверка наличия пути игрока до нужной ему границы поля реализована через поиск в ширину.

2. Рассматриваться будет не весь полученный список, поскольку можно выбрать лучшие ходы из полученных. Для этого они сортируются путем применения специальной функции оценки: высчитывается разница между длинами кратчайших путей игрока и соперника, количество возможных ходов игрока, то есть его мобильность на поле, а также разница между оставшимся количеством стен. Затем каждому из этих значений присваивается вес, с помощью которого можно влиять на предпочтение алгоритма в выборе следующего хода. В итоге все результаты предыдущих расчетов складываются и формируют так называемую оценку потенциального хода:

$$S = (D_e - D_m) \cdot 50 + M \cdot 3 + (W_e - W_m) \cdot 15,$$

где D_m – это длина кратчайшего пути текущего игрока, D_e – длина кратчайшего пути соперника, M – количество возможных ходов текущего игрока, $(W_e - W_m)$ – это разница между оставшимся количеством стен у обоих игроков, а значения, на которые умножаются переменные – это веса, которые можно настраивать для формирования поведения противника.

В итоге уже из преобразованного списка отбираются первые двадцать записей – именно они и будут рассмотрены.

3. Для каждого из отобранных ходов создается копия доски «Коридор», на которой будет применен текущий рассматриваемый вариант передвижения фишки или строительства стены.

4. Вызывается рекурсивная функция (алг. 1), являющаяся главной в алгоритме. На вход в нее подается глубина анализа хода. В зависимости от того, какой игрок в текущий

момент должен ходить, функция будет высчитывать оценку этого хода, а именно, если текущий ход принадлежит алгоритму, вычисляется максимальная оценка, иначе – минимальная. Глубина анализа хода влияет на количество будущих ходов, чьи оценки формируют оценку хода, который рассматривается на текущей итерации главного цикла.

В функции (алг. 1) $depth$ – это глубина поиска, $maximizingScore$ – показатель максимизации или минимизации оценки, $getMoves()$ и $applyMove()$ – функции получения всех возможных ходов и применения хода соответственно, а $evaluate()$ – функция оценки, описанная в пункте 2.

5. После рассмотрения всевозможных вариантов передвижений фишки или строительства преград для противника на текущей итерации, выбирается тот ход, для которого рекурсивная функция $minimax()$ определила наивысшую оценку. Такой ход будет сохранен, если соответствующая ему оценка лучше, чем оценка сохраненного до этой итерации хода.

Когда будет достигнут лимит времени или перебор всевозможных ходов подойдет к концу, записанный в соответствующее поле, лучший ход игрока будет применен на доске игры «Коридор» и ход перейдет следующему игроку.

```
function minimax(node, depth, maximizingScore)
   if depth = 0 then
return evaluate(node)
   if maximizingScore then
bestValue ← −∞
for move in getMoves(node) do
   child ←applyMove(node, move)
   value ← minimax(child, depth − 1, false)
bestValue ← max(bestValue, value)
end for
   else
bestValue ← +∞
for move in getMoves(node) do
   child ← applyMove(node, move)
   value ← minimax(child, depth − 1, true)
bestValue ← min(bestValue, value)
end for
   end if
return bestValue
end function
```

Алгоритм 1. Функция minimax

2. Вторая версия алгоритма стратегического поведения противника

У описанного применения алгоритма Minimax есть один недостаток, который был выявлен при тестировании алгоритма в игровом приложении «Коридор». Если на какой-то итерации проверки ветви ходов игроков становится понятно, что она менее выгодна, чем уже другая рассмотренная ветвь ходов игроков, или же наоборот, если она более выгодна сопернику, рассмотрение не завершится в этот же момент, а дойдет до логичного завершения и лишь в тот момент перейдет к следующему варианту хода. В связи с чем было принято решение применить улучшенный алгоритм – Alpha-Beta отсечений [3].

Чтобы решить проблему добавляются два параметра альфа и бета, в которых хранятся лучшие оценки для максимизирующего и минимизирующего игроков соответственно (алг. 2). Если в какой-либо итерации алгоритма становится понятно, что бета становится меньше альфа, то есть текущая рассматриваемая ветвь ходов игры не сможет улучшить свой результат, ее рассмотрение завершается и начинается выбор другого хода к рассмотрению.

Благодаря такой оптимизации путем отсечения заведомо худших ходов можно увеличить глубину анализа ветвей, причем тратить на это то же количество времени, что и при применении стандартного алгоритма Minimax. Вследствие чего рассматриваемый алгоритм в некоторых случаях может использовать более продуманную стратегию и иметь более высокие шансы на победу.

```
function alphabeta(node, depth, alpha, beta, maximizingScore)
if depth = 0 then
return evaluate(node)
   if maximizingScore then
      bestValue ← −∞
      for move in getMoves(node) do
         child ←applyMove(node, move)
         value ← max(value, alphabeta(child, depth − 1, alpha, beta, false))
         alpha ← max(alpha, value)
         if beta ≤ alpha then
            break
         end if
      end for
   else
bestValue ← +∞
      for move in getMoves(node) do
         child ← applyMove(node, move)
         value ← min(value, alphabeta(child, depth − 1, alpha, beta, true))
         beta ← min(beta, value)
         if beta ≤ alpha then
            break
         end if
      end for
   end if
return bestValue
end function
```

Алгоритм 2. Функция alphabeta

В рамках модуля игрового приложения «Коридор» это дает прирост в сложности. В ходе эксперимента каждому из алгоритмов было выделено 3 секунды на принятие решения на поле со стороной 11 клеток. Оба алгоритма достигли временного лимита, но метод Alpha-Beta отсечений достиг глубины анализа в 12 ходов, а Minimax–лишь 8, благодаря чему параметр k из функции вычисления глубины анализа партии (1) теперь принимает значения 7, 9 или 12 в зависимости от выбранного уровня сложности, в отличие от изначальных 4, 6 или 8.

Заключение

Во время разработки модуля стратегического поведения для игры «Коридор» были изучены основные механики данной игры, был подобран алгоритм, который может реализовать выбор ходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Games 100 // BoardGameGeek: [сайт]. – URL: https://boardgamegeek.com/wiki/page/Games_100 (дата обращения: 02.04.2026)

2) Правила игры // Quoridor[сайт]. – URL: https://hobbygames.ru/download/rules/Quoridor_Rules.pdf (дата обращения: 03.04.2026).

3) Russell, S.J. Adversarial Search and Games / S.J. Russell, P. Norvig // Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 4th ed., Global Edition. – Harlow: Pearson Education Limited, 2022. – Ch. 6. – P. 192–225.

УДК 004.8:681.5

ТРАНСЛЯЦИЯ НОТИРОВАННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ГРАФОВЫХ СТРУКТУР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ В СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПАКТНОЙ МОДЕЛИ T5

Д.Р. Каспирович, И.В. Тюкин

Научный руководитель – **И.В. Тюкин**, канд. техн. наук

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается собственная реализация компактной модели T5 для трансляции нотированных представлений графовых структур технологических схем в схемы автоматизации. Использована часть открытого набора данных. Описаны пользовательская токенизация, конфигурация модели и режим обучения. Показано, что компактная конфигурация T5 обеспечивает хорошее качество трансляции и может служить основой для дальнейшего развития интеллектуальных средств поддержки инженерного проектирования.

Ключевые слова: *технологическая схема, схема автоматизации, трансляция, нотированные представления, графовые структуры, компактная модель T5*

TRANSLATION OF NOTATED GRAPH REPRESENTATIONS OF PROCESS FLOW DIAGRAMS INTO PIPING AND INSTRUMENTATION DIAGRAMS USING A COMPACT T5 MODEL

D.R. Kaspirovich, I.V. Tyukin

Scientific Supervisor – **I.V. Tyukin**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

The paper presents a compact T5 implementation for translating notated graph representations of Process Flow Diagrams into Piping and Instrumentation Diagrams. A part of an open dataset is used for the study. The paper describes the custom tokenization procedure, model configuration, and training setup. The results show that the compact T5 configuration provides good translation quality and can serve as a basis for further development of intelligent engineering design support tools.

Keywords: *Process Flow Diagram, Piping and Instrumentation Diagram, translation, notated representations, graph structures, compact T5 model*

Введение

Проектирование схемы автоматизации (*P&ID*, *Piping and Instrumentation Diagram*) на основе технологической схемы (*PFD*, *Process Flow Diagram*) остается одной из актуальных задач цифровизации инженерного проектирования. Технологическая схема описывает состав оборудования, потоки и общую логику процесса, тогда как схема автоматизации содержит ту же технологическую структуру и дополнительно включает контуры контроля, датчики, исполнительные механизмы и связи между средствами автоматизации, что делает ее более сложной по составу. Ручное построение схемы автоматизации на основе технологической схемы требует значительных трудозатрат и высокой квалификации проектировщика, а также может сопровождаться локальными ошибками. Поэтому задача проектирования схемы автоматизации по технологической схеме представляет практический интерес для систем поддержки проектирования и интеллектуальных CAD-инструментов [1].

В последние годы для описания технологических схем применяются текстовые представления структур технологических схем. Одним из таких подходов является использование нотации SFILES 2.0, позволяющей кодировать граф технологической схемы в последовательность токенов, пригодную для машинной обработки [2]. Наличие компактного

текстового представления делает задачу преобразования технологической схемы в схему автоматизации близкой к задачам sequence-to-sequence преобразования, где вход и выход отличаются структурой, но принадлежат согласованному формальному языку.

Для sequence-to-sequence задач хорошо зарекомендовали себя модели семейства Transformer, в частности архитектура T5 (*Text-to-Text Transfer Transformer*), в которой различные прикладные постановки формулируются как преобразование текста в текст [3]. В контексте технологических схем такой подход интересен тем, что позволяет обучать единую модель типа кодировщик-декодер (encoder-decoder) на парах строковых представлений технологической схемы и схемы автоматизации без ручного задания большого числа правил вывода.

Цель настоящей работы заключается в разработке, обучении и исследовании возможностей компактной модели T5 для проектирования схемы автоматизации по технологической схеме на основе открытого набора данных, опубликованного в составе сопроводительных данных к исследованию автоматической генерации управляющих структур для технологических схем [4]. Основной акцент сделан на описании токенизации, конфигурации модели, режима обучения и интерпретации результатов на тестовой выборке.

Работа выполнялась в несколько последовательных этапов. Сначала была подготовлена часть открытого набора данных и сформированы пары нотированных представлений технологических схем и схем автоматизации. Далее выполнялись токенизация данных, построение словаря и подготовка входных и целевых последовательностей для обучения модели. После этого обучалась компактная модель T5, по результатам работы которой генерировались варианты схемы автоматизации. На завершающем этапе проводились оценка полученных результатов и анализ корректных и ошибочных примеров. Общая последовательность этапов работы приведена на рис. 1.

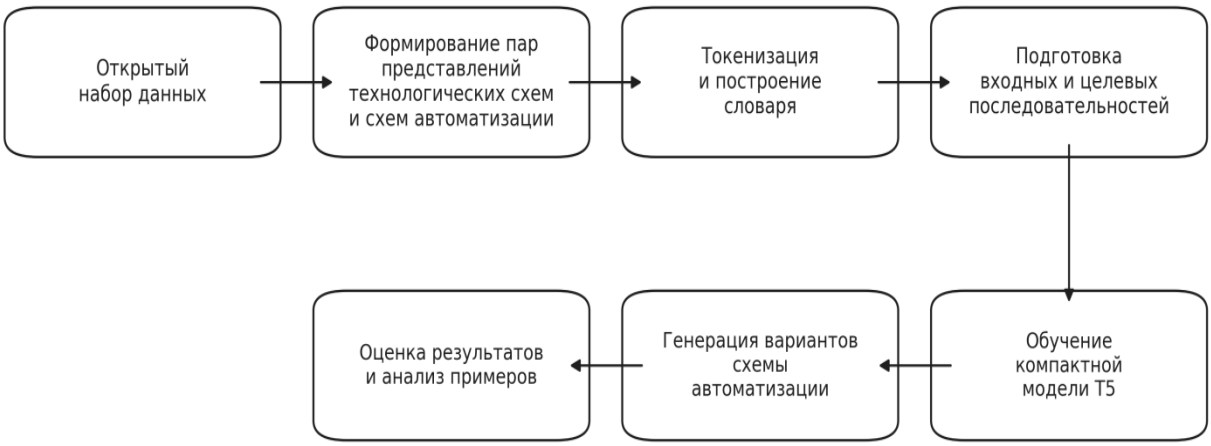


Рис. 1. Общая схема пайплайна исследования

1. Данные и постановка задачи

В работе использованы три части датасета, доступного в составе сопроводительных данных к исследованию автоматической генерации управляющих структур для технологических схем [1, 4]. Локальная версия набора содержит 10000 обучающих, 1000 валидационных и 1000 тестовых примеров. Каждый пример представляет собой словарь из двух строк: *PFD* и *PID*. Первая строка кодирует исходную технологическую схему, а вторая включает расширенное описание схемы автоматизации с элементами управления, приборами и дополнительными связями.

Основные характеристики длин входных и выходных последовательностей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Статистика длин входных и выходных последовательностей

Выборка	Кол-во элементов	Средняя длина последовательности, токенов		Максимальная длина последовательности, токенов	
		входной (PFD)	выходной (PID)	входной (PFD)	выходной (PID)
Обучающая (train)	10000	68.9	141.0	146	268
Валидационная (eval)	1000	67.2	138.2	143	261
Тестовая (test)	1000	67.4	138.9	144	261

Ограничения на максимальную длину входной последовательности (*max_input_length*=256) и максимальную длину выходной последовательности (*max_target_length*=512), использованные при обучении, превышают максимальные длины строк в датасете: 146 токенов для технологической схемы и 268 токенов для схемы автоматизации. Это означает, что все примеры обрабатываются без усечения последовательностей. Дополнительно распределения длин входных и выходных последовательностей показаны на рис. 2, что позволяет визуально оценить их компактность относительно заданных ограничений.

Постановка задачи формулируется как преобразование одной последовательности токенов в другую. На вход модели подается текстовое описание технологической схемы, а на выходе требуется восстановить токенизированную строку схемы автоматизации. В таком виде задача может рассматриваться как трансляция одного нотированного представления графовой структуры в другое. Критерием качества служит не только совпадение лучшего ответа с эталоном, но и наличие правильного ответа в наборе top-k гипотез, поскольку для инженерной практики допустим сценарий с несколькими кандидатами и последующей верификацией человеком.

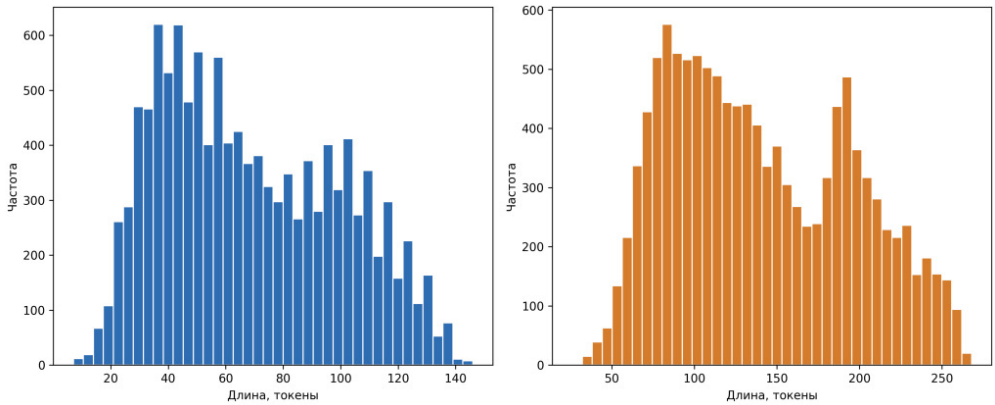


Рис. 2. Распределение длин технологических схем и схем автоматизации

2. Токенизация и подготовка последовательностей

Для токенизации использовано регулярное выражение

(\(.+?\)|\{.+?\}|[<%_]+\d+|\]|\[|\<\&\||(?<!<)&\||n\||(?<!&)(?<!n)\||&(?!\|)|\d),

приведенное в репозитории SFILES2 [5]. На его основе из обучающей и тестовой частей датасета формируется словарь токенов, соответствующих используемой нотации для обозначения аппаратов, потоков, ветвлений, индексов и управляющих конструкций. После этого в словарь добавляются служебные токены <pad>, </s> и <unk>. В результате итоговый размер словаря составил 117 единиц.

Каждая входная последовательность дополняется токеном конца последовательности и приводится к длине 256, а каждая целевая последовательность схемы автоматизации – к

длине 512. Маска внимания строится по непустым позициям. Такой способ подготовки данных задает единый формат представления примеров при обучении и инференсе.

3. Архитектура модели и режим обучения

В работе использована компактная версия T5. Основные параметры модели приведены в табл. 2, где для сравнения также указаны параметры стандартной конфигурации *T5-small* [3]. Такая постановка позволяет показать, что в исследовании рассматривается облегченный вариант архитектуры, ориентированный на решение прикладной задачи при умеренной вычислительной сложности. Размер словаря задается равным 117, а идентификаторы *pad*, *eos* и *decoder_start_token* синхронизируются с пользовательским токенизатором.

Таблица 2. Основные параметры компактной модели T5 и конфигурации T5-small

Наименование параметра	Обозначение	Используемая модель	T5-small [3]
Размер словаря	vocab_size	117	32128
Размер скрытого представления	d_model	128	512
Размер вектора ключей и значений	d_kv	32	64
Размер промежуточного слоя	d_ff	512	2048
Число слоев кодировщика	num_layers	2	6
Число слоев декодировщика	num_decoder_layers	2	6
Число голов внимания	num_heads	4	8
Dropout	dropout_rate	0.1	0.1
Тип проекции в feed-forward блоке	feed_forward_proj	gated-gelu	relu

Основные параметры обучения приведены в табл. 3. Первые 50 эпох использовалась постоянная скорость обучения, а следующие 50 эпох – линейное уменьшение скорости обучения. Валидация и сохранение модели выполнялись регулярно в ходе обучения. В результате процесс обучения завершился устойчивой сходимостью модели.

Таблица 3. Основные настройки обучения модели

Описание параметра	Исходное обозначение	Значение
Размер обучающего пакета на устройство	per_device_train_batch_size	32
Размер валидационного пакета на устройство	per_device_eval_batch_size	32
Число эпох	num_train_epochs	100
Начальная скорость обучения	learning_rate	3e-4

4. Метрики оценки

Для количественной оценки использованы точность попадания в top-k (*Top-k accuracy*), мера сходства по наибольшей общей подпоследовательности (*ROUGE-L*) [6], среднее нормированное символьное и токеновое редакционное расстояние (расстояние Левенштейна) [7], а также средняя восстанавливаемая длина (*Mean Recoverable Length*, *MRL*). Метрика *Top-k accuracy* показывает, содержится ли эталонная строка среди первых k гипотез, полученных поиском по пучку (*beam search*). Метрика *ROUGE-L* оценивает близость последовательностей через длину наибольшей общей подпоследовательности, а редакционные расстояния количественно описывают отклонение предсказанной схемы автоматизации от эталонной на символьном и токеновом уровнях. Показатель *MRL* характеризует долю восстанавливаемой части целевой последовательности и полезен для инженерной интерпретации частично корректных ответов.

5. Динамика обучения

В процессе обучения модель демонстрировала устойчивую сходимость: на начальных этапах качество улучшалось наиболее заметно, а далее изменения становились более плавными, что соответствует переходу к устойчивому режиму дообучения. В целом полученные результаты согласуются с выбранной конфигурацией модели и принятой схемой вычисления метрик, что позволяет рассматривать проведенное исследование как целостное и внутренне непротиворечивое на уровне инференса и оценки качества.

6. Количественные результаты

Сводные метрики приведены в табл. 4. Наиболее вероятная гипотеза, полученная поиском по пучку (*beam search*), полностью совпадает с эталонной схемой автоматизации в 42,9% случаев. При рассмотрении пяти первых кандидатов точность возрастает до 77,9%, а при двадцати – до 86,7%. Зависимость точности от размера набора *top-k* гипотез показана на рис. 3. Высокие значения *ROUGE-L* = 0.918 и *MRL* = 0.965 показывают, что даже при отсутствии полного точного совпадения модель в большинстве случаев корректно воспроизводит значительную часть структуры целевой схемы.

Таблица 4. Результаты оценки модели на тестовой выборке

Наименование	Обозначение	Значение
Точность попадания в Top-1	Top-1 Accuracy	0.429
Точность попадания в Top-2	Top-2 Accuracy	0.615
Точность попадания в Top-5	Top-5 Accuracy	0.779
Точность попадания в Top-20	Top-20 Accuracy	0.867
Мера сходства по наибольшей общей подпоследовательности	ROUGE-L	0.918
Средняя восстанавливаемая длина	MRL	0.965
Среднее нормированное редакционное расстояние на символьном уровне	Norm char edit distance	0.053
Среднее нормированное редакционное расстояние на токеновом уровне	Norm token edit distance	0.090

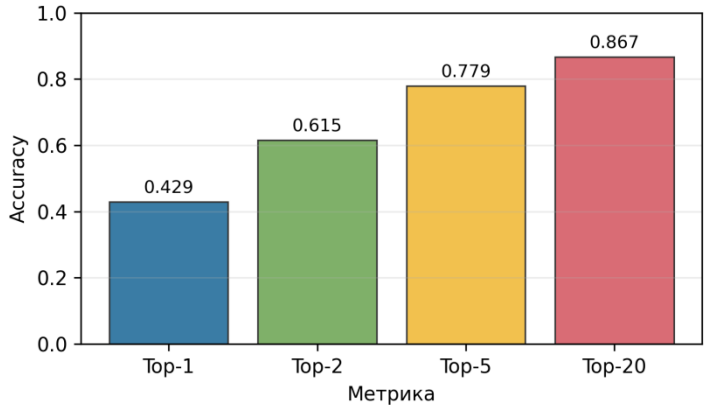


Рис. 3. Зависимость точности от размера набора *top-k* гипотез

Рассмотренные количественные результаты позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, компактная конфигурация T5 способна корректно восстанавливать значительную часть управляющей структуры схемы автоматизации даже при небольшом размере скрытого пространства. Во-вторых, поиск по пучку (*beam search*) существенно повышает практическую полезность модели: правильный ответ часто присутствует среди нескольких верхних кандидатов, хотя не всегда оказывается на первой позиции. Для систем полуавтоматического проектирования это важный вывод, поскольку оператор может выбирать из ограниченного набора правдоподобных вариантов.

7. Качественный анализ примеров

Анализ корректных примеров показывает, что модель хорошо восстанавливает глобальный каркас схемы: последовательность основных аппаратов, ветвлений, выходов потоков и значительную часть управляющих обозначений схемы автоматизации. Даже в сложных случаях модель удерживает длинные зависимости между удаленными фрагментами и корректно переносит идентификаторы потоков. В ряде примеров точная схема автоматизации встречается не в наиболее вероятной гипотезе, а среди нескольких верхних кандидатов, что дополнительно подтверждает пользу рассмотрения нескольких гипотез вместо единственного ответа.

Ошибочные примеры показывают другую картину. Наиболее характерны три типа ошибок. Первый тип связан с подстановкой близких служебных токенов, например {FC} вместо {FFC} или пропуском фрагментов вида {FT}. Второй тип проявляется в смещении ссылочных индексов <_k>, когда общая структура схемы сохраняется, но нарушается локальная нумерация связей. Третий тип состоит в искажении глубоко вложенных ветвлений: модель сохраняет общую форму записи, но переносит часть токенов в соседнюю ветвь или изменяет порядок вложенных компонентов. Все три случая хорошо согласуются с тем, что символьные и токеновые расстояния остаются сравнительно малыми, хотя полное точное совпадение для всей схемы автоматизации не достигается.

Следовательно, качество компактной T5-модели определяется не столько грубыми структурными сбоями, сколько точностью локальной детализации схемы автоматизации. Для инженерного применения это означает, что модель уже подходит как генератор черновых схем или ассистент проектировщика, но требует постобработки либо дополнительной валидации в случаях со сложными вложенными управляющими конструкциями.

8. Ограничения исследования

Во-первых, работа опирается на часть открытого датасета [1, 4], поэтому выводы ограничены именно этим корпусом синтетически сгенерированных строковых представлений. Во-вторых, архитектура модели в финальном эксперименте не изменялась, поэтому выводы относятся именно к компактной конфигурации T5, выбранной для рассматриваемого исследования.

При этом перечисленные ограничения не снижают ценность полученных результатов. Напротив, они подчеркивают, что даже без расширения модели и без изменения режима обучения удалось получить устойчивые результаты на тестовой выборке и показать практическую применимость компактной конфигурации T5 для рассматриваемой задачи.

Заключение

В статье рассмотрена собственная реализация компактной модели T5 для задачи преобразования технологической схемы в схему автоматизации на основе SFILES-подобного текстового представления. Использование части открытого набора данных и обученной модели позволило получить количественные результаты, характеризующие качество решения рассматриваемой задачи.

Полученные на тестовой выборке значения метрик свидетельствуют о хорошем качестве трансляции нотированных представлений. Показано, что компактная конфигурация T5 корректно восстанавливает общий каркас схемы автоматизации и значительную часть управляющих обозначений, а основные ошибки связаны с локальной нумерацией ссылок и подстановкой близких специальных токенов. Практический результат работы состоит в демонстрации возможности применения компактной модели T5 в качестве основы для дальнейшего развития интеллектуальных средств поддержки инженерного проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Hirtreiter, E. Towards automatic generation of control structures for Process Flow Diagrams (PFDs) with Artificial Intelligence / E. Hirtreiter, L. Schulze Balhorn, A.M. Schweidtmann // arXiv. – 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2211.05583. – URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.05583 (дата обращения: 06.04.2026).

2) SFILES 2.0: an extended text-based flowsheet representation / G. Vogel, E. Hirtreiter, Schulze Balhorn [et al.] // Optimization and Engineering. – 2023. – Vol. 24. – P. 2911-2933. – DOI: 10.1007/s11081 L. -023-09798-9.

3) Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer / C. Raffel, N. Shazeer, A. Roberts, K. Lee, S. Narang, M. Matena, Y. Zhou, W. Li, P.J. Liu // Journal of Machine Learning Research. – 2020. – Vol. 21, no. 140. – P. 1-67. – URL: https://www.jmlr.org/papers/v21/20-074.html (дата обращения: 06.04.2026).

4) Hirtreiter, E. Supplementary data for: "Towards automatic generation of control structures for Process Flow Diagrams (PFDs) with Artificial Intelligence" / E. Hirtreiter, L. Schulze Balhorn, A.M.

Schweidtmann // Zenodo. – 2023. – DOI: 10.5281/zenodo.7658798. – URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.7658798 (дата обращения: 06.04.2026).

5) Process-intelligence-research. SFILES2 // GitHub. – URL: https://github.com/process-intelligence-research/SFILES2 (дата обращения: 06.04.2026).

6) Lin, C.-Y. ROUGE: A Package for Automatic Evaluation of Summaries // Text Summarization Branches Out: Proceedings of the ACL-04 Workshop. – 2004. – P. 74-81. – URL: https://aclanthology.org/W04-1013/ (дата обращения: 06.04.2026).

7) Levenshtein, V.I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals // Доклады Академии наук СССР. – 1965. – Т. 163, № 4. – С. 845-848. – URL: https://www.mathnet.ru/eng/dan31411 (дата обращения: 06.04.2026).

УДК 004.896

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.А. Кокуева, Ю.С. Борисова, Е.И. Воеводина

Научный руководитель - **Е.И. Воеводина**, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается применение систем поддержки принятия решений для цифровизации разработки фотополимерных материалов. Показано, что традиционный подход требует значительных экспериментальных затрат и зависит от опыта исследователя. Установлено, что использование СППР позволяет сократить число экспериментов, повысить эффективность разработки и точность прогнозирования свойств материалов.

Ключевые слова: *фотополимерные материалы, системы поддержки принятия решений, цифровизация, машинное обучение, оптимизация*

DECISION SUPPORT SYSTEM AS A TOOL FOR DIGITALIZATION OF THE PHOTOPOLYMER MATERIAL DEVELOPMENT PROCESS

Yu.A. Kokueva, Yu.S. Borisova, E.I. Voevodina

Scientific Supervisor – **E.I. Voevodina**, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The paper examines the use of decision support systems for digitalization of photopolymer material development. Traditional approaches require significant experimental effort and rely on expert knowledge. It is shown that DSS reduce the number of experiments, improve development efficiency, and increase prediction accuracy.

Keywords: *photopolymer materials, decision support systems, digitalization, machine learning, optimization*

В последние десятилетия цифровые технологии существенно изменили характер научных исследований и промышленного производства. Переход к парадигме Индустрии 4.0 сопровождается активным внедрением методов анализа данных, интеллектуальных систем и цифровых инструментов в процессы проектирования материалов. Их использование позволяет не только ускорить обработку экспериментальных данных, но и повысить точность прогнозирования свойств, что трансформирует саму логику научно-исследовательской деятельности [1]. Рассматриваемые в работе решения относятся к области интеллектуальных систем и анализа данных для поддержки принятия решений в задачах разработки материалов.

Разработка фотополимерных материалов занимает особое место в материаловедении благодаря широкому применению в аддитивных технологиях, микроэлектронике, биомедицине и производстве высокоточных изделий. Фотополимеры представляют собой многокомпонентные системы, изменяющие агрегатное состояние под воздействием электромагнитного излучения; их состав формируется за счёт сочетания мономеров, олигомеров, фотоинициаторов и функциональных добавок, определяющих кинетику полимеризации и итоговые эксплуатационные характеристики [11]. Наиболее активно такие материалы используются в технологиях аддитивного производства – SLA, DLP, CLIP. Эти методы обеспечивают высокую точность формирования изделий сложной геометрии, однако чувствительны к параметрам процесса. Интенсивность излучения, время экспонирования, толщина слоя и вязкость композиции выступают ключевыми факторами, от которых напрямую зависит качество получаемых изделий и стабильность технологического режима [2].

При этом разработка фотополимеров по-прежнему во многом опирается на последовательные экспериментальные итерации. Подбор состава, серия испытаний, анализ результатов — такая схема требует значительных затрат и нередко включает десятки повторений. Существенную роль играет и субъективный фактор: зависимость от экспертного опыта снижает воспроизводимость и усложняет перенос результатов в промышленную практику. Возрастающая сложность требований к материалам делает подобный подход всё менее эффективным. В этой связи усиливается интерес к цифровым методам моделирования и анализа данных. Применение методов машинного обучения и материаловедческой информатики позволяет выявлять устойчивые взаимосвязи между составом и свойствами материалов, а также прогнозировать их характеристики на основе накопленных экспериментальных данных, что сокращает время поиска новых композиций и повышает обоснованность принимаемых решений [3].

Существенную роль в данном процессе играют системы поддержки принятия решений. Они формируют интегрированную среду, в которой объединяются базы данных, математические модели и экспертные знания, обеспечивая возможность комплексного анализа и выбора оптимальных решений в условиях неопределённости. Особенно важно, что такие системы позволяют учитывать сразу несколько критериев — от механических характеристик до технологических и экономических ограничений [4]. Интеграция подобных систем с цифровыми моделями и экспериментальными базами данных открывает возможность создания интеллектуальных платформ, реализующих непрерывный цикл разработки материалов. В рамках такого цикла моделирование, экспериментальная проверка и корректировка параметров взаимосвязаны, что повышает точность прогнозирования и снижает риск возникновения дефектов на стадии производства [7]. Таким образом, цифровизация разработки фотополимерных материалов и внедрение систем поддержки принятия решений выступают не просто как отдельные технологические тренды, а как взаимосвязанные направления, определяющие развитие современного материаловедения и аддитивного производства.

Целью настоящего исследования является анализ возможностей применения систем поддержки принятия решений в цифровизации разработки фотополимерных материалов, а также выявление их ключевых функциональных компонентов. В рамках работы рассматриваются особенности разработки фотополимеров, анализируются современные подходы к цифровизации и исследуются архитектурные решения соответствующих систем.

Фотополимерные материалы представляют собой класс полимерных систем, способных переходить из жидкого или вязкого состояния в твёрдое под воздействием излучения определённой длины волны. Их функционирование основано на фотополимеризации – реакции, инициируемой фотоинициаторами, которые при облучении образуют активные частицы, запускающие формирование полимерной сетки и твёрдой структуры материала [11]. Современные фотополимерные композиции имеют многокомпонентный состав, включающий олигомеры, мономеры, фотоинициаторы, стабилизаторы и функциональные добавки. При этом каждый компонент выполняет строго определённую функцию: олигомеры задают механические свойства, мономеры регулируют вязкость и кинетику процесса, фотоинициаторы обеспечивают запуск реакции, а добавки повышают устойчивость к внешним воздействиям [2].

Важнейшей характеристикой таких систем является скорость полимеризации, определяющая эффективность формирования структуры и стабильность технологического процесса. Она зависит от совокупности факторов – интенсивности и длины волны излучения, концентрации фотоинициатора и свойств среды. Вследствие этого изменение указанных параметров напрямую приводит к вариациям прочности, геометрической точности и усадки изделий [11]. На практике данные особенности приобретают особое значение в аддитивных технологиях (SLA, DLP, CLIP), где фотополимеры используются для послойного формирования изделий сложной геометрии. Высокая точность таких технологий достигается только при строгом контроле параметров полимеризации и характеристик материалов, что

существенно усложняет процесс разработки и применения фотополимерных композиций [12].

В этих условиях возникает ключевая проблема – необходимость одновременного обеспечения требуемого комплекса свойств при сохранении технологичности процесса. Так, повышение прочности, как правило, сопровождается увеличением вязкости, что затрудняет формирование слоёв, тогда как увеличение степени сшивки приводит к росту усадки и внутренних напряжений. В результате ухудшается геометрическая точность изделий и стабильность технологического режима. Дополнительные сложности обусловлены расширением требований к материалам. Помимо механических характеристик, необходимо обеспечивать биосовместимость, химическую стойкость и устойчивость к внешним воздействиям; при этом контроль усадки становится критически важным параметром, определяющим точность размеров и эксплуатационные свойства изделий [11].

Следовательно, разработка фотополимерных материалов представляет собой многопараметрическую задачу, требующую учёта большого числа взаимосвязанных факторов. Традиционный подход, основанный на последовательных экспериментальных итерациях, оказывается трудоёмким и затратным. Более того, зависимость от ручного анализа данных повышает вероятность ошибок и ограничивает эффективность принятия решений. В этих условиях возникает объективная необходимость перехода к цифровым методам моделирования и анализа данных. Их применение позволяет выявлять закономерности между составом и свойствами материалов и прогнозировать результаты ещё до проведения экспериментов, сокращая объём испытаний и затраты на разработку [6]. Дальнейшее развитие данного подхода связано с использованием интеллектуальных систем, способных обрабатывать большие массивы экспериментальной информации. В частности, формирование специализированных баз данных, содержащих сведения о составе, параметрах процессов и характеристиках материалов, обеспечивает накопление и повторное использование знаний при разработке новых композиций [1].

Тем самым, усложнение требований к фотополимерным материалам и ограниченность традиционных методов разработки обусловливают необходимость внедрения цифровых и интеллектуальных инструментов. Системы поддержки принятия решений позволяют автоматизировать анализ данных и обосновывать выбор оптимальных параметров состава и технологических режимов, повышая эффективность разработки и снижая её ресурсную ёмкость [5].

Современный этап развития науки и промышленности характеризуется активной цифровизацией процессов разработки материалов и управления технологическими системами. Переход от эмпирических подходов к методам, основанным на анализе данных и математическом моделировании, позволяет повысить эффективность обработки экспериментальной информации, ускорить проектирование и улучшить качество материалов [7]. В этой связи формирование и использование цифровых данных становится ключевым фактором трансформации материаловедческих исследований. Основой цифровизации выступают базы данных, содержащие сведения о составе фотополимерных композиций, параметрах процессов и свойствах материалов, что обеспечивает анализ взаимосвязей «состав–свойства» и ускоряет разработку новых рецептур [1]. Дальнейшее развитие связано с применением методов материаловедческой информатики, включая машинное обучение, позволяющих обрабатывать большие массивы данных и прогнозировать характеристики материалов на стадии проектирования [10]. Существенную роль также играет математическое моделирование, включая цифровые двойники, обеспечивающее оценку влияния параметров фотополимеризации и сокращение объёма экспериментальных исследований [7].

Однако расширение спектра цифровых инструментов сопровождается ростом сложности процесса разработки: увеличивается объём разнородных данных, возрастает число параметров и критериев, требующих одновременного учёта. В этих условиях фрагментация данных и разрозненное применение методов снижают эффективность

цифровизации и ограничивают возможности принятия обоснованных решений. Таким образом, возникает необходимость интеграции данных, моделей и аналитических инструментов в единую информационную среду, что реализуется в системах поддержки принятия решений, обеспечивающих согласованное использование информации и обоснованный выбор параметров состава и технологических режимов [8]. Аналогичные подходы к объединению цифрового моделирования и интеллектуального анализа в задачах проектирования сложных систем рассматриваются в работах по цифровому инверсному проектированию [13].

Системы поддержки принятия решений рассматриваются как интегрированные программно-аппаратные комплексы, обеспечивающие обоснование выбора решений на основе анализа данных, математических моделей и экспертных знаний [4]. В задачах разработки фотополимерных материалов такие системы используются для систематизации информации о компонентах и рецептурах, моделирования свойств и оптимизации параметров процессов полимеризации.

В рамках данной работы предлагается концепция системы поддержки принятия решений для разработки фотополимерных материалов, основанная на интеграции экспериментальных данных, моделей фотополимеризации и методов интеллектуального анализа. В качестве входных данных рассматриваются сведения о составе фотополимерных композиций, параметрах технологических процессов и результатах испытаний материалов. Обработка данных осуществляется с использованием методов статистического анализа, машинного обучения и математического моделирования, обеспечивающих выявление зависимостей между составом и свойствами, а также прогнозирование характеристик материалов. Результатом функционирования системы является формирование обоснованных рекомендаций по выбору оптимальных рецептур и технологических режимов, направленных на достижение требуемого комплекса свойств при минимизации экспериментальных затрат.

Использование СППР направлено на снижение неопределённости при принятии решений и повышение эффективности проектирования материалов. Это особенно актуально для фотополимерных композиций, разработка которых традиционно опирается на эмпирические методы, требующие значительного числа экспериментов и сопряжённые с высокими временными и ресурсными затратами [11]. Интеграция в рамках СППР экспериментальных данных, результатов моделирования и методов прогнозирования создаёт возможность более точного и оперативного выбора параметров состава и технологических режимов.

Структура и функциональные компоненты предлагаемой СППР представлены в табл. 1.

Таблица 1. Архитектура системы поддержки принятия решений для разработки фотополимерных материалов

Модуль СППР	Функции	Используемые методы / подходы
База данных материалов	Хранение информации о компонентах фотополимерных смол, рецептурах, физических и химических свойствах	Структурированные базы данных, knowledge base, стандартизированные форматы данных
Аналитический модуль	Обработка экспериментальных данных и моделей, прогнозирование свойств	Статистические методы, многокритериальная оптимизация, машинное обучение (регрессия, нейронные сети, Bayesian optimization)
Модуль выбора оптимальных параметров	Подбор оптимальных составов и условий полимеризации	Методы многокритериального анализа, интеграция с цифровыми двойниками
Интерфейс пользователя	Ввод данных, визуализация результатов, формирование рекомендаций	Графические интерфейсы, визуализация данных, интерактивные панели

Интеграция систем поддержки принятия решений в разработку фотополимерных материалов формирует единую цифровую среду, объединяющую данные о составе, параметрах полимеризации и результатах испытаний. Это обеспечивает комплексный анализ и прогнозирование свойств, а также оптимизацию рецептур без избыточного числа экспериментов. Учитывая многокомпонентный характер фотополимеров и необходимость одновременного учёта эксплуатационных и технологических параметров, применение СППР становится ключевым инструментом повышения обоснованности принимаемых решений [2].

Функционирование таких систем опирается на совокупность цифровых методов. В частности, используются подходы материаловедческой информатики и машинного обучения, позволяющие выявлять зависимости «состав–свойства» и прогнозировать характеристики материалов [3]. Дополнительно применяются цифровые двойники, воспроизводящие условия формирования материала, а также методы многокритериального анализа и планирования эксперимента, обеспечивающие выбор рациональных параметров разработки [7]. Применение указанных методов в рамках СППР приводит к существенным эффектам. Прежде всего, снижается количество экспериментальных итераций и повышается точность прогнозирования свойств материалов. Кроме того, интеграция аналитических инструментов и средств визуализации способствует повышению воспроизводимости результатов и надёжности научно-исследовательских процессов.

Соответственно, объединение данных, моделей и методов анализа в рамках СППР обеспечивает непрерывный цикл разработки – от моделирования до корректировки параметров – и позволяет сократить временные и материальные затраты. Это делает системы поддержки принятия решений необходимым элементом цифровизации разработки фотополимерных материалов и их эффективного внедрения в аддитивные технологии и промышленное производство [6].

В нынешних условиях развитие разработки всё в большей степени определяется интеграцией систем поддержки принятия решений, методов анализа данных, включая машинное обучение, и цифровых моделей технологических процессов. Объединение этих подходов в рамках единой цифровой среды обеспечивает переход к сквозной цифровизации – от формирования гипотез и моделирования до экспериментальной верификации и анализа результатов [10]. Согласованное использование СППР, алгоритмов анализа данных и цифровых двойников позволяет не только учитывать многопараметрический характер фотополимерных систем, но и оперативно корректировать составы и технологические режимы на основе накопленных данных. Это обеспечивает более точное прогнозирование свойств материалов, снижение неопределённости при принятии решений и минимизацию рисков дефектов при производстве [11].

В результате достигается существенный эффект: сокращаются сроки разработки, уменьшается объём экспериментальных исследований и связанные с ними затраты, одновременно повышается точность проектирования и воспроизводимость результатов. Таким образом, интеграция СППР, методов машинного обучения и цифровых моделей формирует технологическую основу для повышения эффективности разработки фотополимерных материалов и их внедрения в промышленную практику.

Практическое применение систем поддержки принятия решений в разработке фотополимерных материалов проявляется как на промышленном, так и на исследовательском уровне. В промышленности СППР интегрируются с оборудованием аддитивного производства (SLA, DLP) и сенсорными системами, обеспечивая непрерывный сбор и анализ данных о параметрах полимеризации. На основе этих данных формируются рекомендации по корректировке состава материалов и технологических режимов, что позволяет оперативно управлять процессом, снижать вероятность дефектов и обеспечивать стабильность характеристик изделий [9]. В лабораторных условиях СППР используются для анализа накопленных экспериментальных данных и построения прогнозных моделей. Это даёт возможность выявлять зависимости между составом и свойствами фотополимеров и сокращать количество экспериментальных итераций при разработке новых композиций [1].

Дополнительное использование цифровых моделей позволяет оценивать влияние параметров процесса и подбирать оптимальные условия без проведения полного цикла испытаний [12].

Таким образом, применение СППР обеспечивает не только ускорение разработки фотополимерных материалов, но и повышение точности прогнозирования их свойств, снижение затрат и повышение устойчивости технологических процессов, что подтверждает их эффективность как инструмента цифровизации материаловедения [11].

Цифровизация разработки фотополимерных материалов и внедрение систем поддержки принятия решений выступают не просто актуальным направлением, а необходимым условием повышения эффективности материаловедческих исследований и аддитивных технологий. Проведённый анализ показал ограниченность традиционных подходов, основанных на последовательных экспериментах: они характеризуются высокой трудоёмкостью, значительными затратами и зависимостью от экспертного опыта, что снижает воспроизводимость результатов и точность прогнозирования свойств материалов [2]. Показано, что применение цифровых инструментов – включая базы данных, методы материаловедческой информатики, алгоритмы машинного обучения и математическое моделирование — обеспечивает переход к управляемому и предсказуемому процессу разработки. Это позволяет выявлять зависимости «состав–свойства», обоснованно прогнозировать характеристики фотополимеров и существенно сокращать количество экспериментальных итераций, одновременно снижая технологические риски [3].

Ключевым результатом работы является предложенная концепция системы поддержки принятия решений для разработки фотополимерных материалов, основанная на интеграции экспериментальных данных, моделей фотополимеризации и методов анализа. В рамках данной концепции формируется единая цифровая среда, обеспечивающая многокритериальный анализ, прогнозирование свойств и выбор оптимальных параметров состава и технологических режимов. В отличие от разрозненного использования отдельных цифровых инструментов, предложенный подход ориентирован на их системную интеграцию, что повышает обоснованность принимаемых решений и эффективность разработки.

В итоге использование СППР позволяет перейти от эмпирической модели разработки к цифровой, основанной на данных и моделях. Это обеспечивает сокращение сроков и затрат, повышение точности прогнозирования и стабильности технологических процессов, а также создаёт условия для ускоренного внедрения фотополимерных материалов в промышленность, медицину и микроэлектронику. Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейшего развития интегрированных цифровых платформ и интеллектуальных систем как основы для создания материалов с заданными свойствами и расширения возможностей аддитивных технологий, а также соответствуют задачам цифровой трансформации и развития интеллектуальных систем в экономике данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Agrawal, A. Perspective: Materials Informatics and Big Data: Realization of the «Fourth Paradigm» of Science in Materials Science / A. Agrawal, A. Choudhary // APL Materials. – 2016. – Vol. 4, № 5. – Art. 053208. – DOI: 10.1063/1.4946894.

2) Bagheri, A. Photopolymerization in 3D Printing / A. Bagheri, J. Jin // ACS Applied Polymer Materials. – 2019. – Vol. 1, № 4. – P. 593–611. – DOI: 10.1021/acsapm.8b00165.

3) Machine Learning for Molecular and Materials Science / K.T. Butler, D.W. Davies, H. Cartwright, O. Isayev, A. Walsh // Nature. – 2018. – Vol. 559. – P. 547–555. – DOI: 10.1038/s41586-018-0337-2.

4) Marakas, G. M. Decision Support Systems in the 21st Century. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003. – 611 p.

5) Power, D.J. Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers. – Westport: Greenwood Publishing Group, 2002. – 252 p.

6) Machine Learning in Materials Informatics: Recent Applications and Prospects / R. Ramprasad, R. Batra, Pilania [et al.] // NPJ Computational Materials. – 2017. – Vol. 3. – Art. 54. – DOI: 10.1038/s41524-017-0056-5.

7) Review of Material Modeling and Digitalization in Industry: Barriers and Perspectives / L. Scotti, H. Basoalto, J. Moffat [et al.] // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. – 2023. – Vol. 12. – P. 397–420. – DOI: 10.1007/s40192-023-00318-2.

8) Turban, E. Decision Support and Business Intelligence Systems / E. Turban, R. Sharda, D. Delen. – 9th ed. – Boston: Prentice Hall, 2010. – 756 p.

9) Continuous Liquid Interface Production of 3D Objects / J.R. Tumbleston, D. Shirvanyants, N. Ermoshkin [et al.] // Science. – 2015. – Vol. 347, № 6228. – P. 1349–1352. – DOI: 10.1126/science.aaa2397.

10) A General-Purpose Machine Learning Framework for Predicting Properties of Inorganic Materials / L. Ward, A. Agrawal, A. Choudhary, C. Wolverton // NPJ Computational Materials. – 2016. – Vol. 2. – Art. 16028. – DOI: 10.1038/npjcompumats.2016.28.

11) Zhang, Y. A Review on Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications and Challenges / Y. Zhang, S.K. Moon // Polymers. – 2021. – Vol. 13, № 4. – Art. 598. – DOI: 10.3390/polym13040598.

12) Ходер, В.Б. Рынок материалов для технологий фотополимеризации в ванне (обзор) / В.Б. Ходер, Е.И.ордикова, Г.Н. Дьякова // Труды БГТУ. Сер. 2: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2024. – № 2 (283). – С. 184–193. – DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-21.

13) Ключевые глобальные тренды рынка цифрового инверсного проектирования / А.А. Крутов, Е.А. Бычков, Е.И. Воеводина, А.М. Сальников // Теоретическая экономика. – 2025. – № 11(131). – С. 163-181. – DOI: 10.52957/2221-3260-2025-11-163-181.

УДК 004.056

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ЦЕЛОСТНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВ ДОКУМЕНТОВ

Е.А. Копанев

Научный руководитель – **А.В. Никитенко**, канд. пед. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается разработка программного прототипа системы защиты целостности электронных образов документов на основе нейросетевого OCR и гибридного цифрового водяного знака. Предложен двухуровневый подход, в котором пространственный слой используется для локализации изменений на уровне слов, а частотный - для хранения резервного текстового представления документа. Описана архитектура прототипа, алгоритмы встраивания и проверки, а также пользовательский интерфейс системы.

Ключевые слова: *информационная безопасность, стеганография, электронный образ документа, защита целостности, цифровой водяной знак, оптическое распознавание символов*

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PROTOTYPE FOR A SYSTEM TO ENSURE THE INTEGRITY OF ELECTRONIC DOCUMENT IMAGES

E.A. Kopanev

Scientific Supervisor - **A.V. Nikitenko**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the development of a software prototype for protecting the integrity of electronic document images based on neural OCR and a hybrid digital watermark. A two-level approach is proposed: the spatial layer is used to localize changes at the word level, while the frequency layer stores a redundant textual representation of the document. The paper describes the prototype architecture, embedding and verification algorithms, and the user interface of the system.

Keywords: *information security, steganography, electronic document image, integrity protection, digital watermark, optical character recognition*

В условиях цифровизации документооборота значительная часть документов существует не в текстовом, а в графическом представлении – в виде сканов, фотографий и PDF-файлов без текстового слоя. Такие электронные образы документов широко применяются в образовательных, юридических, архивных, медицинских и корпоративных системах [4], однако остаются уязвимыми к несанкционированному редактированию [5]. Замена отдельных слов или фрагментов текста в графическом документе может быть выполнена без явных визуальных следов, тогда как традиционные криптографические механизмы, например электронная подпись [1], имеют ограничения в условиях, когда над документом выполняются технические преобразования, например пересохранение, изменение метаданных или повторная компрессия [3]. Кроме того, данные механизмы не позволяют выявить ситуацию, при которой внутренний нарушитель, обладающий доступом к системе, изменяет документ до или после применения стандартных средств контроля. В связи с этим становится актуальна задача разработки системы, способной контролировать не только неизменность файла как набора байтов, но и сохранность текстового содержания документа.

В представленной работе предлагается программный прототип системы защиты целостности электронных образов документов (далее ЭОД), основанный на совместном

использовании нейросетевого модуля оптического распознавания символов (далее OCR) и гибридного цифрового водяного знака (далее ЦВЗ).

Цель статьи - описать проектные решения, положенные в основу программного прототипа системы защиты целостности ЭОД. В рамках статьи рассматриваются архитектура прототипа, логика формирования гибридного ЦВЗ, интеграция OCR-модуля, алгоритмы проверки, пользовательский интерфейс и сценарии использования.

Внутренняя архитектура системы построена вокруг единой модели документа, включающей набор страниц, их изображения, OCR-результаты и служебные метаданные. Независимо от исходного формата файла: PDF, TIFF, PNG или JPEG - документ приводится к растровому представлению, пригодному для последующей обработки OCR и алгоритмами ЦВЗ. Контекстная диаграмма архитектуры системы представлена на рис. 1.

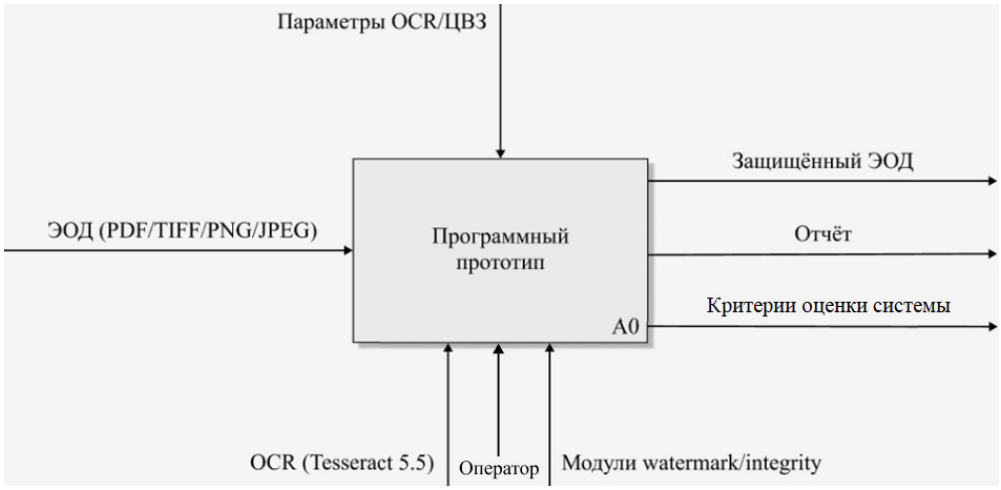


Рис. 1. Архитектура программного прототипа системы защиты целостности ЭОД

В разработанном прототипе одним из основных компонентов является гибридный ЦВЗ, включающий пространственный и частотный слои [2]. Первый слой обеспечивает контроль изменений на уровне слов, второй - хранение резервного текстового представления документа. Схема формирования ЦВЗ представлена на рис. 2.

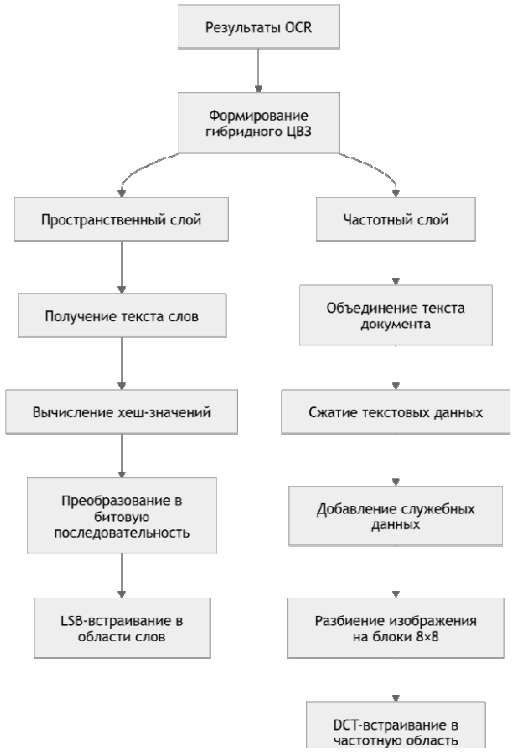


Рис. 2. Общая схема формирования гибридного ЦВЗ

Пространственный слой строится на основе OCR результатов. Для каждой страницы формируется упорядоченный набор распознанных текстовых фрагментов:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, \quad (1)$$

где S_i - i-е слово или текстовый фрагмент, полученный OCR после сортировки по положению на странице сверху вниз и слева направо.

Для каждого слова вычисляется усечённое хеш-значение:

$$h_i = Trunc_k(SHA256(s_i)), \quad (2)$$

где k - число байт хеша, используемых для одного слова.

Далее биты хеша встраиваются в область слова методом LSB. Для одного бита операция может быть представлена выражением:

$$p' = (p \& 254) | b, \quad (3)$$

где p - исходное значение выбранного цветового канала пикселя; b - встраиваемый бит; p' - модифицированное значение пикселя.

Частотный слой формируется из общего OCR текста документа. Текст всех страниц объединяется, после чего к нему применяется сжатие:

$$R = Compress(T). \quad (4)$$

Полученная полезная нагрузка внедряется в частотную область изображения с использованием дискретного косинусного преобразования (далее ДКП) по блокам 8×8. Для кодирования битов используются пары среднечастотных коэффициентов, между которыми поддерживается заданное соотношение. В общем виде ДКП можно записать как

$$C(u,v) = a(u)a(v)\sum_{x=0}^{7}\sum_{y=0}^{7} A(x,y)\ \text{??s}\frac{(2x+1)u\pi}{16}\ \text{??s}\frac{(2y+1)v\pi}{16}. \quad (5)$$

Для кодирования бита используется условие доминирования одного коэффициента над другим с заданным порогом Δ.

Отдельно в прототипе предусмотрен настраиваемый режим параметров ЦВЗ. Он позволяет изменять число повторений битов, ширину области встраивания и величину порога модификации частотных коэффициентов. Это даёт возможность адаптировать систему к документам различной плотности текста и разной площади свободных полей.

Второй важный компонент системы – OCR-модуль Tesseract 5.5.0 [6], интегрированный через библиотеку «pytesseract». Современные версии Tesseract используют распознаватель на основе LSTM, что позволяет рассматривать его как OCR систему с нейросетевым ядром [7]. Результат распознавания для страницы можно представить в виде множества

$$O_p = \{(s_i, q_i, c_i)\}_{i=1}^{n}, \quad (6)$$

где S_i - распознанный текст фрагмента; q_i - его координатное описание; C_i - оценка уверенности распознавания.

На практике координатный четырёхугольник приводится к ограничивающему прямоугольнику, который далее используется как область для встраивания пространственного слоя. OCR представление документа описывается как:

$$OCR(D) = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}. \quad (7)$$

Визуализация работы OCR модуля и областей слов для встраивания ЦВЗ показана на рис. 3.

Здесь приведены результаты модели, обученной аналогичным образом на четырёх изображениях (2 с потопом, 2 без). На трёх фотографиях с явно затопленным полом сеть корректно определяет класс «ПОТОП» с высокой уверенностью (вероятность 71–99 %). На двух примерах сухих, но повреждённых помещений модель выдаёт класс «Без потопа» с очень низкой вероятностью наличия затопления (около 0.1–0.2 %). Модель хорошо различает сильно выраженный визуальный признак воды на полу, но из-за малого числа обучающих примеров её устойчивость к более сложным ситуациям остаётся под вопросом.

Рис. 3. Визуализация областей слов, которые используются для встраивания ЦВЗ

Для документов с выраженной табличной структурой в прототипе предусмотрен специальный табличный режим OCR. При его активации применяется более высокое разрешение растеризации PDF, дополнительная предобработка изображения и удаление горизонтальных и вертикальных линий таблиц морфологическими операциями. Это повышает устойчивость распознавания ячеек, кратких подписей и числовых данных (рис. 4). В формальном виде этот режим можно описать как

$$OCR_{tab}(D) = OCR\big(F_{tab}(D)\big), \tag{8}$$

где $F_{tab}(D)$ - операция специальной табличной предобработки документа.

А

Больничный (с РК, СН)	Январь	10	80	10
Больничный за счет работодателя (с РК и СН)	Январь	30	24	30
Оплата работы в праздничные и выходные дни	Январь	20	16	16
Оплата по окладу	Январь	11	88	11

Б

Больничный (с РК, СН)	Январь	10	80	10
Больничный за счет работодателя (с РК и СН)	Январь	30	24	30
Оплата работы в праздничные и выходные дни	Январь	20	16	16
Оплата по окладу	Январь	11	88	11

Рис. 4. Отображение OCR:
А - без табличного режима; Б - с табличным режимом

Проверка целостности документа строится на сравнении текущего OCR представления с эталонным текстом, извлечённым из резервного слоя цифрового водяного знака. Сначала для защищённого документа выполняется OCR обработка:

$$T^{cur} = OCR(D'). \tag{9}$$

Затем из резервного слоя ЦВЗ восстанавливается эталонный текст:

$$T^{ref} = Extract(D'). \tag{10}$$

После этого выполняется их сопоставление:

$$\Delta T = Compare(T^{cur}, T^{ref}). \tag{11}$$

Если различия отсутствуют или находятся в пределах допустимой OCR-погрешности, документ считается неизменённым. Если же фиксируются значимые расхождения, система сообщает о нарушении целостности.

Если резервный слой успешно извлечён, система использует его как источник эталонного текста для формирования отчёта о проверке. Если же извлечение оказывается невозможным, в отчёте фиксируется ошибка извлечения резервных данных, и процедура проверки завершается диагностическим сообщением.

Графический интерфейс реализован в виде двух вкладок: «Защита ЭОД» и «Проверка ЭОД» (рис. 5). В обеих вкладках используется двухколоночная компоновка: слева располагаются элементы управления и текстовые результаты, справа – область просмотра текущей страницы документа. Интерфейс также предоставляет выбор страницы, масштабирование изображения и визуализацию OCR-рамок.

Далее будет рассмотрен типовой сценарий применения разработанного прототипа. Пользователь загружает исходный ЭОД во вкладку «Защита ЭОД», после чего система выполняет OCR-распознавание, формирует координатную разметку слов и строит гибридный ЦВЗ. Далее пространственный слой встраивается в области распознанных слов, а частотный слой – в поля документа. После завершения процедуры показывается уведомление с необходимыми для дальнейшего исследования метриками [8] (рис. 6), затем пользователь сохраняет защищённый документ в формате без потерь (PNG, TIFF).

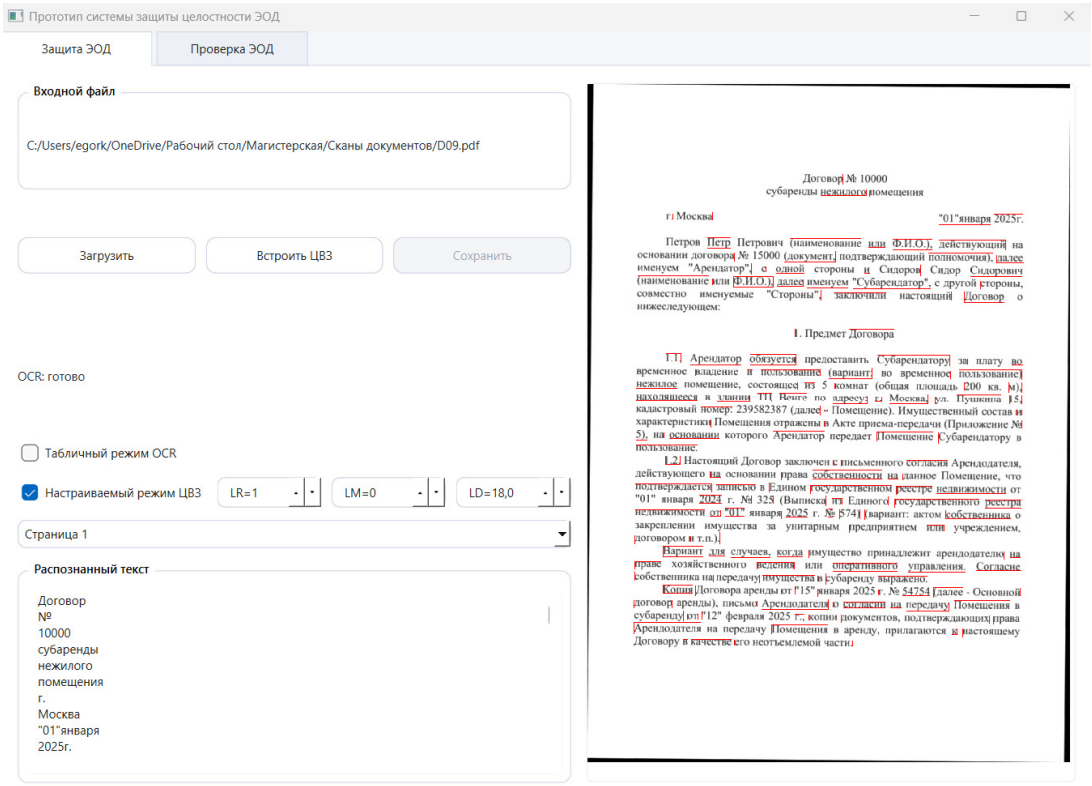


Рис. 5. Интерфейс программы

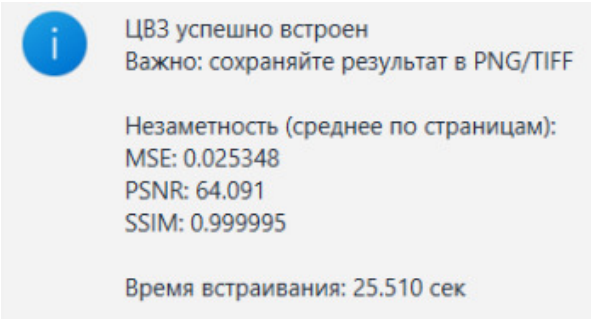


Рис. 6. Уведомление об успешном встраивании ЦВЗ

На следующем этапе защищённый документ рассматривается как объект последующей проверки. Моделируется ситуация, что в документ вносятся несанкционированные изменения, например замена и удаление слова (рис. 7). После загрузки изменённого файла во вкладке «Проверка ЭОД» система повторно выполняет распознавание текста, извлекает эталонный текст из резервного слоя ЦВЗ и сопоставляет его с текущим содержимым документа.

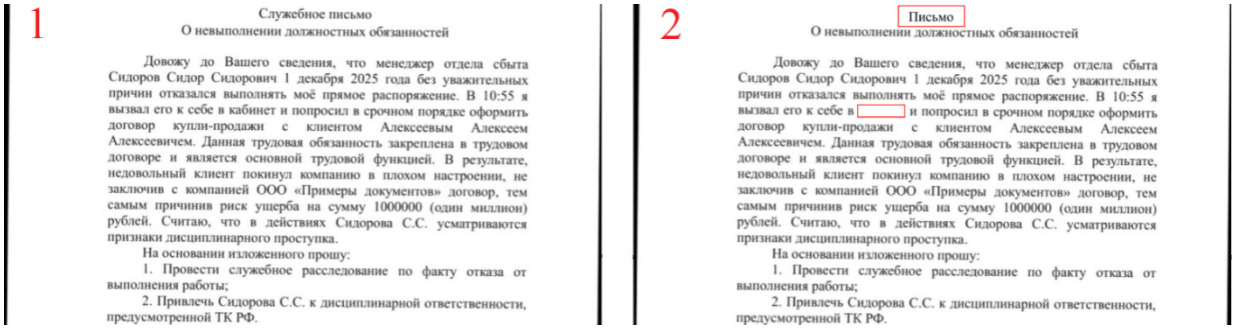


Рис. 7. Внесение изменений:
1 - исходный ЭОД; 2 - поддельный ЭОД

Если изменения отсутствуют, система формирует заключение о сохранении целостности. Если же документ был модифицирован, в отчёте фиксируются расхождения между текущим OCR-текстом и эталонным содержимым. Пример отчёта об обнаружении изменений показан на рис. 8.

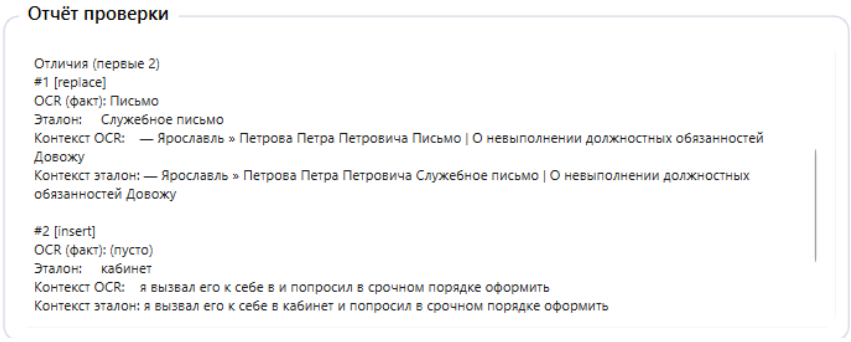


Рис. 8. Отчёт проверки целостности ЭОД

В результате работы был разработан программный прототип системы защиты целостности электронных образов документов, основанный на совместном использовании OCR-модуля и гибридного цифрового водяного знака. Предложенная архитектура позволяет объединить контроль содержательной целостности документа, локализацию изменений на уровне слов и хранение резервного текстового представления в частотном слое. Рассмотренные проектные решения показывают практическую реализуемость такого подхода в виде настольного приложения с графическим интерфейсом.

Дальнейшее развитие работы связано с проведением экспериментального исследования разработанного прототипа на различных типах документов. В рамках следующего этапа предполагается оценить качество встраивания и проверки по определённым метрикам, исследовать устойчивость системы к различным видам преднамеренных и непреднамеренных искажений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Федеральный закон № 63-ФЗ «Об электронной подписи». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_112701/ (дата обращения: 28.02.2026)

2) Конахович, Г.Ф. Компьютерная стеганография / Г.Ф. Конахович, А.Ю. Пузыренко. – Москва: МК-Пресс, 2006. – 288 с.

3) Елисеев, Н.И. Управление целостностью системы юридически значимого электронного документооборота в условиях межформатных преобразований электронных документов / Н.И. Елисеев, О.А. Финько. – 2014. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-tselostnostyu-sistemy-yuridicheski-znachimogo-elektronnogo-dokumentooborota-v-usloviyah-mezhformatnyh-preobrazovaniy/viewer (дата обращения: 02.03.2026)

4) Алексеева, Д. Обеспечение безопасности ЭДО: технологии и методы защиты. – URL: https://astral.ru/aj/elem/bezopasnost-elektronnogo-dokumentooborota/ (дата обращения: 03.03.2026)

5) Борсук, В.А. Актуальные проблемы правового обеспечения юридической значимости электронных документов. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/140788/1/978-5-7996-3940-2_2024_041.pdf (дата обращения: 04.03.2026)

6) Tesseract User Manual: сайт. – URL: https://tesseract-ocr.github.io/tessdoc (дата обращения: 05.03.2026)

7) Graves, A. Connectionist Temporal Classification: Labelling Unsegmented Sequence Data with Recurrent Neural Networks / A. Graves, S. Fernández, F. Gomez, J. Schmidhuber // Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning. – 2006. – P. 369–376.

8) Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity / Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, E.P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2004. – Vol. 13, № 4. – P. 600–612.

УДК 654.071

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОРПОРАТИВНЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ АДАПТАЦИИ ITSM-ПОДХОДА

К.С. Красоткин

Научный руководитель – **Н.А. Шишкина**, канд. экон. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматриваются проблемы управления корпоративными информационными системами в условиях роста их сложности и увеличения нагрузки на IT-подразделения. Показано, что применение классических подходов ITSM в полном объеме часто является избыточным. Предложен адаптированный подход, основанный на внедрении централизованной службы поддержки пользователей, классификации обращений и использовании SLA.

Ключевые слова: *корпоративные информационные системы, ITSM, ITIL, служба поддержки пользователей, SLA, цифровая трансформация*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CORPORATE INFORMATION SYSTEM MANAGEMENT BASED ON ITSM APPROACH ADAPTATION

K.S. Krasotkin

Scientific Supervisor - **N.A. Shishkina**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article considers the problems of managing corporate information systems under increasing complexity and workload on IT departments. It is shown that full implementation of ITSM approaches is often excessive. An adapted approach is proposed based on a centralized user support service, request classification, and SLA metrics.

Keywords: *corporate information systems, ITSM, ITIL, user support service, SLA, digital transformation*

В условиях цифровой трансформации промышленности корпоративные информационные системы (КИС) становятся ключевым элементом обеспечения бизнес-процессов предприятия. В организациях используются различные системы, включая решения класса ERP, а также системы финансового и кадрового учета. От стабильности и эффективности их работы напрямую зависит функционирование предприятия в целом.

По мере роста количества информационных систем и усложнения их взаимосвязей увеличивается нагрузка на IT-подразделения, отвечающие за их сопровождение и поддержку. При этом во многих организациях процессы взаимодействия пользователей с IT-службой остаются слабо формализованными: обращения поступают через разные каналы, отсутствует единая точка входа, не определены приоритеты выполнения задач и сроки их решения.

Это приводит к снижению прозрачности работы IT-поддержки, затрудняет контроль загрузки специалистов и не позволяет объективно оценивать качество предоставляемых IT-услуг. В результате увеличивается время реакции на инциденты, растут операционные риски и снижается общая эффективность использования корпоративных информационных систем.

Для повышения управляемости IT широко применяется подход IT Service Management (ITSM), в рамках которого IT рассматривается как набор сервисов с измеримыми показателями качества. Наиболее известным набором практик в этой области является библиотека лучших практик ITIL, описывающая процессы работы с инцидентами, запросами пользователей, изменениями и уровнем сервиса.

Однако внедрение ITIL в полном объеме на практике часто оказывается избыточным: возрастает сложность процессов, увеличивается объем регламентов и требований, что не всегда оправдано для предприятий среднего масштаба. В результате возникает необходимость более простых и гибких подходов, которые позволяют навести порядок в IT-поддержке без существенного роста бюрократии.

В этом контексте представляет интерес формирующаяся отечественная инициатива – РИТМ (рациональная IT-методология). Данный подход разрабатывается с участием большого числа специалистов и компаний и ориентирован на практическое применение в российских условиях. В отличие от классических международных методологий, в РИТМ делается акцент на особенностях ведения бизнеса в России, включая уровень зрелости процессов, организационную культуру и реальные ограничения компаний. Несмотря на то, что методология находится в стадии разработки, ожидается, что она позволит предложить более прикладные и адаптированные решения в области управления IT.

В данной работе предлагается адаптированный подход к управлению IT-сервисами, основанный на принципах ITSM и ориентированный на минимально достаточный уровень формализации процессов. Предлагаемое решение направлено на повышение прозрачности, управляемости и эффективности эксплуатации корпоративных информационных систем.

Ключевым элементом предлагаемого подхода является внедрение централизованной службы поддержки пользователей (Service Desk), выступающей в роли единой точки взаимодействия между пользователями и IT-подразделением. Все обращения пользователей фиксируются в системе, что обеспечивает их учет, контроль исполнения и возможность последующего анализа.

В рамках данного подхода в рамках предлагаемого подхода используется базовая классификация обращений, позволяющую структурировать поток задач и повысить управляемость процессов:

– инциденты – нарушения в работе информационных систем, требующие оперативного восстановления;

– запросы на обслуживание – стандартные обращения пользователей (настройки, консультации, предоставление доступов);

– запросы на изменения – инициативы по доработке или изменению функциональности систем.

Разделение обращений на указанные категории позволяет корректно расставлять приоритеты, распределять ресурсы и применять различные правила обработки в зависимости от влияния на бизнес-процессы.

Важным элементом предлагаемого подхода является внедрение соглашений об уровне сервиса (SLA), определяющих целевые сроки реакции на обращения и их решения. Использование SLA позволяет согласовать ожидания пользователей и возможности IT-подразделения, а также повысить прозрачность процессов поддержки.

Для оценки качества предоставляемых IT-услуг предлагается использовать измеримые показатели (SLI), такие как время реакции, время решения и доля обращений, обработанных в рамках SLA. На основе этих показателей формируются целевые значения (SLO), которые позволяют контролировать уровень сервиса и выявлять проблемные зоны.

Предлагаемый подход не предполагает внедрение полного набора процессов, описанных в ITIL, а ограничивается минимально необходимыми элементами, обеспечивающими управляемость и прозрачность. Это позволяет снизить организационную нагрузку и упростить внедрение подхода в условиях ограниченных ресурсов.

В результате перехода к централизованной модели обработки обращений обеспечивается накопление статистических данных, необходимых для анализа работы IT-подразделения, выявления узких мест и принятия обоснованных управленческих решений.

Внедрение адаптированного подхода к управлению IT-сервисами позволяет существенно повысить управляемость процессов сопровождения корпоративных информационных систем без значительного увеличения организационной сложности.

Прежде всего, за счет внедрения централизованной службы поддержки пользователей обеспечивается полная фиксация всех обращений, что исключает их потерю и формирует единое информационное пространство взаимодействия между пользователями и IT-подразделением. Это повышает прозрачность процессов и упрощает контроль выполнения задач.

Использование классификации обращений позволяет структурировать поток задач и способствует повышению эффективности распределения ресурсов. В частности, критические инциденты, влияющие на бизнес-процессы, обрабатываются в приоритетном порядке, что снижает риски простоев и потерь.

Введение соглашений об уровне сервиса (SLA) и соответствующих метрик (SLI, SLO) обеспечивает формализацию ожиданий пользователей и создает основу для объективной оценки качества IT-поддержки. Это позволяет перейти от субъективного восприятия эффективности к измеримым показателям, на основе которых могут приниматься управленческие решения.

Дополнительным эффектом является накопление статистических данных о работе IT-подразделения. Анализ этих данных позволяет выявлять системные проблемы, оценивать нагрузку на специалистов, а также определять приоритетные направления развития корпоративных информационных систем.

В совокупности указанные изменения создают условия для перехода от реактивной модели поддержки к управляемой сервисной модели, ориентированной на предупреждение инцидентов и повышение стабильности работы систем.

В условиях роста сложности корпоративных информационных систем и увеличения требований к качеству их сопровождения особую актуальность приобретает повышение эффективности управления IT-сервисами.

Практика применения подходов IT Service Management, основанных на практиках ITIL, показывает, что их использование в полном объеме не всегда является целесообразным для производственных организаций, поскольку связано с высокой степенью формализации и значительными организационными затратами.

В работе предложен адаптированный подход к управлению IT-сервисами, основанный на внедрении централизованной службы поддержки пользователей, базовой классификации обращений и использовании метрик качества обслуживания. Данный подход ориентирован на достижение ключевых эффектов ITSM – прозрачности, управляемости и измеримости – при минимально необходимом уровне организационной сложности.

Отдельное внимание уделено формирующимся отечественным инициативам, в частности методологии РИТМ, которая учитывает особенности ведения бизнеса в России и ориентирована на практическое применение. Ожидается, что развитие данного подхода позволит дополнить существующие методологические решения и упростить внедрение эффективных практик управления IT-сервисами.

Таким образом, предложенный подход может использоваться в качестве практической основы для повышения эффективности эксплуатации корпоративных информационных систем и снижения операционных рисков в производственных организациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Вершинин, В.П. Роль цифровизации в области управления проектами. – URL: https://online-science.ru/userfiles/file/vershinin_2024_12_tf0s6tpa6e.pdf(дата обращения 10.04.2026);

2) Поначугин, А.В. Управление IT-сервисами в условиях цифровизации экономики. – URL: https://sovman.ru/item-work/2023-0196/(дата обращения 10.04.2026);

3) Кузнецов, Н.В. Управление проектами цифровизации: методологический, организационный и финансовый аспекты. – URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42681(дата обращения 10.04.2026);

4) Урусов, А.М. Особенности внедрения ITSM в российских компаниях. – URL: http://e-koncept.ru/2016/46079.htm (дата обращения: 10.04.2026);

5) itSMF Россия. Основы управления IT-сервисами: рекомендации и практики. – URL: https://itsmf.ru/ (дата обращения: 10.04.2026).

УДК 004.94:004.8:620.22

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

А.А. Крутов, Е.А. Бычков, Е.И. Воеводина

Научный руководитель – **Е.И. Воеводина**, ст. преподаватель,
И.С. Басалов, ст. преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В работе рассматривается задача оптимизации состава фотополимерных смол, применяемых в аддитивных технологиях. Предложен гибридный подход, сочетающий методы машинного обучения и эволюционной оптимизации. Для прогнозирования физико-химических свойств используется многослойный перцептрон, а для поиска оптимального состава — генетический алгоритм.

Ключевые слова: *фотополимерные смолы, оптимизация, нейронные сети, генетический алгоритм, аддитивные технологии, машинное обучение.*

HYBRID APPROACH TO OPTIMIZING THE COMPOSITION OF PHOTOPOLYMER RESINS USING NEURAL NETWORKS AND EVOLUTIONARY ALGORITHMS

A.A. Krutov, E.A. Bychkov, E.I. Voevodina

Scientific Supervisor – **E.I. Voevodina**, Senior Lecturer,
I.S. Basalov, Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The paper considers the problem of optimizing the composition of photopolymer resins used in additive manufacturing. A hybrid approach combining machine learning and evolutionary optimization is proposed. A multilayer perceptron is used to predict physical and chemical properties, while a genetic algorithm is applied to find optimal compositions.

Keywords: *photopolymer resins, optimization, neural networks, genetic algorithm, additive manufacturing, machine learning*

Современное развитие аддитивных технологий требует создания фотополимерных композиций с заранее заданными физико-механическими свойствами. Задача поиска оптимального соотношения компонентов является многокритериальной и характеризуется высокой нелинейностью. Традиционные эмпирические методы подбора требуют значительных временных и материальных затрат. Стандартные физико-химические формулы для смешивания составов позволяют работать с несколькими смолами, при увеличении их количества точность начинает резко снижаться. В данной работе предложена архитектура гибридной системы, объединяющей предсказательную способность нейронных сетей и поисковую эффективность эволюционных алгоритмов.

Для перехода к математической постановке задачи оптимизации состава фотополимерных смол необходимо ввести формальное описание исследуемой системы. Рассматриваемая фотополимерная композиция представляет собой многокомпонентную смесь, свойства которой определяются соотношением входящих компонентов и их взаимодействием. В рамках построения математической модели состав смеси удобно представить в виде вектора концентраций компонентов, что позволяет перейти от качественного описания к количественной формализации задачи. В данной работе состав фотополимерной композиции описывается вектором концентраций компонентов:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \sum_{i=1}^{n} x_i = 1, \# \quad (1)$$

где x_i – доля i-го компонента в смеси. Необходимо найти такой вектор X, который максимизирует комплексный показатель качества:

$$F(X) = \sum_{j=1}^{m} w_j \cdot y_j(X) \rightarrow \max, \# \quad (2)$$

где y_j – нормализованные значения эксплуатационных свойств (твердость, вязкость, прочность на разрыв), а w_j – весовые коэффициенты значимости параметров.

Помимо условия материального баланса (1), вектор состава X ограничен областью химической стабильности и технологической применимости: $x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,max}$. Например, избыточное содержание фотоинициатора ($x_{pi} > 5\%$)может привести к чрезмерно быстрой полимеризации и деформации изделия, в то время как недостаток олигомера снижает вязкость ниже допустимого порога для DLP/LCD печати

Предлагаемый гибридный подход реализуется в два этапа:

1. Суррогатное моделирование свойств. Для аппроксимации функции $y(X)$ используется многослойный перцептрон (MLP). Входной слой сети принимает вектор X, скрытые слои с функцией активации $ReLU$ выделяют нелинейные зависимости, а выходной слой формирует прогноз свойств Y_{pred}. Обучение проводится на данных лабораторных испытаний путем минимизации функции потерь MSE:

$$L = \frac{1}{N} \sum \left(Y_{pred} - Y_{true}\right)^2 \# \quad (3)$$

Выбор архитектуры MLP обусловлен необходимостью аппроксимации гладких, но нелинейных функций. Рекомендуемая конфигурация включает два скрытых слоя по 32 и 16 нейронов соответственно. Для предотвращения переобучения на малых выборках (характерных для химических экспериментов) в архитектуру внедряются слои Dropout с коэффициентом 0.1–0.2 и применяется регуляризация L_2. В качестве оптимизатора используется алгоритм Adam, обеспечивающий адаптивный выбор шага обучения.

2. Эволюционный поиск. На обученной нейросетевой модели запускается генетический алгоритм. Нейросеть выступает в роли «виртуального анализатора», позволяя мгновенно оценивать приспособленность тысяч генерируемых составов без проведения реальных экспериментов. Алгоритм включает операторы турнирного отбора, двухточечного скрещивания и адаптивной мутации. Использование генетического алгоритма обусловлено сложным рельефом целевой функции (2), которая может иметь множество локальных максимумов. В отличие от градиентных методов, GA оперирует популяцией решений, что позволяет эффективно исследовать всё пространство составов. В данной работе применяется стратегия элитизма, при которой лучшие 5% составов переходят в следующее поколение без изменений, что гарантирует сохранение найденных оптимумов в процессе эволюции.

Предложенный гибридный подход позволит интегрировать нейросетевые технологии и эволюционный поиск, переводя разработку материалов из эмпирики в область направленного цифрового синтеза. Использование многослойного перцептрона в качестве суррогатной модели позволяет с высокой точностью прогнозировать свойства полимеров, в то время как генетический алгоритм эффективно оптимизирует состав в многомерном пространстве параметров. Данная архитектура позволит сократить объем испытаний и закладывает основу для создания систем автоматизированного проектирования, позволяя реализовывать концепцию сквозного моделирования «от состава к детали».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Бачурин, Д.В. Применение генетических алгоритмов в задачах многокритериальной оптимизации / Д.В. Бачурин // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2021. – № 3. – С. 54–67.

2) Ватульян, А.О. Обратные задачи в материаловедении / А.О. Ватульян. – Москва: Физматлит, 2021. – 192 с.

3) Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, А.Ю. Довбыш. – Москва: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

4) Кочетов, А.Н. Оптимизация составов фотополимерных композиций для стереолитографии / А.Н. Кочетов, Е.В. Ермолина // Пластические массы. – 2022. – № 5–6. – С. 28–31.

5) Крутов, А.А. Ключевые глобальные тренды рынка цифрового инверсного проектирования / А.А. Крутов, Е.А. Бычков, Е.И. Воеводина, А.М. Сальников // Теоретическая экономика. – 2025. – № 11 (131). – С. 163–181. – DOI: 10.52957/2221-3260-2025-11-163-181.

6) Сидоров, Д.Н. Методы машинного обучения в задачах анализа и прогнозирования свойств материалов / Д.Н. Сидоров // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, № 4. – С. 412–425.

УДК 004.032.26

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДРЕЙФА ДАННЫХ В ПОТОКОВЫХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕТРИК

И.М. Кузьменко, В.А. Язев

Научный руководитель – **В.А. Язев**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена обнаружению дрейфа данных в потоковых системах мониторинга технических метрик. Рассмотрены подходы к выявлению изменений распределения во временных рядах на основе статистических критериев и последовательных детекторов изменений, а также их применение в онлайн–режиме. Результаты показывают важность калибровки порогов и учёта сезонности при сравнении распределений в потоковых данных.

Ключевые слова: *дрейф данных, обнаружение изменений, потоковые данные, временные ряды, мониторинг метрик, PSI, метод Пейджа–Хинкли, статистические критерии*

METHODS FOR DETECTING DATA DRIFT IN STREAMING SYSTEMS USING THE EXAMPLE OF TECHNICAL METRICS TIME SERIES

I.M. Kuzmenko, V.A. Yazev

Scientific Supervisor – **V.A. Yazev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This article is dedicated to the data drift detection in streaming monitoring systems for technical metrics. The article discusses approaches to online drift detection in time series using distribution comparison tests and sequential change detectors, and their use in near–real–time settings. The results highlight the importance of threshold calibration and seasonality awareness when monitoring drift in streaming data.

Keywords: *data drift, change detection, streaming data, time series, metrics monitoring, PSI, Page–Hinkley, statistical tests*

Введение

Распределённые информационные системы генерируют непрерывные потоки технических метрик (трафик запросов, время отклика, частота ошибок, энергопотребление и др.), статистические свойства которых со временем могут изменяться. Неожиданные изменения распределения поступающих данных, известные как дрейф данных (datadrift), способны приводить к деградации качества моделей машинного обучения и сбоям в работе сервисов[1]. Поэтому задача своевременного обнаружения таких изменений (в режиме, близком к реальному времени) критически важна для поддержания устойчивости моделей и сервисов.

Формально дрейф данных определяется как изменение вероятностного распределения случайных величин во времени [2]. Выделяют несколько типов дрейфа по характеру развития во времени: резкий (abrupt) – внезапное скачкообразное изменение распределения (changepoint); постепенный (gradual/incremental) – плавное смещение распределения в течение некоторого интервала; рецидивирующий (recurring) – повторяющееся возвращение ранее наблюдавшегося распределения (например, сезонные циклы нагрузки) [3]. В данной работе рассматривается дрейф входных данных без учёта целевых переменных, то есть изменение распределения потоковых метрик при отсутствии меток. Такой дрейф иногда называют виртуальным (в противоположность реальному дрейфу, затрагивающему зависимость между признаками и целевой переменной) [4]. Цель мониторинга в таких системах – выявить любой значимый сдвиг распределения метрик, указывающий на

неожиданное изменение состояния системы, требующее внимания оператора или перераспределения ресурсов.

Для решения поставленной задачи рассмотрены и экспериментально оценены методы автоматического обнаружения дрейфа распределения во временных рядах сервисных метрик в потоковом (онлайн) режиме. Система детекции должна фиксировать моменты изменения статистики метрик (например, интенсивности трафика, задержки отклика, частоты ошибок, нагрузки и т.п.) с минимальной задержкой, оставаясь при этом устойчивой к шумовым выбросам и регулярным сезонным колебаниям. В работе рассматриваются два основных класса подходов: статистические критерии, сравнивающие текущие распределения данных с эталонным (базовым) распределением; адаптивные онлайн–алгоритмы, специально разработанные для потокового выявления изменений. Далее описываются выбранные методы и методика экспериментов, а затем приводятся результаты их сравнения на реальных данных с искусственно внесёнными дрейфами.

Целью работы является проведение сравнительного анализа методов обнаружения дрейфа данных в потоковых временных рядах технических метрик и оценка их применимости в условиях сезонности и шума.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– проведено сравнительное исследование статистических и адаптивных методов обнаружения дрейфа в потоковых временных рядах;

– выявлены ограничения статистических критериев при наличии регулярных сезонных колебаний;

– показано преимущество адаптивных онлайн-алгоритмов для раннего обнаружения постепенных изменений;

– обоснована целесообразность комбинированного подхода к мониторингу дрейфа данных.

1. Данные и методика эксперимента

Для исследований использован открытый набор данных **Electricity Load Diagrams 2011–2014–370 временных рядов** электропотребления (каналы/клиенты), измеренных с частотой **15 минут** (96 измерений в сутки) за период 2011–2014 гг. [5]. Исходные ряды демонстрируют выраженную суточную и недельную сезонность, что позволяет проверить устойчивость детекторов к регулярным циклическим колебаниям.

На основе выбранного временного ряда формировался поток наблюдений. Рассматривались четыре сценария дрейфа:

– **Резкий скачок уровня:** в момент времени t_0 ко всем последующим значениям добавляется константа $\Delta\mu$, что приводит к мгновенному сдвигу математического ожидания.

– **Постепенный тренд:** среднее значение начинает плавно изменяться на протяжении длительного интервала, имитируя медленный дрейф порядка нескольких σза ~1000 точек.

– **Шумовые выбросы:** добавляются единичные аномально большие пики, не меняющие параметры распределения, но проверяющие реакцию методов на разовые аномалии.

– **Сезонное искажение:** временно накладывается дополнительная периодическая компонента (например, синусоидальная) без изменения глобального среднего уровня; затем добавленная компонента исчезает (возврат к исходному паттерну).

Кроме дрейфовых сценариев, каждый метод тестировался на **стационарном фрагменте** исходного ряда без искусственных вмешательств, чтобы оценить частоту ложных срабатываний на естественную сезонность. Для сравнения методов использованы метрики: **время обнаружения дрейфа** – задержка между истинным моментом изменения и сигналом алгоритма; **частота ложных тревог** – доля срабатываний при отсутствии реального дрейфа; **чувствительность** – минимальная величина сдвига, которая надёжно выявляется методом; **вычислительная нагрузка** – условная оценка сложности и скорости обработки потока. Все методы предварительно **калибровались** на сопоставимый низкий уровень ложных тревог

(~1%) на стационарном участке путём подбора параметров (уровня значимости, порогов детекторов и т.п.), что обеспечивает корректное сравнение по остальным критериям.

2. Статистические методы сравнения распределений

Суть статистического подхода заключается в периодическом сравнении текущего распределения данных с некоторым эталонным (базовым) распределением с помощью критериев согласия. Эталонным может служить распределение на историческом промежутке или на исходном фрагменте до предполагаемого дрейфа. Если наблюдаются статистически значимые различия между выборками, делается вывод о смене распределения (фиксации дрейфа). В рамках работы рассмотрены три популярных метода данного класса: индекс стабильности выборки (Population Stability Index, PSI), критерий Колмогорова–Смирнова (K–S) и критерий Пирсона (χ^2).

PSI (Population Stability Index, индекс стабильности распределения) – широко применяется на практике для мониторинга дрейфа входных признаков. PSI вычисляется путём разбиения диапазона значений признака на фиксированные интервалы (бины) и сравнения гистограмм частот для baseline (исходной выборки) и новой поступающей выборки. Формула индекса определяется как сумма отклонений по всем m бинам:

$$PSI = \sum_{i=1}^{m} (O_i - E_i) \ln(\frac{O_i}{E_i}). \quad (1)$$

Здесь O_i – доля наблюдений нового периода в i–м интервале, E_i – доля наблюдений в том же интервале для базового периода. Значения PSI **часто** интерпретируют по эвристическим порогам: PSI< 0.1 – слабые изменения, 0.1–0.25 – умеренные, PSI ≥ 0.25 – существенные; **однако** практические пороги зависят от схемы бининга и прикладного контекста и в экспериментах уточняются при калибровке параметров. Благодаря агрегированию по бинам PSI отражает именно величину сдвига распределения, а не объём выборки: при больших размерах выборки небольшие отличия не «раздувают» индекс сами по себе (в отличие от статистических критериев, где *p*–значение снижается с ростом *n* даже для очень малых сдвигов). Обратной стороной является инерционность: малые постепенные дрейфы могут не приводить к превышению порога долгое время. На практике PSI полезен для общего мониторинга стабильности данных и выявления крупных сдвигов, но мало подходит для быстрой сигнализации о небольших изменениях.

Критерии Колмогорова–Смирнова и χ^2. Двухвыборочный K–S тест и критерий χ^2 согласия – классические статистические методы проверки гипотезы о равенстве распределений. K–S тест основан на максимальном отличии между эмпирическими функциями распределения выборок:

$$D_{n,m} = sup_x |F_1(x) - F_2(x)|, \quad (2)$$

где $F_1(x)$ и $F_2(x)$– эмпирические функции распределения базовой и текущей выборок соответственно, а $D_{n,m}$– максимальное расстояние между ними.

Критерий χ^2 требует предварительной дискретизации (разбиения диапазона на категории) и сравнивает наблюдаемые и ожидаемые частоты по бинам, вычисляя статистику

$$\chi^2 = \sum_i \frac{\left(N_i^{(\text{obs})} - N_i^{(\text{exp})}\right)^2}{N_i^{(\text{exp})}}, \quad (3)$$

где $N_i^{(\text{obs})}$– наблюдаемая частота в i-м бине, а $N_i^{(\text{exp})}$– ожидаемая частота в i-м бине.

В контексте детектирования дрейфа оба теста выполняются периодически на скользящем окне данных – например, сравнивается распределение последних N наблюдений с распределением эталонного окна (или с более старой частью потока). Если p – значение оказывается ниже заданного уровня значимости α (например, 0.01), делается вывод о статистически значимом изменении. Преимущество критериев K–S и χ^2 – высокая

чувствительность ко всем видам отличий (как в среднем, так и в форме распределения). Они способны фиксировать даже небольшие сдвиги при достаточном объёме данных. На больших выборках K–S тест становится очень чувствительным: даже небольшие сдвиги (например, на уровне долей процента–нескольких процентов) могут приводить к крайне малым *p*–значениям. Поэтому для практического мониторинга требуется калибровка уровня значимости и/или правил срабатывания с учётом объёма данных и допустимой «практической значимости» изменений. На больших выборках критерии могут выдавать крайне малые *p*–значения даже для статистически незначимых (с практической точки зрения) отклонений. Иными словами, без учёта размера выборки эти тесты склонны сигнализировать о любом небольшом дрейфе, что может приводить к частым ложным тревогам при больших ***N***. В эксперименте уровни значимости были подобраны так, чтобы обеспечить <1% ложных срабатываний на известном стационарном участке.

3. Онлайн–алгоритмы обнаружения дрейфа

Онлайн–алгоритмы работают непрерывно, обновляясь с приходом каждого нового значения, и самостоятельно принимают решение о наличии изменения без необходимости внешнего запуска теста. Такие методы обычно оперируют накопленными статистиками или последовательностью ошибок модели. В данном сравнении рассматриваются два базовых алгоритма: ADWIN и DDM, а также кратко упоминается подход Page–Hinkley в качестве классического эталона.

ADWIN (Adaptive Windowing) – популярный алгоритм для онлайн–детекции изменений в потоках данных с автоматической подстройкой размера выборки [6]. Метод поддерживает скользящее окно переменной длины, содержащее последние наблюдения, и при поступлении каждого нового значения проверяет, не появилось ли статистически значимое различие между «старой» и «новой» частями окна. Алгоритм пытается разбить текущее окно W на две части (W_0 и W_1), где W_1 содержит n самых последних точек, а W_0– остальные, более «старые» данные. Вычисляются средние старой и новой частей (условно $\bar{x_{W0}}$ и $\bar{x_{W1}}$). Если модуль разности этих средних $\left|\overline{x_{W_1}} - \overline{x_{W_0}}\right|$ превышает допустимый порог при заданном уровне значимости δ, считается, что распределение изменилось – ADWIN объявляет дрейф и отбрасывает старую часть W_0, оставляя в окне только данные W_1. Порог ε выводится из неравенства Хёффдинга при заданном уровне значимости δ: ADWIN сигнализирует дрейф, если существует разбиение окна на W_0 и W_1, для которого

$$\left|\overline{x_{W_1}} - \overline{x_{W_0}}\right| > \varepsilon, \tag{4}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{2m} ln\left(\frac{4}{\delta}\right)}, \tag{5}$$

$$m = \left(\frac{1}{|W_0|} + \frac{1}{|W_1|}\right)^{-1}, \tag{6}$$

где δ – уровень значимости, W_0 и W_1 – базовое и текущее окна наблюдений; m – эффективный размер окна, определяемый формулой (6). Если же различия незначимы, окно постепенно расширяется по мере поступления новых точек (алгоритм «терпеливо» увеличивает статистическую мощность теста). Таким образом, ADWIN автоматически подстраивает длину окна: во время длительной стационарности окно растёт, повышая точность оценок, а при резких изменениях – мгновенно сокращается, быстро «забывая» устаревшие данные. Пользователю не требуется задавать фиксированную длину окна заранее. Параметр δ регулирует чувствительность детектора: меньшие δ делают алгоритм более консервативным (реже ложные срабатывания, но выше риск пропустить мелкие дрейфы), большие δ – повышают чувствительность ценой увеличения числа ложных тревог. ADWIN способен обнаруживать как резкие, так и постепенные дрейфы: резкие проявляются сразу в виде большого сдвига внутри окна, а постепенные фиксируются, когда накопленный плавный сдвиг становится статистически значимым. Алгоритм не требует наличия целевой

переменной или вычисления ошибки модели – он работает непосредственно с последовательностью значений метрики, что удобно для задачи мониторинга технических показателей. В реализации ADWIN используется эффективная структура для хранения окна с амортизированным временем обработки порядка $O(\log W)$ на одну точку, где W – текущая длина адаптивного окна, что позволяет применять его на высокоскоростных потоках.

DDM (Drift Detection Method)– классический алгоритм обнаружения концептуального дрейфа, изначально разработанный для мониторинга качества классификатора во времени. Он отслеживает текущую вероятность ошибки модели и её дисперсию, сравнивая их с минимальными ранее достигнутыми значениями. Если выполняется условие

$$p_i + s_i \geq p_{\min} + 3s_{\min}, \tag{7}$$

где $p_{\min}$ и $s_{\min}$– минимальные зафиксированные до текущего момента значения ошибки и её дисперсии, то объявляется дрейф, т.е. значимое ухудшение качества. При выполнении условия

$$p_i + s_i \geq p_{\min} + 2s_{\min}, \tag{8}$$

фиксируется предупреждение о возможном начале дрейфа. DDM отличается низкой вычислительной сложностью $O(1)$ на наблюдение и удобен для задач, где доступен поток ошибок модели. Однако его прямое применение к техническим метрикам без целевой переменной ограничено, поскольку алгоритм требует меток. В таких случаях возможен косвенный подход: построение простой прогнозной модели и мониторинг её ошибки как индикатора дрейфа входных данных. Существуют модификации DDM, ориентированные на более раннее обнаружение постепенных изменений. В экспериментах DDM показал низкую чувствительность к постепенным изменениям и срабатывал с заметной задержкой.

Существует множество иных подходов онлайн–детекции. Классический метод контроля среднего – критерий Page–Hinkley (PH) – представляет собой вариант алгоритма CUSUM, где непрерывно вычисляется кумулятивное отклонение значений метрики от её текущего среднего с небольшим допустимым смещением δ [8]. Превышение этой суммы сверх заданного порога λ сигнализирует о значимом сдвиге среднего. Метод Page–Hinkley широко используется для обнаружения резких разрывов тренда в потоковых данных и контроля качества процессов. В настоящем исследовании основной упор сделан на два контрастирующих метода – ADWIN и DDM – как примеры подходов к мониторингу распределения входных данных и к мониторингу косвенных признаков (ошибки модели) соответственно.

4. Результаты экспериментов

Резкий скачок распределения. При внесении резкого скачка среднего уровня ($\Delta\mu$) все рассмотренные методы надёжно зафиксировали крупное изменение, если сдвиг достигал хотя бы ~1.0σ (одного стандартного отклонения исходного ряда). Для меньшего скачка, порядка $\Delta\mu = 0.5\sigma$, статистические тесты (K–S и χ^2) благодаря большому окну всё равно выявили значимое отличие (p–value< 0.01), тогда как PSI остался ниже порога 0.1 и пропустил столь малый сдвиг (не подав сигнал). ADWIN и DDM также чаще всего не реагировали на настолько небольшой кратковременный сдвиг среднего: адаптивное окно ADWIN сглаживало половинный скачок внутри себя, а ошибка модели в DDM увеличивалась незначительно. По задержке обнаружения при крупном скачке ($\Delta\mu \geq 1\sigma$) лидировал ADWIN – он сигнализировал практически сразу (через несколько десятков точек после момента t_0). Статистические критерии с фиксированным окном выявляли изменение при ближайшей проверке окна (т.е. в пределах последних N точек после t_0). DDM среагировал медленнее: пока средняя ошибка модели превысила порог, прошло порядка сотни точек. После единичного скачка проявилось различие в поведении методов: статистические тесты (без обновления baseline) продолжали сигнализировать и после скачка, интерпретируя новые данные как отличные от исходного распределения. В противоположность этому, онлайн–алгоритмы ADWIN и DDM автоматически адаптировались к новому уровню (ADWIN отбросил старые данные, DDM после

перестройки модели на новые данные снизил ошибку) и не выдавали повторных тревог по тому же событию.

Смоделирован плавный тренд, при котором среднее метрики увеличивалось линейно на заданную величину (до нескольких σ) за ~1000 точек. Статистические тесты (K–S, χ^2) зафиксировали изменение, только когда накопленный сдвиг стал достаточно велик – фактически ближе к середине интервала дрейфа, когда совокупное изменение превысило ~1σ. Иными словами, они сработали лишь в момент, когда текущие данные и исходное «базовое» окно уже существенно разошлись; при этом если baseline не обновлять, тесты затем будут сигнализировать постоянно, так как новые данные всё сильнее отличаются от изначального распределения по мере продолжения дрейфа. ADWIN отреагировал на постепенный сдвиг гораздо раньше: он постепенно сокращал окно по мере нарастания тренда и подал сигнал примерно через первую треть полного интервала изменения (т.е. при ~30% совокупного сдвига, значительно быстрее статистических тестов в наших условиях). DDM оказался недостаточно эффективен в этом сценарии – ошибка модели росла плавно и превысила статистический порог только ближе к концу дрейфа. Классический DDM зафиксировал факт дрейфа с большой задержкой. PSI также почти не отреагировал на плавный тренд: значение индекса увеличивалось очень медленно и достигло пороговых ~0.1 лишь после полной реализации дрейфа (сигнал от PSI пришёл уже постфактум). Таким образом, по своевременности обнаружения плавных изменений ADWIN значительно превосходит методы с фиксированными окнами; а алгоритм DDM без модификаций и показатель PSI в данном случае мало полезны для оперативной сигнализации.

В эксперименте с наложением временной периодической компоненты (синусоидальные колебания вокруг нулевого среднего) на стационарный ряд обнаружилось важное отличие в реакциях методов. Статистические тесты интерпретировали появление регулярных циклических колебаний как дрейф: K–S тест практически сразу показал значимое отличие распределений, критерий χ^2 – аналогично. Затем, после удаления добавленного колебания, эти тесты снова сигнализировали изменение (возврат к прежнему распределению). Для статистических методов такой сезонный эффект выглядит как два последовательных дрейфа, поскольку они реагируют на изменение формы распределения (рост дисперсии и изменившаяся гистограмма) даже при неизменном среднем значении. PSI отреагировал на появление колебаний слабо (индекс вырос примерно до 0.1, на грани тревожного уровня), что ожидаемо из-за низкой чувствительности PSI к чисто дисперсионным сдвигам. ADWIN, ориентированный на контроль среднего, не выдал сигнал о дрейфе – глобальный уровень ряда не изменился, поэтому критерий значимого сдвига не был превышен. Алгоритм лишь незначительно уменьшил внутренний размер окна, адаптируясь к возросшей вариативности данных, но формально дрейф не зафиксировал. Таким образом, ADWIN продемонстрировал устойчивость к регулярным сезонным колебаниям, тогда как методы прямого сравнения распределений без учёта временного контекста склонны выдавать ложные тревоги на циклические паттерны. DDM в данном сценарии не применим из-за отсутствия целевых меток; можно отметить, что, если бы сезонность привела к увеличению ошибки прогноза, DDM теоретически мог бы среагировать, но такой случай выходит за рамки текущего эксперимента.

Таким образом, характер реакции методов зависит не только от величины отклонения, но и от его структуры во времени: регулярные колебания чаще воспринимаются как изменение распределения, тогда как единичные аномалии во многих случаях подавляются за счёт усреднения по окну. Это позволяет отдельно оценить устойчивость алгоритмов к сезонности и к кратковременным шумовым возмущениям.

На одиночные аномальные выбросы (единичные экстремально большие значения) большинство методов оказались нечувствительны. Один выбивающийся эпизод практически не влияет на статистические тесты с большим окном – его эффект сглаживается среди остальных наблюдений и обычно не приводит к значимому отклонению распределений. Аналогично, единичный выброс почти не меняет значение PSI. Для DDM одна повышенная

ошибка модели также недостаточна для срабатывания – нужен стабильный рост ошибки. Лишь ADWIN в отдельных случаях ошибочно интерпретировал одиночный экстремальный выброс как изменение распределения. Если выброс попадал в середину текущего окна, алгоритм мог разделить окно на части таким образом, что новые данные оказались статистически отличными от старых – это превышало порог и вызывало ложный сигнал дрейфа. Тем не менее частота таких ложных срабатываний ADWIN была невысока (порядка 0.5%: примерно 1 ложный сигнал на 200 выбросов). Остальные методы ложных тревог на одиночный шум практически не выдавали (при корректной настройке порогов).

Основные свойства методов суммированы в табл. 1 (сравнение по ключевым критериям качества).

Таблица 1. Сравнение методов по ключевым критериям качества

Метод	Время реакции	Ложные тревоги	Чувствительность	Нагрузка
ADWIN	Задержка минимальна при резких дрейфах; лучшая при постепенных	Очень низкая (<0.5% на одиночные пики)	Чувствителен к изменениям $\geq \sim 1\sigma$	Низкая (амортизировано $O(\log W)$ на точку, где W – текущая длина окна)
DDM	Значительная (особенно на постепенных дрейфах)	Низкая на стационарных данных; возможны ложные предупреждения при шуме	Реагирует только на крупные изменения (порядка $\geq \sim 1\sigma$ влияния на ошибку)	Минимальная ($O(1)$ на точку)
K–S тест	Задержка ≈ размер окна	Возможны частые ложные тревоги на циклы	Очень высокая на больших выборках	Умеренная ($O(N \log N)$ на проверку)
χ^2 тест	Как у K–S (определяется шагом проверки окна)	Стабилен к шуму; чувствителен к регулярным изменениям формы распределения	Высокая (фиксирует малые сдвиги гистограммы при достаточном N)	Низкая ($O(k)$ на проверку, при k категориях)

В совокупности показателей наиболее универсальным оказался ADWIN, демонстрирующий лучшее сочетание быстрого реагирования и устойчивости. Он обнаруживал резкие аномалии практически незамедлительно и заметно раньше других фиксировал плавные тренды, при этом уровень ложных тревог остаётся низким (при правильной настройке значимости). Статистические тесты (K–S и χ^2) подтверждают свою высокую чувствительность – они способны выявлять даже незначительные сдвиги распределения, что важно для раннего обнаружения слабых тенденций. Однако применять их следует с осторожностью: без учёта объёма данных и периодических факторов эти методы могут давать частые ложные тревоги. PSI целесообразно использовать для контроля крупных изменений и общей стабильности данных, так как этот индекс удобен для интерпретации и не реагирует на мелкие флуктуации – но он неспособен своевременно обнаружить небольшие дрейфы. DDM для прямого мониторинга немеченых технических метрик оказался ограниченно применим: его сигнал о дрейфе запаздывает до значительного накопления изменений и, по сути, отражает уже случившуюся деградацию модели.

На рис. 1 представлен пример визуализации значений показателя drift_last_psi, рассчитанных для набора потоковых технических метрик системы мониторинга. Цветовое кодирование отражает степень выраженности дрейфа (относительно прикладного контекста): зелёная зона соответствует слабым изменениям распределения, жёлтая – умеренному дрейфу, а красная – значительным отклонениям.

Рис. 1. Временная карта значений индекса PSI (drift_last_psi**) для набора потоковых технических метрик системы мониторинга.**

Оптимальной стратегией мониторинга представляется многоуровневый подход, сочетающий преимущества разных методов. Быстрый адаптивный детектор, такой как ADWIN, обеспечивает своевременное оповещение о резких аномалиях и позволяет оперативно реагировать на инциденты. Параллельно целесообразно проводить периодические статистические проверки и вычислять индексы (например, рассчитывать PSI на суточных агрегированных данных, выполнять K–S тест на недельных интервалах и т.п.), что позволит выявлять накопительные сдвиги и тренды, которые не вызывают немедленной тревоги, но могут постепенно привести систему к деградации. При выраженной сезонности следует сравнивать распределения только на сопоставимых интервалах (например, текущий день недели с таким же днём недели в исторических данных) или предварительно устранять сезонную компоненту, чтобы исключить ложные тревоги. После подтверждённого случая дрейфа базовое (эталонное) распределение рекомендуется обновлять до нового состояния, чтобы алгоритмы не сигнализировали повторно об уже произошедшем изменении. Наконец, для повышения надёжности можно требовать подтверждения дрейфа несколькими разными методами одновременно – это снизит вероятность ложной тревоги ценой небольшого увеличения задержки оповещения. Такой комплексный подход обеспечивает более устойчивый контроль потоковых метрик в распределённых системах и своевременное обнаружение значимых изменений в их поведении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Обзор методов адаптации к дрейфу концепции / Ж. Гама, И. Жлиобайте, А. Бифе, Н. Печенизкий, А. Бушашиа // ACM Computing Surveys. – 2014. – Т. 46, № 4. – Ст. 44.

2) Обучение в условиях дрейфа концепции: обзор / Ц. Лу, А. Лю, Ф. Дун [и др.] // IEEE Transactionson Knowledge and Data Engineering. – 2019. – Т. 31, № 12. – С. 2346–2363.

3) Хиндер, Ф. Что мы знаем о дрейфе концепции — обзор мониторинга в изменяющихся средах. Часть B: локализация и объяснение дрейфа концепции / Ф. Хиндер, Б. Хаммер, Т. Вилльман // Frontiersin Artificial Intelligence. – 2024. – Т. 7. – Ст. 1330258.

4) Оливейра, Г**.** Обработка виртуального и реального дрейфа концепции: адаптивная модель гауссовых смесей / Г. Оливейра, Л.Л. Минку, А.Л. И. Оливейра // arXiv: электрон. препринт. – 2021. – URL:https://arxiv.org/abs/2102.05983 (дата обращения: 10.01.2026).

5) Electricity Load Diagrams 2011–2014 // UCI Machine Learning Repository. – URL: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/ElectricityLoadDiagrams20112014 (дата обращения: 10.01.2026).

6) Бифе, А. Обучение на изменяющихся во времени данных с использованием адаптивного окна / А. Бифе, Р. Гавальда // Proc. of the SIAM Int. Conf. on Data Mining. – Minneapolis: SIAM, 2007. – С. 443–448.

7) Обучение с обнаружением дрейфа / Ж. Гама, П. Медаш, Г. Кастильо, П. Родригеш // Lecture Notes in Computer Science. – 2004. – Т. 3171. – С. 286–295.

8) Пейдж, Э.С. Схемы непрерывного контроля / Э.С. Пейдж // Biometrika. – 1954. – Т. 41, № 1–2. – С. 100–115.

УДК 004.056

АНАЛИЗ УГРОЗ И ОГРАНИЧЕНИЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.А. Кухарчук, Д.С. Кухарчук

Научный руководитель – **А.В. Никитенко**, канд. пед. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье анализируются современные угрозы распределённых корпоративных информационных систем (РКИС), включая атаки на оркестрацию, каскадные отказы и человеческий фактор. Выявлены ограничения существующих моделей безопасности (статичность, фрагментарность, слабая связь с бизнес-показателями). Обоснована необходимость гибридной вероятностно-игровой модели для количественной оценки киберустойчивости РКИС в динамической среде.

Ключевые слова: *распределённые корпоративные информационные системы (РКИС), киберустойчивость, математическое моделирование угроз, гибридные вероятностно-игровые модели*

ANALYSIS OF THREATS AND LIMITATIONS OF EXISTING SECURITY MODELS FOR DISTRIBUTED CORPORATE INFORMATION SYSTEMS

A.A. Kukharchuk, D.S. Kukharchuk

Scientific Supervisor - **A.V. Nikitenko**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article analyzes modern threats to distributed corporate information systems (DCIS), including orchestration attacks, cascading failures, and the human factor. Limitations of existing security models (static nature, fragmentation, weak linkage with business metrics) are identified. The necessity of a hybrid probabilistic-game model for quantitative assessment of DCIS cyber resilience in a dynamic environment is substantiated.

Keywords: *distributed corporate information systems, cyber resilience, mathematical threat modeling, hybrid probabilistic-game models*

Введение

Переход к распределённым архитектурам за последние два десятилетия стал доминирующей тенденцией в развитии корпоративных информационных систем (КИС). Если ранее преобладали монолитные приложения, развёрнутые в пределах одного центра обработки данных, то сегодня типичная КИС представляет собой территориально распределённую структуру, включающую облачные сервисы (IaaS, PaaS, SaaS), микросервисы, контейнерные среды (Docker, Kubernetes), а также устройства интернета вещей и элементы BYOD.

Усложнение архитектуры порождает новые классы угроз и ужесточает требования к комплексной безопасности. Традиционный периметр защиты становится размытым, поверхность атаки многократно возрастает за счёт множества микросервисов, сетевых взаимодействий и удалённых устройств. В этих условиях обеспечение безопасности распределённых корпоративных информационных систем (РКИС) перестаёт быть сугубо технической задачей и превращается в критический фактор непрерывности бизнеса и экономической устойчивости организаций.

В данной статье на основе анализа современного состояния РКИС, систематизации актуальных угроз и обзора существующих подходов к их защите выявляются ключевые проблемы и противоречия, которые определяют необходимость разработки новых математических моделей комплексной оценки безопасности. Основное внимание уделяется

специфике угроз для распределённых архитектур, а также ограничениям существующих нормативных, организационных и математических методов. Результаты работы служат обоснованием актуальности исследований, направленных на создание гибридных моделей, объединяющих учёт случайных отказов, целенаправленных атак и динамики системы в рамках единого количественного подхода.

1. Систематизация угроз для распределенных архитектур

Для эффективного противодействия угрозам необходимо их четко систематизировать с учётом особенностей распределённых систем. В отличие от централизованных архитектур, где основные риски связаны с нарушением периметра и отказом центральных узлов, в РКИС возникает ряд специфических уязвимостей, обусловленных наличием сетевых взаимодействий, необходимостью синхронизации данных между узлами, гетерогенностью компонентов и усложнением топологии[1].

В распределённых системах данные передаются по сетям, которые могут быть как защищёнными, так и публичными. При отсутствии надёжного шифрования злоумышленник может перехватывать трафик или модифицировать его в реальном времени. Особую опасность представляют атаки на протоколы репликации: компрометация одного узла базы данных может привести к распространению искажённых данных на все остальные узлы, нарушая целостность системы в масштабе.

Помимо классических DDoS-атак на сетевом уровне, распределённые системы уязвимы к атакам на уровне приложений (HTTP flood, Slowloris), которые истощают ресурсы веб-серверов и серверов приложений. В микросервисной архитектуре атака на один критический сервис способна вызвать каскадный отказ из-за блокировок и таймаутов в цепочках вызовов. Кроме того, целевые атаки на механизмы балансировки нагрузки или DNS-серверы могут сделать недоступными все сервисы, использующие соответствующие доменные имена.

Современные РКИС активно используют инструменты координации: сервисы обнаружения, распределённые блокировки, менеджеры конфигураций (Kubernetes, ZooKeeper, etcd). Эти компоненты становятся критическими точками. Компрометация плоскости управления, например API-сервера Kubernetes, предоставляет злоумышленнику полный контроль над всеми контейнерами и приложениями в кластере. Атаки на сервисы обнаружения могут перенаправить трафик на вредоносные узлы.

В большой распределённой сети проникновение на один, даже не самый важный, узел часто является лишь первым шагом. Злоумышленник исследует сеть, используя украденные учётные данные, уязвимости в доверительных отношениях между узлами, атаки Pass-the-Hash и другие техники, чтобы перемещаться к более ценным ресурсам. Это делает необходимым не только обнаружение вторжения, но и контроль за внутренними перемещениями [3].

Поскольку современные РКИС строятся на виртуализации и контейнерах, возникают специфические риски: прорыв изоляции между виртуальными машинами, компрометация образов контейнеров из ненадёжных источников, запуск контейнеров с избыточными привилегиями, а также ошибки конфигурации оркестраторов.

Приведённая классификация показывает, что угрозы для РКИС не ограничиваются традиционными нарушениями конфиденциальности, целостности и доступности. Они приобретают новые измерения, связанные с архитектурной сложностью, динамикой и зависимостью от доверенных компонентов. Это требует пересмотра подходов к оценке рисков и разработки моделей, способных учитывать как случайные отказы, так и целенаправленные, адаптивные действия злоумышленника.

2. Анализ существующих подходов и их ограничений

Обеспечение безопасности РКИС требует комплексного подхода, объединяющего организационные, технические и криптографические методы. Вместе с тем анализ существующих моделей оценки рисков, надёжности и киберустойчивости показывает, что ни

один из распространённых подходов в отдельности не позволяет в полной мере количественно оценить уровень безопасности динамичной распределённой системы.

В практике управления информационной безопасностью широко применяются как качественные методы (матрицы рисков, методологии FRAP, OCTAVE), так и количественные, основанные на понятии годового ожидаемого убытка. Эти подходы позволяют ранжировать риски и обосновывать инвестиции в защиту. Однако они обладают существенными недостатками применительно к РКИС:

- статичны и не учитывают динамику архитектуры (масштабирование, миграцию сервисов);
- плохо адаптированы для оценки вероятности редких, но высокоэффективных целевых атак;
- не отражают взаимосвязи между компонентами, что приводит к недооценке каскадных эффектов.

Для анализа доступности и отказоустойчивости РКИС традиционно используются аппарат теории графов (оценка связности, минимальных разрезов), теория массового обслуживания (анализ задержек и пропускной способности) и марковские процессы (моделирование переходов между состояниями работоспособности и отказа). Эти методы хорошо зарекомендовали себя для учёта случайных отказов оборудования, но они [2]:

- ориентированы на случайные события, тогда как действия злоумышленника являются адаптивными и целенаправленными;
- редко объединяют в одной модели требования конфиденциальности, целостности и доступности;
- страдают от «проклятия размерности» при попытке детального моделирования крупных систем (сотни и тысячи узлов).

В последние годы активно развиваются методы, нацеленные на преодоление указанных ограничений. Среди них:

- теоретико-игровые модели, позволяющие формализовать конфликтное взаимодействие «злоумышленник–защитник» и находить оптимальные стратегии защиты;
- имитационное моделирование (дискретно-событийное, агентное), дающее возможность проигрывать сложные сценарии атак на цифровых двойниках систем;
- модели на основе нечёткой логики и нейросетей, применяемые для оценки рисков в условиях неопределённости и для обнаружения аномалий [5].

Эти подходы значительно расширяют возможности анализа, однако их практическое применение в комплексных системах сопряжено с трудностями: высокая вычислительная сложность, сложность параметризации (особенно для редких угроз), а также фрагментарность – каждая модель обычно охватывает лишь один аспект безопасности.

Проведённый анализ позволяет выделить следующие системные недостатки существующих моделей применительно к РКИС:

- Статичность – большинство моделей дают «моментальный снимок» безопасности и не успевают за динамикой облачных и контейнерных сред.
- Фрагментарность – отсутствует единый подход, объединяющий учёт случайных отказов, целенаправленных атак, архитектурных особенностей и человеческого фактора.
- Сложность масштабирования – детализированные аналитические модели становятся вычислительно неразрешимыми для крупных систем, а имитационные требуют значительных ресурсов.
- Слабая связь с бизнес-показателями – технические параметры защищённости (вероятность взлома, время восстановления) трудно перевести в ожидаемый финансовый ущерб и показатели уровня обслуживания (SLA).

Эти ограничения подтверждают необходимость разработки новых комплексных математических моделей, которые могли бы интегрировать преимущества различных подходов и обеспечить количественную оценку киберустойчивости РКИС в динамической среде [4].

3. Направления совершенствования математических моделей

Проведённый анализ позволяет сформулировать требования к перспективной модели комплексной безопасности РКИС, а также определить пути её построения. Основная идея заключается в переходе от статических фрагментарных подходов к единой гибридной модели, способной объединить учёт случайных отказов, целенаправленных действий злоумышленника, архитектурных особенностей и динамики системы.

Ключевым направлением является объединение вероятностных методов, традиционно применяемых для анализа надёжности, с аппаратом теории игр, позволяющим формализовать конфликтное взаимодействие защитника и злоумышленника. В рамках такого подхода марковские процессы и деревья отказов описывают случайные сбои оборудования и ошибки персонала, а стохастическая игра задаёт адаптивное поведение нарушителя, который выбирает наиболее эффективные векторы атаки в зависимости от текущей конфигурации системы и реализованных мер защиты. Совместное использование этих инструментов даёт возможность находить равновесные стратегии распределения ограниченных ресурсов безопасности.

Вторым важным направлением выступает применение графовых моделей для представления архитектуры РКИС. Система описывается в виде взвешенного ориентированного графа, вершины которого соответствуют узлам (серверы, контейнеры, сервисы), а рёбра – сетевым взаимодействиям между ними. Такое представление позволяет анализировать структурную уязвимость, выявлять критические узлы и минимальные разрезы, а также моделировать распространение атаки после первоначальной компрометации. Интеграция графовой модели с теоретико-игровой даёт возможность оценивать, какие узлы наиболее выгодно защищать в первую очередь и как изменяется траектория атакующего при варьировании конфигурации защиты.

Для учёта динамики, присущей современным распределённым системам (автомасштабирование, миграция контейнеров, частые обновления), модель должна предусматривать периодический пересчёт ключевых показателей безопасности, переходя от «моментального снимка» к оценке устойчивости как процесса во времени. В качестве основных метрик предлагаются вероятность успешной реализации атаки, среднее время восстановления после инцидента, ожидаемый ущерб за заданный период и интегральный коэффициент киберустойчивости. Связь с бизнес-показателями обеспечивается функцией ущерба, которая переводит технические параметры инцидентов (длительность простоя, объём утечки данных) в финансовые потери с учётом репутационных рисков и регуляторных штрафов.

Наконец, для обеспечения вычислительной реализуемости модели в крупных системах (сотни и тысячи узлов) необходимо применение методов агрегирования и декомпозиции. Иерархическое разделение системы на подсистемы позволяет проводить детальный анализ внутри кластеров, а взаимодействие между ними описывать с помощью упрощённых эквивалентов. Для однотипных элементов (например, множества идентичных контейнеров) используются статистически усреднённые характеристики отказов и восстановления. При имитационном моделировании применяются методы сокращения числа прогонов (латинский гиперкуб, квази-Монте-Карло), что позволяет получать устойчивые оценки без экспоненциального роста вычислительных затрат.

Таким образом, предлагаемый комплекс направлений совершенствования математических моделей нацелен на создание целостного аппарата, который позволит количественно обосновывать архитектурные решения и инвестиции в безопасность, прогнозировать последствия инцидентов и эффективно управлять киберустойчивостью распределённых корпоративных информационных систем в динамичной среде.

Заключение

Проведённый анализ показал, что переход к распределённым архитектурам (облачные технологии, микросервисы, контейнеризация) привёл к появлению новых классов угроз, включая атаки на плоскости управления, каскадные отказы и компрометацию цепочек

поставок. Существующие подходы к обеспечению безопасности – как нормативные, так и математические – не в полной мере отвечают требованиям динамичных распределённых систем. Классические модели рисков и надёжности статичны, ориентированы на случайные события и слабо связаны с бизнес-показателями; современные теоретико-игровые и имитационные методы сложны в масштабировании и параметризации.

Для преодоления этих ограничений предложена концепция гибридной математической модели, объединяющей вероятностные методы (учёт отказов), теорию игр (моделирование адаптивного поведения злоумышленника) и графовое представление архитектуры (анализ структурной уязвимости и распространения атак). Такой подход позволит перейти к количественной оценке киберустойчивости, связав технические параметры защиты с ожидаемым экономическим ущербом.

Дальнейшие исследования будут направлены на формализацию модели, разработку алгоритмов расчёта интегральных показателей безопасности и их апробацию на реальных конфигурациях РКИС. Полученные результаты создают основу для создания инструментария обоснованного управления безопасностью в условиях цифровой трансформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Моисеев, А.И. Информационная безопасность распределенных информационных систем: учеб. по специальности «Информ. безопасность автоматизир. систем» / А.И. Моисеев, Д.Б. Жмуров; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара: Изд-во СГАУ, 2013. – on-line.

2) Методы и средства обеспечения информационной безопасности распределенных корпоративных систем: монография / под ред. В. А. Сухомлина. – Москва: ИПУ РАН, 2017. – 156 с.

3) Безопасные архитектуры распределенных систем / А.А. Грушо, Н.А. Грушо, Е.Е. Тимонина, С.Я. Шоргин // Системы и средства информатики. – 2014. – Т. 24, № 3. – С. 18–31.

4) Ross, R.S. Guide for Conducting Risk Assessments / R.S. Ross // National Institute of Standards and Technology. Special Publication 800-30 Revision 1. – Gaithersburg, MD: NIST, 2012

5) ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. – Geneva: ISO, 2022. – 28 p.

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕЗИНФОРМАЦИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Д.С. Кухарчук, А.А. Кухарчук

Научный руководитель – **А.В. Никитенко**, канд. пед. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается проблема моделирования распространения дезинформации в социальных сетях. Обосновывается использование расширенных сетей Петри (цветных, временных, стохастических) как аппарата, позволяющего учитывать гетерогенность пользователей и контента, ограниченное внимание, асинхронность, временные задержки и вероятностный характер решений.

Ключевые слова: *дезинформация, социальные сети, расширенные сети Петри, имитационное моделирование*

MODELLING DISINFORMATION SPREAD IN SOCIAL NETWORKS USING EXTENDED PETRI NETS

D.S. Kukharchuk, A.A. Kukharchuk

Scientific Supervisor - **A.V. Nikitenko**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article addresses the problem of modelling disinformation spread in social networks. It substantiates the use of extended Petri nets (coloured, timed, stochastic) as a formalism that allows taking into account the heterogeneity of users and content, limited attention, asynchrony, time delays, and the probabilistic nature of decisions.

Keywords: *disinformation, social networks, extended Petri nets, simulation modelling*

Введение

Социальные сети стали неотъемлемой частью современного коммуникационного пространства. Согласно данным глобальной статистики, число активных пользователей социальных платформ превысило 4,9 млрд человек, что составляет более 60% населения Земли. Эти платформы трансформировали способы получения и распространения информации, став главным источником новостей для значительной части общества. Однако архитектура социальных сетей, ориентированная на максимизацию вовлечённости и виральности контента, создаёт благоприятную среду для быстрого распространения недостоверной информации – дезинформации.

Последствия дезинформации разнообразны: манипуляция общественным сознанием, вмешательство в политические процессы, экономический ущерб, угрозы здоровью граждан. В таких условиях разработка эффективных мер противодействия становится приоритетом как для владельцев платформ, так и для регуляторов. Математическое моделирование здесь играет ключевую роль: оно позволяет выявлять закономерности распространения информации, оценивать влияние различных факторов и прогнозировать результативность тех или иных стратегий до их практического внедрения.

Существующие подходы к моделированию многочисленны, но каждый имеет ограничения. Актуальна задача поиска формализма, который сочетал бы гибкость агентных моделей с аналитической строгостью.

1. Особенности социальных сетей как среды распространения контента

Социальные сети представляют собой сложные социотехнические системы, динамика распространения информации в которых определяется взаимодействием структурных, алгоритмических и поведенческих факторов.

С математической точки зрения социальную сеть можно представить в виде графа, где вершины соответствуют пользователям, а рёбра — связям между ними (дружба, подписка, взаимодействие). Реальные социальные графы обладают рядом универсальных свойств, существенно отличающих их от случайных сетей. Во-первых, это распределение степеней вершин по степенному закону: большинство узлов имеют мало связей, но присутствует небольшое количество узлов-«хабов» (лидеры мнений) с огромным числом подписчиков. Во-вторых, свойство «тесного мира» обеспечивает малую среднюю длину пути между любыми двумя узлами, что способствует быстрому распространению контента. В-третьих, высокий коэффициент кластеризации приводит к образованию плотных сообществ (комьюнити), где информация многократно циркулирует внутри группы.

Также, в отличие от традиционных коммуникаций, в социальных сетях то, что увидит пользователь, определяется алгоритмами, нацеленными на максимизацию вовлечённости. Эти алгоритмы формируют пузыри фильтров — изолируют пользователя от альтернативных точек зрения, постоянно предлагая контент, соответствующий его предпочтениям. В сочетании с замкнутыми группами единомышленников это создаёт среду, где дезинформация, подтверждающая сложившиеся убеждения, распространяется особенно активно [5].

На микроуровне распространение информации определяется решениями отдельных пользователей. Ключевыми факторами выступают: социальное доказательство, то есть ориентация на поведение большинства в группе; предвзятость подтверждения - некритичное принятие информации, согласующейся с собственными убеждениями; более высокая виральность эмоционально окрашенного контента и ограниченность внимания, то есть пользователь может обработать лишь ограниченное число сообщений за единицу времени. Эти механизмы должны находить отражение в математических моделях, если мы стремимся к адекватному описанию реальных процессов.

2. Обзор математических моделей распространения информации

Для описания динамики информационных процессов в социальных сетях предложено множество математических подходов. Их можно разделить на несколько основных классов: эпидемиологические модели, теоретико-игровые модели, агентные модели и модели на графах.

Исторически первыми к задаче распространения слухов и информации применили аппарат математической эпидемиологии. Классическая модель SIR делит популяцию на три группы: восприимчивые (не знают информацию), инфицированные (знают и распространяют) и удалённые (утратили интерес или перестали распространять). Переходы между состояниями описываются системой дифференциальных уравнений. Простота и наличие аналитических решений – важные достоинства этого подхода. Однако классическая модель SIR исходит из равновероятности контактов между людьми и не различает пользователей по их поведению. В реальных социальных сетях эти условия не выполняются, поэтому прямое применение модели даёт искажённые результаты [4].

Далее идут модели на основе теории игр. Эти модели учитывают активный, стратегический характер поведения пользователей. Каждый агент принимает решение о распространении информации, оценивая потенциальные выгоды и издержки, а также предполагаемые действия других участников. Например, в простейшей игре «делиться или проверять» равновесие Нэша часто оказывается в точке, где оба игрока предпочитают делиться непроверенной информацией, что объясняет высокую виральность фейков при отсутствии внешних стимулов. Теоретико-игровые модели позволяют анализировать влияние штрафов, поощрений и репутационных механизмов, но их калибровка и масштабирование на большие сети сопряжены с трудностями.

Другой класс моделей – агентные и модели на графах. Эти подходы ставят во главу угла структуру социальных связей и гетерогенность агентов. В агентных моделях каждый пользователь наделяется индивидуальными параметрами (порог активации, уровень доверия и т.д.) и взаимодействует с соседями по графу. Среди графовых моделей наиболее

известны модель линейного порога (пользователь активируется, если доля активных соседей превышает его порог) и модель независимых каскадов (активация происходит с вероятностью, заданной для каждого ребра). Эти модели хорошо воспроизводят эффекты эхо-камер, влияние лидеров мнений и каскадное распространение. Их главный недостаток — сложность формальной верификации: результаты, как правило, получаются усреднением по множеству стохастических прогонов, а строгий анализ достижимости, ограниченности или живости модели затруднён.

Каждый из рассмотренных классов имеет свои сильные стороны, но не лишён ограничений. Эпидемиологические модели просты, но игнорируют структуру сети. Теоретико-игровые модели учитывают мотивацию, но сложны в калибровке. Агентные и графовые модели наиболее реалистичны, но часто не поддаются строгому математическому анализу. Возникает потребность в формализме, который сочетал бы гибкость агентного подхода с возможностями верификации, свойственными аналитическим моделям.

3. Сети Петри как инструмент моделирования

Проведённый анализ существующих подходов выявил определённое противоречие. Эпидемиологические модели обладают математической строгостью и позволяют анализировать пороговые явления, но игнорируют структуру сети и гетерогенность агентов. С другой стороны, агентные и графовые модели учитывают индивидуальные характеристики и топологию, однако их сложно верифицировать формальными методами. В качестве математического аппарата, позволяющего в определённой мере разрешить это противоречие, в данной работе предлагается использовать расширенные сети Петри.

Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф, состоящий из позиций, переходов и фишек, размещённых в позициях. Динамика системы задаётся правилами срабатывания переходов: переход активен, если во всех его входных позициях имеется необходимое число фишек; срабатывание перехода изымает фишки из входных позиций и помещает их в выходные. Этот формализм естественным образом поддерживает параллелизм, асинхронность, конфликты за ресурсы, а также позволяет моделировать ограничения через ёмкость позиций. Для анализа свойств моделей (достижимость, живость, ограниченность) разработан математический аппарат, включающий построение дерева достижимости и матричные методы [1, 2].

Математическое описание классической сети Петри представляет из себя $\sum = (P, T, E, M_{0)}$, где:

- P – конечное множество позиций;
- T – конечное множество переходов (событий);
- E – конечное множество дуг, $E \subseteq (P * T) \cup (T * P)$;
- M_0 – начальная разметка, $M_0: P \to N, N = \{0,1,2, \dots\}$ – множество натуральных чисел.

Однако классических сетей Петри недостаточно для адекватного моделирования распространения дезинформации, поскольку они не различают типы фишек и не учитывают время. Поэтому в работе используются три основных расширения.

Цветные сети Петри (Coloured Petri Nets, CPN) вводят понятие «цвета» — типа данных, приписываемого фишкам. Это позволяет кодировать в фишках атрибуты агентов (уровень критичности, доверие к источникам, принадлежность к комьюнити) и сообщений (тип контента, эмоциональный заряд, степень достоверности). Условные переходы (guard-функции) дают возможность реализовать пороговые механизмы (социальное доказательство) и предвзятость подтверждения. Иерархические цветные сети позволяют строить модели «снизу вверх», сначала детально описывая поведение одного агента, а затем интегрируя его в сеть [3].

Математическое описание цветных сетей Петри представляет из себя кортеж $CPN = (\sum, P, T, A, N, C, G, E, I)$, где:

- Σ – конечное множество типов (цветов). Это множество содержит все возможные цвета, операции и функции, используемые в цветной сети Петри;
- P – конечное множество позиций;

- T – конечное множество переходов;
- A – конечное множество дуг ($A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$);
- N – функция узла (сопоставляет дуге пару (позиция, переход) или (переход, позиция));
- C – цветовая функция: $C(p)$ задаёт тип фишек в позиции p;
- G – сторожевые условия, приписанные переходам. Они сопоставляют каждый переход $t \in T$ с защитным выражением g. Результатом выполнения защитного выражения должно быть логическое значение (true или false). Если значение false, переход t не может быть выполнен.;
- E – выражения на дугах, определяющие, какие фишки перемещаются. Они сопоставляют каждую дугу $a \in A$ с выражением e. Типы входных и выходных данных дуговых выражений должны соответствовать типу узлов, к которым подключена дуга.;
- I – инициализирующая функция, задающая начальные фишки в позициях. Она сопоставляет каждое место p с выражением инициализации i. Выражение инициализации должно возвращать мультимножество токенов с цветом, соответствующим цвету места $C(p)$.

Временные сети Петри (Timed Petri Nets, TPN) вводят временные задержки, связанные с переходами или фишками. Это даёт возможность моделировать время реакции пользователя, продолжительность «жизни» поста в ленте новостей, задержки между публикацией фейка и появлением опровержения. Временные параметры критически важны для анализа скорости распространения информации и оценки эффективности мер противодействия.

Временная сеть Петри задаётся как классическая сеть (P, T, E, M_0) с добавлением функции задержки $D: T \to Q^+$, где Q^+— множество неотрицательных рациональных чисел. Каждому переходу t приписывается временной интервал $[a_t, b_t]$ (или фиксированная задержка d_t). Переход t, став активным в момент времени τ, может сработать только в момент $\tau' \geq \tau + at$ и обязан сработать не позднее $\tau + bt$ (если не потеряет активность). В частном случае $at = bt$ получаем детерминированную задержку.

Стохастические сети Петри (Stochastic Petri Nets, SPN) добавляют вероятностные механизмы. Переходам приписываются интенсивности или вероятности срабатывания, что позволяет отражать случайную природу индивидуальных решений: пользователь может сделать репост с некоторой вероятностью, зависящей от его характеристик и свойств сообщения.

Стохастическая сеть Петри — это временная сеть, в которой задержки переходов являются случайными величинами, распределёнными по экспоненциальному закону. Каждому переходу t приписывается интенсивность $\lambda_t > 0$. Время срабатывания перехода t имеет функцию распределения $Ft(x) = 1 - e^{-\lambda_t x}$. Если одновременно активны несколько переходов, первым срабатывает тот, у которого «закончился таймер» (реализуется механизм состязания). Вероятность того, что в состоянии с активными переходами $t_1, \ldots, t_k$ следующим сработает переход t_i, равна $\lambda_{t_i} / \sum_{j=1}^{k} \lambda_{t_i}$.

Комбинация этих расширений – цветные временные стохастические сети Петри — образует формализм, который сочетает гибкость агентного подхода с возможностью формальной верификации.

Проведённое в работе сравнение подходов по ряду критериев (учёт структуры сети, гетерогенности агентов и контента, ограниченных ресурсов, возможность верификации, поддержка параллелизма и временных характеристик) показало, что расширенные сети Петри имеют преимущества. Они позволяют:

- явно задавать топологию социального графа через структуру сети Петри;
- учитывать гетерогенность агентов и сообщений с помощью цветных фишек;
- моделировать ограниченное внимание пользователей через ёмкость позиций;
- отражать асинхронный и параллельный характер взаимодействий;
- вводить временные задержки и стохастические закономерности;

- проводить формальный анализ достижимости, ограниченности и живости модели, что невозможно в чисто агентных подходах.

Аппарат расширенных сетей Петри является адекватным инструментом для построения модели распространения дезинформации в социальных сетях, позволяющим в дальнейшем исследовать эффективность различных стратегий противодействия.

4. Моделирование ключевых особенностей распространения дезинформации с помощью сетей Петри

Распространение дезинформации в социальных сетях характеризуется рядом особенностей: гетерогенностью пользователей и контента, социальным доказательством, ограниченным вниманием аудитории, асинхронностью событий, временными задержками и стохастичностью индивидуальных решений. Для того чтобы математическая модель была адекватна реальности, она должна учитывать все перечисленные факторы. Ниже показано, каким образом аппарат расширенных сетей Петри (цветных, временных, стохастических и иерархических) позволяет это сделать.

5. Гетерогенность агентов и контента

Реальные пользователи социальных сетей различаются по множеству характеристик: уровню критичности (склонности доверять непроверенной информации), доверию к различным типам источников (друзья, лидеры мнений, официальные СМИ, боты), принадлежности к тематическим сообществам, а также по активности и частоте взаимодействия с контентом. Информационные сообщения также неоднородны: они различаются по степени достоверности (от заведомо ложных до полностью верифицированных), эмоциональной окраске, тематической принадлежности и типу источника. Классические сети Петри, где все фишки неразличимы, не отражают эту гетерогенность. Цветные сети Петри снимают данное ограничение: каждой фишке приписывается сложный тип данных («цвет»).

Условные переходы могут анализировать значения атрибутов, реализуя, например, зависимость вероятности репоста от эмоционального заряда сообщения или проверку соответствия тематики убеждениям агента (предвзятость подтверждения).

6. Социальное доказательство и пороговые механизмы

Эффект социального доказательства, описанный в социальной психологии, заключается в том, что человек в ситуации неопределённости склонен ориентироваться на поведение большинства окружающих. В контексте распространения дезинформации это означает, что пользователь с большей вероятностью поверит в некоторое утверждение и начнёт его распространять, если видит, что многие его друзья или подписчики уже сделали это. Формально агент переходит в состояние «убеждён», то есть начинает распространять информацию, если доля его соседей, уже находящихся в этом состоянии, превышает индивидуальный порог активации.

В сетях Петри переход, отвечающий за принятие решения пользователем о достоверности сообщения, снабжается сторожевым условием, которое вычисляет долю активных соседей. Это реализуется через запрос к позиции, хранящей убеждённых агентов, с фильтрацией по идентификатору соседа или через вспомогательную позицию с агрегированной статистикой по окружению. Сам порог хранится как атрибут фишки-пользователя.

7. Ограниченное внимание и конкуренция за ресурс

В реальных социальных сетях пользователь физически не способен обработать бесконечное количество сообщений за единицу времени. Его лента новостей имеет конечную ёмкость, а время на чтение и осмысление также ограничено. Таким образом, внимание пользователя является дефицитным ресурсом, и сообщения конкурируют за него.

В сетях Петри ресурсные ограничения моделируются через ёмкость позиций. Позиция, соответствующая ленте новостей, объявляется с максимальным числом фишек, равным суммарному объёму буферов внимания пользователей. Когда буфер заполнен, новые сообщения не поступают, пока пользователь не «прочитает» (не извлечёт) часть сообщений.

Конкуренция сообщений за внимание автоматически вытекает из правил срабатывания переходов: несколько переходов, претендующих на одну фишку-ресурс, вступают в конфликт, разрешаемый недетерминированно или стохастически.

8. Асинхронность и параллелизм событий

В социальной сети пользователи действуют независимо друг от друга и в случайные, не синхронизированные моменты времени. Процессы публикации новых постов, чтения ленты, принятия решений о репосте, комментирования и перехода по ссылкам идут параллельно и асинхронно. Классические модели с глобальным дискретным временем являются лишь приближением и не способны отразить истинную конкурентность событий.

В сетях Петри асинхронность заложена в семантике: переходы срабатывают, как только становятся активны, без единого тактового генератора. Параллелизм моделируется тем, что несколько переходов могут быть активны одновременно и срабатывать в любом порядке. Это в точности соответствует реальной динамике.

9. Время реакции, задержки и длительность процессов

Скорость распространения информации является критической характеристикой информационных процессов. Время реакции пользователя от момента получения сообщения до момента принятия решения и репоста, продолжительность жизни поста в ленте новостей, задержка между публикацией фейка и появлением опровержения - все эти временные параметры существенно влияют на динамику и итоговый охват аудитории.

Временные сети Петри вводят задержки, связанные с переходами или фишками. Например:

- переход, моделирующий чтение сообщения пользователем, может иметь экспоненциальную задержку, отражающую случайное время, затрачиваемое на ознакомление;
- переход, отвечающий за репост, — задержку, моделирующую паузу перед распространением;
- фишкам сообщений можно приписать временную метку «время удаления», реализуя ограниченный срок жизни поста в ленте.

10. Стохастический характер решений

Решение пользователя сделать репост, проигнорировать сообщение, поверить в фейк или, напротив, выступить с опровержением носит вероятностный характер. Оно зависит от множества факторов: настроения в данный момент, усталости, случайных внешних обстоятельств. Предсказать детерминированно, совершит ли конкретный пользователь действие, невозможно, можно лишь оценить вероятность.

Стохастические сети Петри приписывают переходам интенсивности или вероятности срабатывания. Например, переход, отвечающий за оценку достоверности сообщения, может сработать с вероятностью, зависящей от эмоционального заряда, порога критичности пользователя и доверия к источнику. Конфликты между переходами (например, выбор между репостом и игнорированием) разрешаются на основе весов или интенсивностей.

11. Иерархичность и масштабируемость модели

Социальная сеть состоит из множества взаимодействующих пользователей, каждый из которых обладает собственным поведением и состоянием. Прямое «разворачивание» модели для тысяч и миллионов агентов привело бы к взрывному росту числа позиций, переходов и дуг, что сделало бы модель необозримой и трудно верифицируемой. Поэтому удобно строить модель «снизу вверх»: сначала детально описать поведение одного пользователя в виде подсети, а затем многократно использовать эту подсеть, соединяя экземпляры через общие позиции.

Иерархические цветные сети Петри позволяют создать подсеть для одного агента, а затем многократно её использовать, соединяя экземпляры через общие позиции для моделирования рёбер графа. Это делает модель компактной, обозримой и допускающей поэтапную верификацию.

Заключение

В настоящей работе проведён анализ подходов к моделированию распространения дезинформации в социальных сетях. Показано, что современные социальные сети как среда распространения контента характеризуются сложной топологией, активным влиянием алгоритмов ранжирования, формирующих пузыри фильтров, а также совокупностью социально-психологических механизмов. Эти особенности требуют адекватного отражения в математических моделях.

Обзор существующих классов моделей выявил их достоинства и ограничения. В качестве математического аппарата, позволяющего преодолеть рассмотренные ограничения, предложены расширенные сети Петри (цветные, временные, стохастические). Данный формализм сочетает гибкость агентного подхода (учёт гетерогенности, параллелизма, асинхронности, ресурсных ограничений) с возможностью строгого математического анализа свойств модели (достижимость, ограниченность, живость). Цветные сети Петри обеспечивают различение типов агентов и сообщений, временные — учёт динамики процессов, стохастические — вероятностный характер индивидуальных решений.

Результаты работы создают теоретическую основу для дальнейших этапов исследования. Перспективным направлением является разработка имитационной модели распространения дезинформации в среде CPN Tools с последующей верификацией и проведением вычислительных экспериментов. Такая модель позволит оценивать эффективность различных стратегий противодействия (проактивных — повышение медиаграмотности, реактивных — проверки фактов, блокировка аккаунтов, алгоритмическое понижение видимости) в зависимости от характеристик социальной сети и типа информационной угрозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Murata, T. Petri nets: Properties, analysis and applications / T. Murata // Proceedings of the IEEE. – 1989. – Vol. 77, no. 4. – P. 541–574.

2) Котов, В.Е. Сети Петри / В.Е. Котов. – Москва: Наука, 1984. – 160 с.

3) Jensen, K. Coloured Petri nets : modelling and validation of concurrent systems / K. Jensen, L.M. Kristensen. – Berlin: Springer, 2009. – 384 p.

4) Kermack, W.O. A contribution to the mathematical theory of epidemics / W.O. Kermack, A.G. McKendrick // Proceedings of the Royal Society A. – 1927. – Vol. 115, no. 772. – P. 700–721.

5) Новиков, Д.А. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства / Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили. – Москва: МЦНМО, 2018. – 248 с.

УДК 004.94

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА И БАРЬЕРОВ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.Н. Мельникова, С.Е. Раченко

Научный руководитель – **А.Ю. Тарасова**, доцент

Ярославский филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федерации

Промышленный комплекс Ярославской области рассматривается как полигон для внедрения цифровых двойников. На основе оценки цифровой зрелости проведена кластеризация предприятий. Выявлено расслоение на лидеров и компании с низким уровнем автоматизации. Определены системные барьеры: кадровый дефицит, высокая стоимость и зависимость от импортного ПО. Обоснована необходимость адресных мер поддержки для обеспечения технологического суверенитета.

Ключевые слова: *цифровые двойники, Ярославская область, цифровая трансформация, Индустрия 4.0, импортозамещение, кадровый дефицит*

ANALYSIS OF THE POTENTIAL AND BARRIERS TO DIGITAL TWIN IMPLEMENTATION AT ENTERPRISES IN THE YAROSLAVL REGION

E.N. Melnikova, S.E. Rachenko

Scientific Supervisor –**A.Y. Tarasova**, Associate Professorof

Yaroslavl Branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation

The industrial complex of the Yaroslavl Region is considered as a testing ground for digital twin implementation. Based on digital maturity assessment, enterprise clustering has been conducted. A stratification into leaders and companies with low automation levels has been identified. Systemic barriers have been determined: talent shortage, high implementation costs, and reliance on foreign software. The necessity of targeted support measures to ensure technological sovereignty has been substantiated.

Keywords: digital twins, Yaroslavl Region, digital transformation, Industry 4.0, import substitution, talent shortage

Ярославская область обладает одним из наиболее диверсифицированных промышленных комплексов в Центральном федеральном округе, что создает предпосылки для формирования региональной экосистемы цифровых двойников (ЦД). Многоотраслевая структура, сочетающая дискретное машиностроение и непрерывные химико-технологические процессы, позволяет отрабатывать универсальные и отраслевые модели цифровизации в реальных производственных условиях. В контексте обеспечения технологического суверенитета регион рассматривается не только как производственная база, но и как экспериментальный полигон для внедрения сквозных цифровых технологий.

Подтверждением устойчивости промышленного потенциала региона служат оперативные данные Ярославльстата и показатели стратегии социально-экономического развития до 2030 года. По итогам 10 месяцев 2025 года объем отгруженной продукции собственными силами промышленных предприятий превысил 592,9 млрд руб., что на 2,3% выше показателей аналогичного периода предыдущего года. Вклад промышленности в валовой региональный продукт (ВРП) составляет более 30%, а в налоговые поступления — около 40%, что подтверждает системообразующую роль сектора.

Для системной оценки возможностей внедрения технологий цифровых двойников в табл. 1 представлены ключевые количественные и качественные показатели, характеризующие потенциал промышленного комплекса Ярославской области.

Таблица 1. Показатели развития промышленного комплекса Ярославской области (2024–2025 гг.)

Показатель	Значение	Динамика/Детализация	Драйверы роста и цифровизации
Объем отгруженной продукции	592,9 млрд руб.	+2,3% (за 10 мес. 2025 г.)	Машиностроение, химическая промышленность
Количество предприятий	3200 ед.	273 крупных и средних	Концентрация производства в кластерах
Инвестиции в основной капитал	177 млрд руб.	+20,3% (2024 г.)	86 инвестиционных проектов на 425 млрд руб.
Производительность труда	+34%	На 85 предприятиях	Проект «Производительность труда», нацпроекты
Инновационная активность	Высокая	Рост доли инноваций	Аддитивные технологии, робототехника, ЦД

Представленные данные свидетельствуют о наличии благоприятных предпосылок для цифровизации, однако практическая реализация проектов требует детального анализа специфики отдельных предприятий. Промышленный ландшафт Ярославской области характеризуется высокой концентрацией предприятий с развитой производственной инфраструктурой, что создаёт благоприятные условия для пилотного внедрения цифровых двойников. Ключевые характеристики ведущих промышленных площадок региона и их готовность к внедрению технологий ЦД систематизированы в табл. 2.

Таблица 2. Ведущие промышленные предприятия Ярославской области и их потенциал для внедрения цифровых двойников

Предприятие	Отрасль	Текущий уровень цифровизации	Потенциал для Digital Twin
ПАО «ОДК-Сатурн» (Рыбинск)	Авиа- и двигателестроение	Внедрение платформы «Умный цех» на базе ZIIoT, подключение ~500 станков к IIoT, система мониторинга «Диспетчер»	Высокий: цифровые двойники двигателей для предиктивного обслуживания, виртуальные испытания, оптимизация ресурса
ООО «Ярославский шинный завод» (входит в холдинг «Кордиант»)	Химическая промышленность, производство резиновых изделий	Модернизация производственных линий, внедрение бережливых технологий (5S), использование ИИ для оцифровки архивов	Средний-высокий: двойники технологических процессов вулканизации, прогноз качества продукции, оптимизация рецептур
Филиал АО «Р-Фарм» – Ярославский завод готовых лекарственных форм	Фармацевтическая промышленность	Использование «одноразовых технологий» в биопроизводстве, интегрируемые платформы для терапевтических белков	Высокий: цифровые двойники биореакторов, моделирование процессов ферментации, контроль качества в реальном времени
ПАО «Ярославнефтеоргсинтез» (ЯНОС)	Нефтепереработка	Автоматизация технологических процессов, элементы АСУ ТП	Средний: двойники установок крекинга и риформинга, оптимизация энергобаланса
АО «Ярославский завод дизельной аппаратуры» (ЯЗДА)	Машиностроение	Роботизация отдельных участков, CAD/CAM-системы	Средний: виртуальные прототипы изделий, цифровые двойники сборочных линий
ООО «Химический завод «Луч»	Химическая промышленность	Базовая автоматизация	Начальный: моделирование химических реакций, оптимизация рецептур

Детальный анализ позволяет выделить наиболее продвинутые в цифровизации предприятия региона. ПАО «ОДК-Сатурн» демонстрирует высшую зрелость: в рамках пилота «Умный цех» организовано 60 автоматизированных рабочих мест и подключено к мониторингу 10 единиц оборудования. Интеграция платформы ZIIoT и системы «Диспетчер» формирует единое информационное пространство, закладывая технологическую основу для полноценного цифрового двойника участка.

Аналогичные инициативы развивает Ярославский шинный завод (холдинг «Кордиант»). Модернизация линий, внедрение бережливого производства и ИИ-оцифровка архивов в сочетании с формализованными процессами вулканизации создают базу для цифровых двойников, способных оптимизировать рецептуры и прогнозировать дефекты.

Высокий потенциал имеет филиал АО «Р-Фарм». Применение «одноразовых технологий» и интегрируемых платформ в биопроизводстве открывает перспективы для внедрения цифровых двойников биореакторов, где виртуальное моделирование ферментации и очистки позволит существенно сократить сроки вывода новых препаратов на рынок.

Для оценки стратегических перспектив применен SWOT-анализ (табл. 3), подтверждающий наличие структурных, институциональных и технологических предпосылок, а также выявляющий риски цифрового разрыва и кадрового оттока.

Таблица 3. SWOT-анализ потенциала внедрения цифровых двойников

Сильные стороны	**Слабые стороны**
Концентрация крупных предприятий с развитой ИТ-инфраструктурой (ОДК-Сатурн, ЯНОС, Р-Фарм)	Низкая доля инновационно-активных предприятий (<9,9%)
Пилотные проекты с измеримыми эффектами («Умный цех»)	Дефицит кадров в data science и промышленной аналитике
Грантовая поддержка на региональном и федеральном уровнях	Фрагментация ИТ-ландшафта, legacy-системы
Близость к Москве, развитая логистика	Ограниченный доступ к зарубежному ПО и оборудованию
Возможности	Угрозы
Масштабирование кейсов на смежные предприятия	Риск «цифрового разрыва» между крупным и средним бизнесом
Формирование кластера разработчиков промышленных решений	Замедление внедрения из-за бюрократических барьеров
Интеграция с ЯрГУ и ЯГТУ для подготовки кадров	Киберугрозы и утечка данных в облачных платформах

Для объективной оценки готовности к Индустрии 4.0 проведен контент-анализ открытых данных (2021–2025 гг.) по пяти критериям: технологическая инфраструктура (АСУ ТП, IoT), управление данными, инновационная активность, кадровый потенциал, стратегическая ориентация. Результаты публичной рефлексии цифровых инициатив и патентной активности систематизированы в табл. 4.

Анализ показывает очаговую концентрацию разработок вокруг ОДК-Сатурн и ЯГТУ, тогда как средний бизнес демонстрирует низкую патентную активность (<10 заявок совокупно). Информационная повестка опережает практику: рост упоминаний «цифровой трансформации» и «ИИ» не всегда коррелирует с фактическим внедрением, создавая риск «цифрового имиджевого разрыва» (табл. 5).

На основе синтезированных данных предложена авторская кластеризация предприятий (табл. 6), позволяющая дифференцировать меры поддержки в зависимости от уровня цифровой зрелости.

Таблица 4. Анализ публичной информации и патентной активности (2019–2025 гг.)

Предприятие / Заявитель	Раздел «Инновации»/ Стратегия	Упоминание Industry 4.0	Конкретные проекты / Патенты и заявки	Статус технологии
ПАО «ОДК-Сатурн»	Да	Да	«Умный цех» (ZIIoT), «Диспетчер», 500+ станков	3 пат., 2 заяв. (оптимизация ГТД, мониторинг)
Шинный завод («Кордиант»)	Частично	Косвенно	ИИ-оцифровка архивов, модернизация вулканизации	–
Филиал АО «Р-Фарм»	Да	Да	Платформы для биотехнологий, цифровой контроль качества	1 заяв. (контроль качества биопроцессов)
ПАО «ЯНОС»	Да	Да	Двойники месторождений, предиктивная аналитика (уровень Группы)	–
АО «ЯЗДА»	Ограничено	Нет	Автоматизация участков, CAD/CAM	–
Химзавод «Луч»	Нет	Нет	Базовая автоматизация	–
ЯГТУ	–	–	НИР в области имитационного моделирования	5 пат., 4 заяв. (алгоритмы обработки данных)
НТЦ «Промышленные системы»	–	–	Сбор и визуализация данных с оборудования	2 пат.

Таблица 5. Динамика упоминаний ключевых терминов в региональных СМИ

Термин	2023 г.	2024 г.	2025 г. (янв.–февр.)
«Цифровая трансформация»	47	68	12
«Индустрия 4.0»	8	15	3
«Цифровой двойник»	3	9	2
«Искусственный интеллект в промышленности»	12	31	7

Таблица 6. Кластеризация предприятий по готовности к Индустрии 4.0

Кластер	Характеристика	Представители	Рекомендуемые меры поддержки
А: «Лидеры ЦТ»	Утвержденная стратегия, пилоты IIoT, патенты, партнерство с вузами	ОДК-Сатурн, Р-Фарм	Масштабирование пилотов, гранты РФРИТ, экспорт решений
Б: «Активные последователи»	Отдельные проекты автоматизации, интерес без системной стратегии	Шинный завод, ЯНОС	Дорожные карты цифровизации, гранты на пилоты, обучение
В: «Начинающие»	Базовая автоматизация, фрагментарные данные, низкая инновационность	ЯЗДА, Химзавод «Луч», МСБ	Консалтинг зрелости, субсидии на IoT, центры компетенций
Г: «Традиционные»	Фокус на операционной эффективности, отсутствие цифровых инициатив	Малые предприятия обрабатывающей промышленности	Информационная работа, демо-площадки, льготное кредитование

Масштабирование практик ЦД сдерживается совокупностью технологических, кадровых и финансовых ограничений. Историческая зависимость от зарубежного ПО (CAD/CAE/PLM) создает критические уязвимости: конвертация накопленных библиотек материалов на отечественные платформы («АСКОН», «Топ Системы», «Логос») сопряжена с риском потери точности, а отечественные CAE-системы в ряде случаев уступают западным аналогам в моделировании сложных динамических процессов. Дополнительно сохраняется зависимость от импортных ядер геометрического моделирования.

Финансовые барьеры обусловлены высокими CAPEX (датчики, IoT-шлюзы, серверная инфраструктура, лицензии) и неопределенностью ROI. Эффект от ЦД носит комплексный характер (снижение брака, оптимизация ТОиР, ускорение вывода на рынок), что затрудняет традиционное финансовое планирование. Дополнительно формируются OPEX-затраты на хранение и обработку «цифрового следа» в реальном времени.

Кадровый дефицит является приоритетным ограничением (табл. 7). Линейный персонал часто воспринимает ЦД лишь как 3D-визуализацию, не используя предиктивный потенциал. Конкуренция с московским рынком труда, где зарплаты в IT-секторе выше в 1,5–2 раза, формирует отток архитекторов решений. Программы региональных вузов трансформируются, но темпы обновления инфраструктуры под отечественные PLM-системы отстают от запросов холдингов. Для МСП создание собственных центров компетенций экономически недоступно.

Таблица 7. Матрица системных барьеров и векторов их преодоления

Тип барьера	Конкретные проявления	Уровень влияния (1–5)	Целевой ориентир методики / Меры
Технологический	Фрагментация ИТ, legacy-системы, сложности миграции на отечественное ПО без потери точности	4	Алгоритмы кроссплатформенной интеграции данных, типовые коннекторы
Кадровый	Дефицит data science, аналитики, кибербезопасности; отток в столицы; разрыв компетенций	5	Партнерство с вузами (ЯрГУ, ЯГТУ), целевые программы, центры компетенций
Финансовый	Высокий CAPEX, неопределенность ROI, затраты на хранение данных (OPEX)	4	Моделирование эффективности на ранних стадиях, льготное кредитование
Организационный	Сопротивление изменениям, отсутствие выделенных подразделений ЦТ	3	Change-менеджмент, KPI для среднего менеджмента, демонстрационные площадки
Нормативный	Неопределенность защиты данных промобъектов, сертификация отечественных решений	3	Регламенты ИБ для АСУ ТП, упрощенные процедуры апробации
Информационный	Низкая осведомленность руководства МСБ о возможностях ЦД	4	Региональные кейс-клубы, отраслевые вебинары, пилотные полигоны

Оценка потребности в специалистах подтверждает критический дефицит архитекторов и специалистов по кибербезопасности (табл. 8).

Проведённый анализ подтверждает значительный потенциал Ярославской области как полигона для внедрения цифровых двойников, обусловленный синергией структурных (доля обрабатывающих производств составляет 43,7%), институциональных (развитая система стратегий и грантовых программ) и технологических (успешные пилоты на базе IIoT) факторов. Вместе с тем региональная экосистема характеризуется выраженной поляризацией: деятельность технологических лидеров, таких как ОДК-Сатурн и Р-Фарм,

контрастирует с массовым сегментом малого и среднего бизнеса, находящимся на начальных стадиях цифровизации.

Таблица 8. Оценка потребности в кадрах для внедрения ЦД

Категория специалистов	Требуемые компетенции	Доступность на рынке	Уровень конкуренции
Архитекторы цифровых двойников	Системное моделирование, интеграция IoT, знание предметной области	Низкая	Высокая (Москва, СПб)
Data Scientists (промышленные)	Анализ временных рядов, предиктивная аналитика, Python/C++	Средняя	Высокая
Инженеры-технологи (цифровые)	CAD/CAE системы, интерпретация данных ЦД	Средняя	Средняя
Специалисты по кибербезопасности	Защита АСУ ТП, промышленная ИБ	Низкая	Очень высокая

Подобная дифференциация зрелости предприятий диктует необходимость адресной политики, варьирующейся от масштабирования пилотных проектов и привлечения федеральных грантов для наиболее подготовленных компаний до создания региональных центров компетенций и механизмов льготного кредитования для отстающих кластеров. Существующий научно-технологический задел, подтверждённый высокой патентной активностью ОДК-Сатурн и ЯГТУ, пока слабо трансформируется в коммерческие продукты, что сдерживает тиражирование готовых решений среди среднего бизнеса. Ситуацию усугубляет формирующийся «цифровой имиджевый разрыв», при котором рост медиаактивности вокруг тем цифровой трансформации и искусственного интеллекта (увеличение упоминаний с 47 до 68 в 2023–2024 гг.) зачастую опережает реальную практику внедрения.

Для преодоления системных барьеров, включающих кадровый дефицит, сложности импортозамещения программного обеспечения, а также высокую стоимость и длительные сроки окупаемости проектов, региональная политика должна сфокусироваться на развитии образовательных партнёрств с вузами, создании демонстрационных площадок на базе предприятий-лидеров, разработке алгоритмов кроссплатформенной миграции данных и упрощении доступа МСБ к целевым финансовым инструментам.

В этой связи предложенная кластеризация и матрица барьеров выступают надёжной методической основой для проектирования программ поддержки, гарантируя высокую адресность принимаемых мер, рациональное использование бюджетных средств и последовательное продвижение к стратегическим ориентирам технологического суверенитета региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Государственная программа Ярославской области «Развитие промышленности в Ярославской области и повышение её конкурентоспособности» // Правительство Ярославской области: [сайт]. – URL: https://portal.yarregion.ru/depts-der/doc/gosudarstvennaya-programma-yao-razvitie-promyshlennosti-v-yaroslavskoy-oblasti-i-povyshenie-ee-konku/otchety-za-2024-god/ (дата обращения: 21.02.2026).

2) Промышленное производство Ярославской области: статистический сборник // Федеральная служба государственной статистики, Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Ярославской области (Ярославльстат): [сайт]. – URL: https://76.rosstat.gov.ru (дата обращения: 01.02.2026).

3) Рейтинг регионов по научно-технологическому развитию – итоги 2022 г. // РИА Рейтинг: [сайт]. – URL: https://riarating.ru/infografika/20231023/630251402.html (дата обращения: 01.03.2026).

4) Социально-экономическое положение Ярославской области за 2024 год // Торгово-промышленная палата Ярославской области: [сайт]. – URL: https://yartpp.ru/news/detail/sotsialno-ekonomicheskoe-polozhenie-yaroslavskoy-oblasti-2024/ (дата обращения: 21.02.2026).

5) Стратегия в области цифровой трансформации отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления Ярославской области // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации: [сайт]. – URL: https://digital.gov.ru/uploaded/files/yaroslavskaya-oblast_CV2CGan.pdf (дата обращения: 01.03.2026).

6) Умное месторождение: как цифровые двойники повышают эффективность добычи нефти и газа // Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации: [сайт]. – URL: https://www.fa.ru/university/structure/university/uso/press-service/press-releases/umnoe-mestorozhdenie-kak-tsifrovye-dvoyniki-povyshayut-effektivnost-dobychi-nefti-i-gaza (дата обращения: 21.02.2026).

УДК 004.855.5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ МЕЛ-СПЕКТРОГРАММ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ЖАНРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Н.А. Милославов

Научный руководитель – **Ю.М. Горовой**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В работе рассматривается влияние формата представления мел-спектрограмм в качестве входных данных на точность классификации жанров музыки. Проведён эксперимент с использованием одной и той же архитектуры свёрточной нейронной сети (CNN) на наборе данных GTZAN в двух вариантах: мел-спектрограммы в виде изображений (PNG), либо в виде массива чисел (NPY). Результаты показали рост точности классификации при использовании массивов – 84,49%, у изображений – 82,22%

Ключевые слова: *музыкальный жанр, классификация, мел-спектрограмма, свёрточные нейронные сети, предобработка данных*

COMPARATIVE ANALYSIS OF MEL-SPECTROGRAM REPRESENTATIONS IN MUSIC GENRE CLASSIFICATION TASKS USING A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

N.A. Miloslavov

Scientific Supervisor – **Yu.M. Gorovoy**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This work examines the impact of mel-spectrogram representation format as input data on the accuracy of music genre classification. An experiment was conducted using the same convolutional neural network (CNN) architecture on the GTZAN dataset in two variants: mel-spectrograms represented as images (PNG) and as numerical arrays (NPY). The results showed higher classification accuracy when using arrays – 84.49%, compared to 82.22% for images.

Keywords: *music genre, classification, mel-spectrogram, convolutional neural networks, data preprocessing*

Автоматическое определение жанра музыки является важной задачей в сфере обработки аудиоданных и используется для систем рекомендаций, каталогизации и музыкального анализа. Сложность точной классификации музыкальных жанров на основе аудиосигналов заключается в богатстве и разнообразии музыкальных стилей, пересечении признаков между жанрами и наличием шумов в аудиосигнале. Поэтому важным этапом в построении эффективной модели классификации является предобработка аудиоданных. Наиболее популярным и информативным представлением звука является спектрограмма – визуализация уровня или громкости сигнала во времени на различных частотах. У спектрограммы есть специальная разновидность – мел-спектрограмма. Это частотно-временное представление сигнала, отражающие энергию на частотной оси, только частота выражена не в герцах, а в мелах. Мел представляет собой единицу измерения высоты звука, зависящую от частоты и основанную на том, как человек воспринимает звук [1].

Современные методы машинного обучения, в частности свёрточные нейронные сети, позволяют эффективно работать с мел-спектрограммами, извлекая сложные признаки, необходимые для точной классификации.

В данной работе оценивается влияние формата мел-спектрограммы на точность классификации жанров музыки при прочих равных условиях эксперимента, таких как:

архитектура свёрточной нейронной сети, количество эпох и число обучающих примеров (batchsize).

Для обучения нейронной сети был выбран датасет с жанрами музыки GTZAN. Набор данных содержит 1000 звуковых дорожек продолжительностью 30 секунд. Он разделен на 10 жанров: блюз, классика, кантри, диско, хип-хоп, джаз, метал, поп, регги, рок [2]. Для увеличения объема данных было решено разделить каждый аудиофайл длительностью 30 секунд на более мелкие части, по 3 секунды каждая.

Для каждого аудиофрагмента формировалась мел-спектрограмма с помощью библиотеки Librosa [3] и сохранялась в двух вариациях, числовых массивах и изображениях.

При преобразовании аудиосигнала в мел-спектрограмму были указаны следующие параметры: размер окна Фурье n_fft=2048, количество мел-фильтров n_mels=128, длина шага hop_length=512.

Модель свёрточной нейронной сети состоит из четырёх свёрточных блоков с числом фильтров 32, 64, 128, и 256 соответственно. Каждый блок содержит слой свёртки (Conv2D), за которым следует слой пулинга (MaxPooling2D). Далее идёт слой Flatten, преобразующий карты признаков в одномерный вектор, затем полносвязный слой на 256 нейронов и слой Dropout с коэффициентом 0,5.Последний, выходной слой Dense с числом нейронов, равным числу классов (жанров). Модель компилируется с использованием оптимизатора Adam и функции потерь sparse_categorical_crossentropy, в качестве оценки классификации выступает метрика точности (accuracy) и матрица ошибок.

Датасет был разделён на обучающую и валидационную выборки в соотношении 80/20. В эксперименте с изображениями спектрограммы приводились к диапазону [0,1] делением на 255. Для числовых массивов выполнялась min-max нормализация. Обучение проводилось в течение 20 эпох и с batchsize= 64.Результаты эксперимента представлены в табл. 1 и на рис. 1-2.

Таблица 1. Результаты точности классификации в зависимости от представления мел-спектрограмм

Формат	Точность на обучающей выборке	Точность на валидационной выборке
Изображение	85,97%	82,22%
Массив чисел	93,08%	84,49%

```
Матрица ошибок
[[181   0   1   3   2   5   0   0   6   0]
 [  1 186   0   1   0   7   0   1   0   2]
 [ 20   4 130   6   0   4   0   4   3  27]
 [  2   0   2 170   9   1   0   5   4   5]
 [  1   1   3   9 166   1   4   2  10   1]
 [  2  11   1   0   0 179   0   4   0   1]
 [  7   0   0   2   3   1 181   0   0   4]
 [  0   2   5  15   9   0   0 151   5  11]
 [  2   0   1  17   4   3   0   4 157  10]
 [ 20   2  15  18   2   4   4   3   3 127]]
```

Рис. 1. Матрица ошибок (обучение на изображениях)

Рис. 2. Матрица ошибок (обучение на массивах)

Из результатов видно, что использование числовых массивов позволило достичь точности 84.49% на валидационной выборке, что выше, чем точность модели, обученной на изображениях. Так же для более детального анализа рассмотрены матрицы ошибок. В обоих случаях наблюдается выраженная диагональ, что свидетельствует о правильной классификации большей части примеров. При переходе от изображений к массивам число удачных распознаваний увеличилось для семи жанров, наиболее существенный прирост у жанров «поп» и «рок».Для трёх жанров зафиксировано снижение точности, особенно у «диско».

В ходе работы был проведён сравнительный анализ двух подходов к представлению мел-спектрограмм для свёрточной нейронной сети в задаче классификации жанров музыки. Экспериментально установлено, что использование мел-спектрограмм в виде изображений приводит к небольшому снижению точности классификации. Вероятно, это связано с потерями информации при сохранении спектрограммы в графическом формате.

Таким образом, в рамках исследования показано, что представление мел-спектрограмм в виде числовых массивов является более предпочтительным для задач классификации музыкальных жанров с использованием свёрточных нейронных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Введение в аудиоданные // Hugging Face: [site]. – URL: https://huggingface.co/learn/audio-course/ru/chapter1/audio_data (дата обращения: 05.03.2026)

2) GTZAN Dataset - Music Genre Classification // Kaggle: [site]. – URL: https://www.kaggle.com/datasets/andradaolteanu/gtzan-dataset-music-genre-classification (дата обращения: 07.03.2026)

3) Librosa // Librosa: [site]. – URL: https://librosa.org/doc/latest/index.html (дата обращения: 07.03.2026)

УДК 004.91

РАЗРАБОТКА ЧАТ-БОТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДОГОВОРОВ И КОНТРОЛЯ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ В СИСТЕМЕ 1С: ДОКУМЕНТООБОРОТ 3.0

И.Ю. Молотков

Научный руководитель – **С.Ю. Бойков**, канд. техн. наук.

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается разработка чат-бота для системы «1С: Документооборот 3.0», обеспечивающего сквозное управление договорной деятельностью — от создания договора до контроля исполнения. На примере 18-этапного бизнес-процесса для договора закупки демонстрируется, как чат-бот автоматизирует запуск, согласование, уведомления и визуализацию статусов. Показано, что предложенное решение снижает нагрузку на сотрудников, ускоряет прохождение документов и повышает прозрачность контроля.

***Ключевые слова**: 1С, Документооборот 3.0, чат-бот, комплексный бизнес-процесс, этапы бизнес-процесса*

DEVELOPMENT OF A CHATBOT FOR CREATING CONTRACTS AND MONITORING THEIR IMPLEMENTATION IN THE 1C: DOCUMENT MANAGEMENT 3.0 SYSTEM

I.Yu. Molotkov

Scientific Supervisor – **S.Yu. Boikov**, Candidate of Technical Sciences

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the development of a chatbot for the 1C: Document Management 3.0 system, which provides end-to-end management of contractual activities, from the creation of a contract to the monitoring of its execution. Using the example of an 18-step business process for a procurement contract, the article demonstrates how the chatbot automates the launch, approval, notifications, and visualization of statuses. The proposed solution reduces the workload on employees, accelerates the processing of documents, and enhances the transparency of control.

***Keywords**: 1C, Document Management 3.0, chatbot, complex business process, business process stages*

Современное управление организацией немыслимо без автоматизации ключевых бизнес-процессов. Система «1С: Документооборот 3.0» давно зарекомендовала себя как эффективный инструмент для управления корпоративной документацией, согласования и контроля исполнения поручений [1]. Однако классические сценарии работы с системой зачастую требуют постоянного внимания сотрудника: вручную запустить процесс, проверить статус договора, напомнить исполнителю о сроке. С развитием технологий искусственного интеллекта и мессенджеров возникает необходимость сделать взаимодействие с документооборотом более интуитивным, оперативным и менее трудоемким.

Одним из перспективных вариантов решения становится внедрение чат-бота, интегрированного с «1С: Документооборот 3.0» [2]. В данной статье на примере комплексного бизнес-процесса рассматривается возможность использования чат-бота не только для создания договоров (от формирования проекта до согласования), но и для последующего контроля их выполнения. Анализируются ключевые этапы бизнес-процесса, включая маршруты согласования, автоматические уведомления, сбор статусов исполнения и обработку отклонений. Особое внимание уделяется тому, как чат-бот позволяет снизить нагрузку на сотрудников, ускорить прохождение документов и повысить прозрачность контроля.

Таким образом, основная цель работы заключается в обеспечении симбиоза чат-бота и «1С: Документооборот 3.0» для сквозного управления договорной деятельностью, от создания документа до фиксации его полного исполнения.

В качестве объекта демонстрации работы чат-бота был выбран вид документа «Договор закупки». Данный вид документа характеризуется сложной, многоступенчатой логикой прохождения, что делает его идеальным кандидатом для апробации предлагаемого подхода. Для него был определён комплексный бизнес-процесс, состоящий из 18 последовательных и параллельных этапов (рис. 1). Среди них: согласование с непосредственным руководителем, параллельное согласование в подразделениях, согласование у юристов, подготовка РКК к подписанию, внешнее согласование, размещение на ЭТП, регистрация и финальное списание в дело.

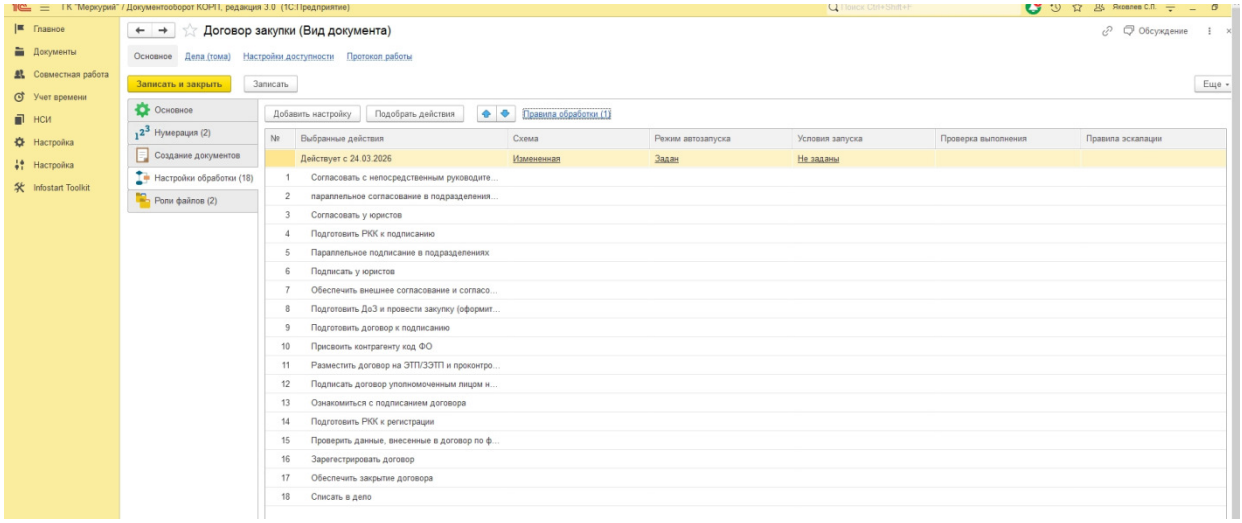


Рис. 1. Этапы Бизнес-процесса для договоров закупки

Для каждого из 18 этапов были определены правила обработки, а именно: конкретные участники (исполнители и контролёры), а также регламентные сроки выполнения (рис. 2). Например, этап «Присвоить контрагенту код ФО» закреплён за сотрудником казначейства, «Разместить договор на ЭТП» за управлением закупок, а «Зарегистрировать договор» за юристом. Часть этапов выполняется параллельно (например, сбор замечаний в подразделениях), часть строго последовательно.

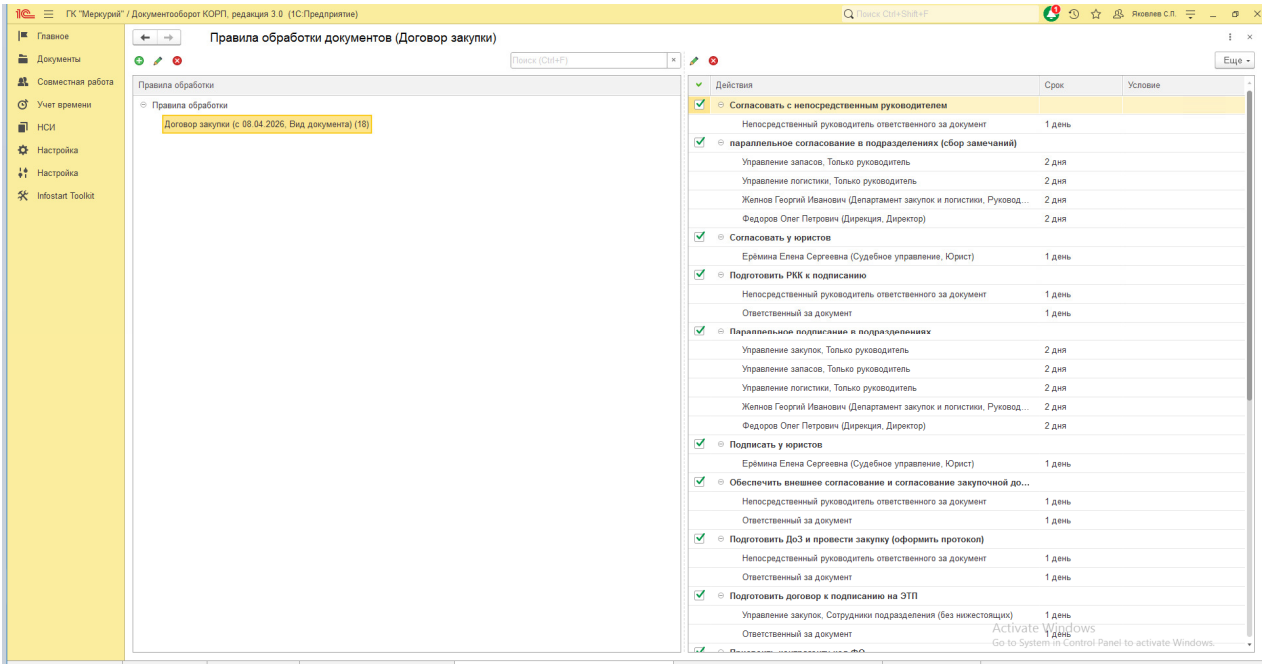


Рис. 2. Правила обработки Бизнес-процесса

Уже на этом этапе становится понятно, что контроль за выполнением столь сложного бизнес-процесса традиционными средствами (ручная проверка статусов, напоминания по электронной почте, обзвон исполнителей) требует значительных трудозатрат. Сотрудник, ответственный за договор, вынужден постоянно входить в систему, открывать карточку документа, анализировать схему обработки и при этом помнить, кто за что отвечает. Особенно остро проблема проявляется при параллельных этапах, когда задержка одного из исполнителей может остановить весь процесс.

Именно здесь чат-бот становится не вспомогательным инструментом, а центральным интерфейсом управления договором. Реализация чат-бота происходит посредством установки на компьютеры предприятия локального сервера взаимодействия, что позволяет не переживать об утечке информации и соблюсти требования к защите данных, актуальные для большинства коммерческих и государственных организаций.

На рис. 3 показаны созданные используемые состояния чат-бота.

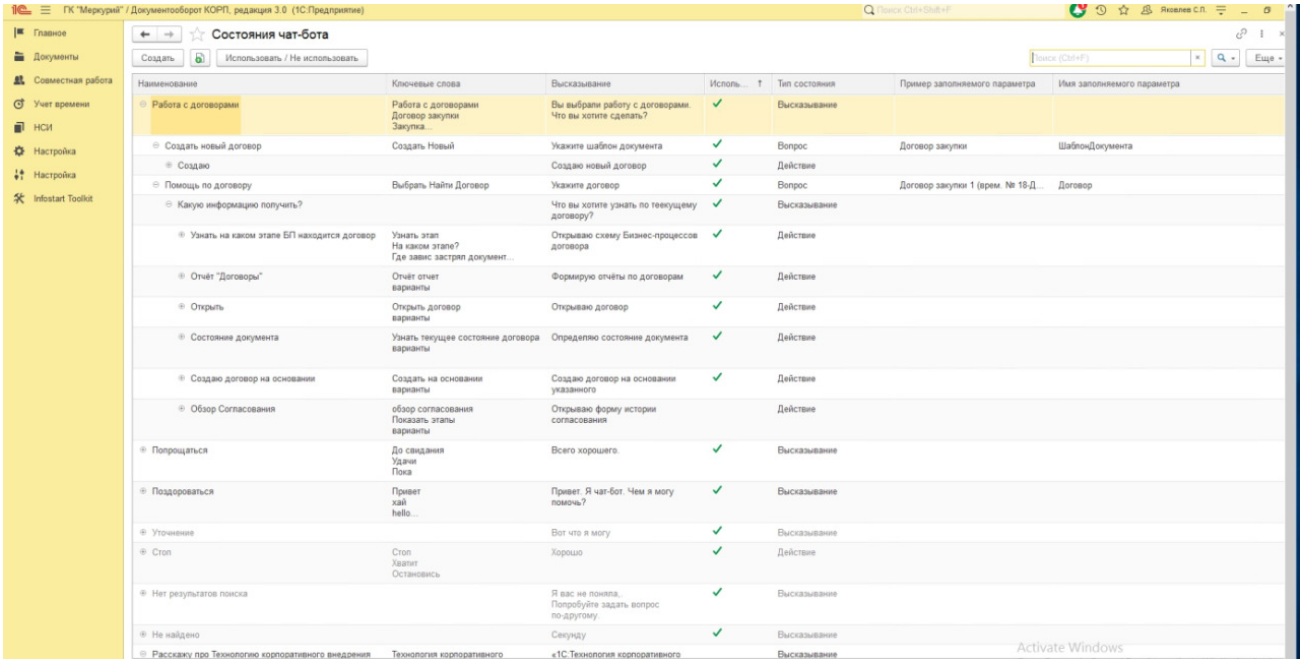


Рис. 3. Состояния чат-бота

В ходе разработки были спроектированы следующие ключевые состояния чат-бота (сценарии диалога):

«Создать новый договор» - чат-бот последовательно запрашивает тип документа, шаблон, проверяет заполнение обязательных полей и сохраняет документ в системе. При этом используется параметр Шаблон Документа и реализована проверка общих требований к заполнению реквизитов.

«Помощь по договору» – данное состояние предназначено для уточнения вида документа, с которым пользователь намерен работать в рамках диалога. Чат-бот запрашивает у пользователя информацию о типе договора (например, «Договор закупки», «Договор поставки» и т. д.) и сохраняет полученное значение в параметре Договор, после чего переходит к соответствующему сценарию: созданию нового документа на основании указанного, контролю исполнения или формированию отчёта. Это позволяет боту корректно настраивать дальнейшие шаги, подставлять нужные шаблоны и обращаться к правилам обработки именно того вида документа, который актуален для пользователя. Таким образом, состояние «Помощь по договору» выполняет роль смыслового маршрутизатора, снижая вероятность ошибок при выборе бизнес-процесса.

«Узнать на каком этапе бизнес-процесса находится договор» - данное состояние является центральным для контроля исполнения. Исполняемое действие программно

получает схему обработки объекта (договора) через вызов Работа С Процессами По Обработкам Объектов Вызов Сервера.

Параметры Открытия Схемы Обработки Для Объекта (Договор). Если схема не содержит действий, бот выводит предупреждение. В противном случае открывается форма «Карточка схемы обработки объекта», где визуально отображаются все 18 этапов, выделяется текущий шаг, указываются ответственные и сроки.

«Отчёт "Договоры"» – чат-бот динамически формирует отчёт с отбором по конкретному договору. Программно через компоновщика настроек добавляется элемент отбора по полю «Документ», устанавливается вид сравнения «Равно» и подставляется значение выбранного договора. После этого отчёт открывается с автоматической фильтрацией, что экономит пользователю время на каждый поиск.

«Открыть» – простейшее состояние, выполняющее прямое открытие карточки договора командой Открыть Значение (Договор); Удобно для быстрого перехода к редактированию или просмотру полной информации.

Вспомогательные состояния: «Поздороваться», «Попрощаться», «Уточнение», «Стоп», «Нет результатов поиска». Они обеспечивают комфортную навигацию и обработку ошибочных или пустых ответов пользователя.

Ниже представлена демонстрация работы с чат-ботом на примере выполнения состояния «Узнать, на каком этапе бизнес-процесса находится договор».

Пользователь начинает работу с чат-ботом, выбирает документ, у которого он собирается узнать этап бизнес-процесса, после чего пишет соответствующую команду (рис. 4). Результат указан на рис. 5.

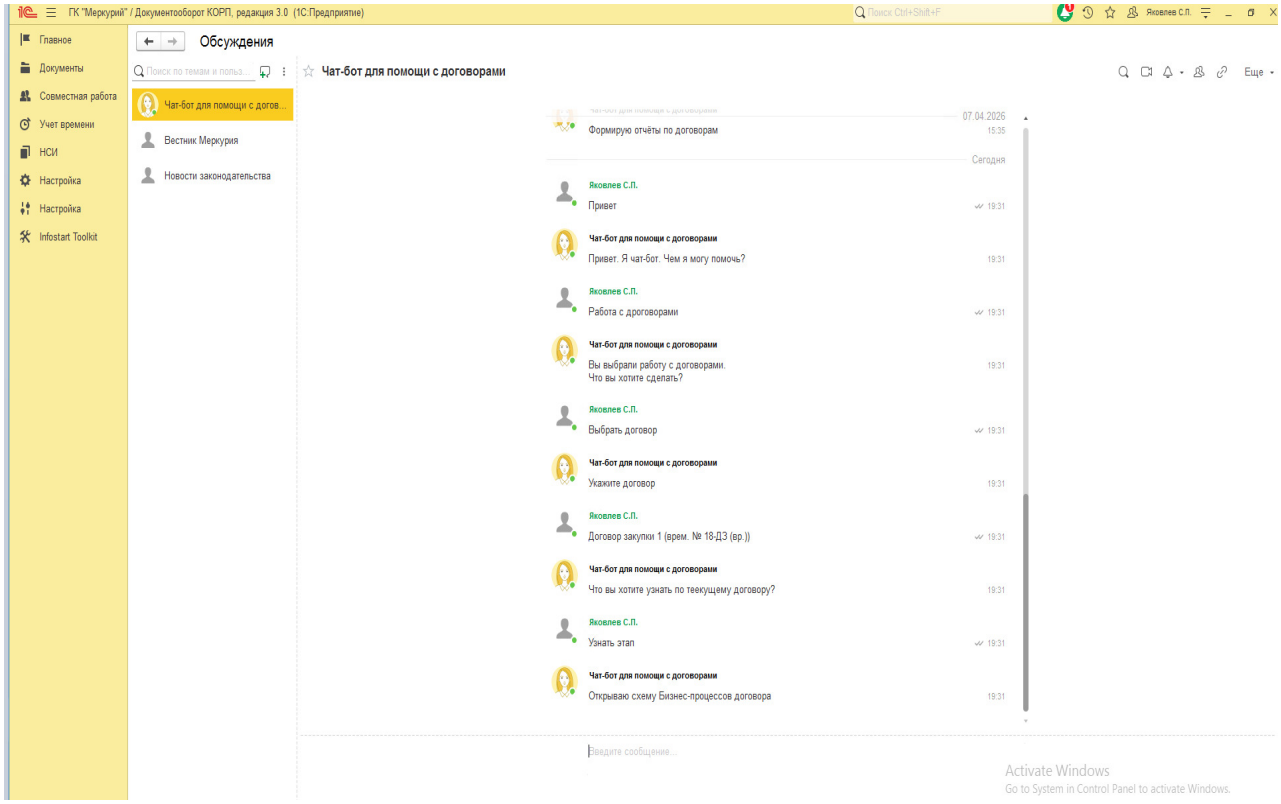


Рис. 4. Взаимодействие с чат-ботом

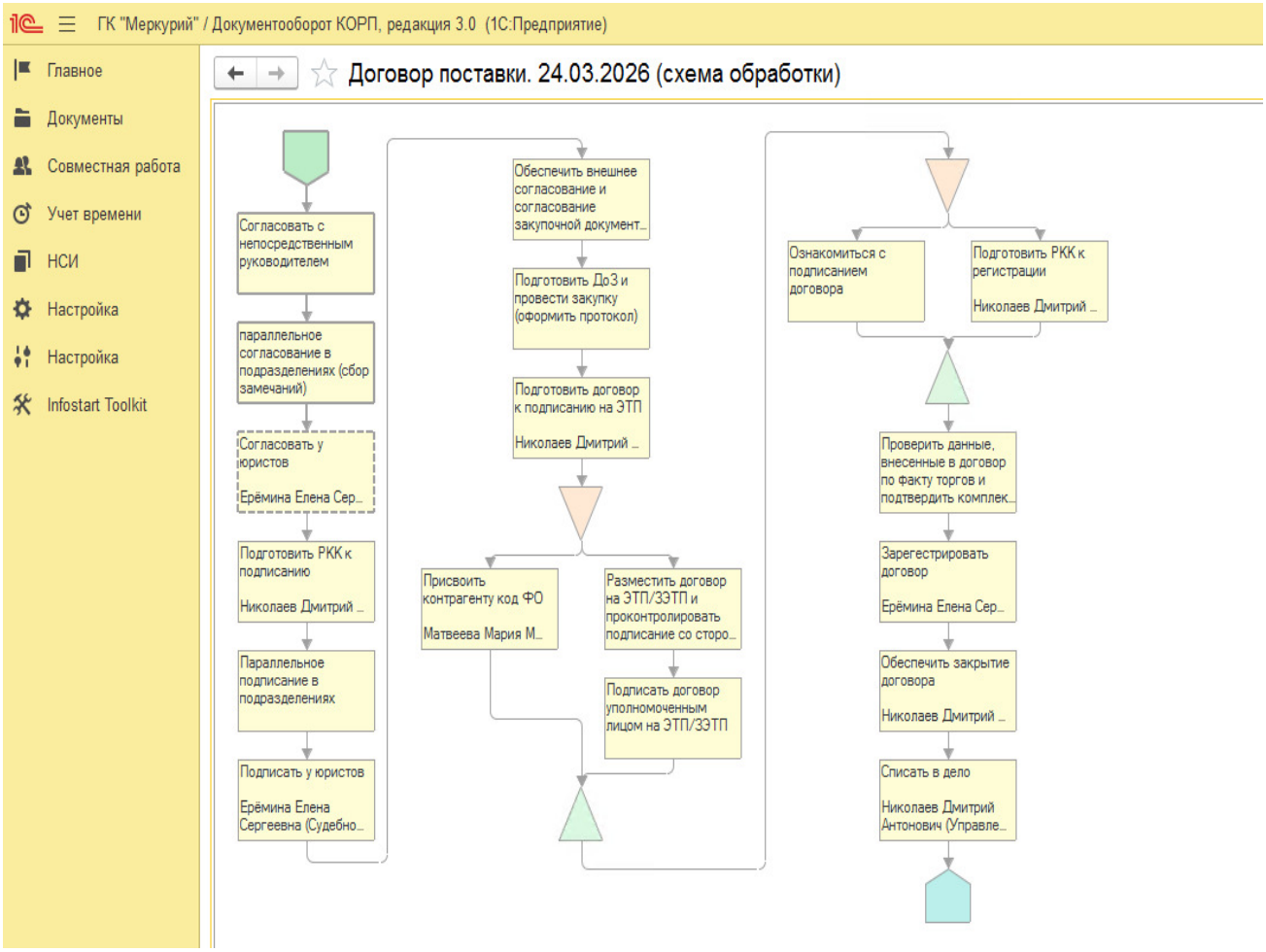


Рис. 5. Результат работы чат-бота

Разработанный чат-бот для 1С: Документооборот 3.0 представляет собой не просто интерфейс для запросов, а полноценного ассистента, встроенного в комплексный бизнес-процесс. Как показано на примере договора закупки из 18 этапов, чат-бот успешно поддерживает все ключевые функции: от выбора шаблона и создания документа до визуализации схемы согласования и контроля исполнения. Предложенные программные решения (программная установка отборов в отчётах, открытие карточек схем обработки объектов через чат-бот) могут быть применены для любых других видов документов в 1С: Документооборот 3.0.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1) Насников, Н.А. 1С конфигурация как средство электронного документооборота для электротехнического предприятия / Н.А. Насников // Передовые научно-технические и социально-гуманитарные проекты в современной науке: сборник статей VI Международной научно-практической конференции. – 2022. – С. 43-46

2) Ульянова, Н.Д. Чат-боты в системах электронного документооборота / Н.Д. Ульянова // Вестник образовательного консорциума Среднерусский университет. Информационные технологии. – № 2 (22). – 2023. – С. 14-19.

УДК 338.246.2

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКИ В 2026 ГОДУ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

С.Е. Неволина, А.А. Киселев

Научный руководитель - **А.А. Киселев**, канд. пед. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается перспективное направление развития российской экономики в 2026 году на основе внедрения искусственного интеллекта в цифровую трансформацию менеджмента и маркетинга на фоне энергетического кризиса в Западной Европе из-за войны в Иране и ослабления экономических санкций против продаж российской нефти и газа в 2026 году. Цель статьи – показать перспективы развития российской экономики, как цифровой экономики на основе цифровой трансформации технологий искусственного интеллекта во всех сферах.

Ключевые слова: *технология искусственного интеллекта, цифровая трансформация, цифровая экономика, развитие российской экономики*

PROSPECTS AND CHALLENGES OF DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN ECONOMY IN 2026 BASED ON THE IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

S.E. Nevolina, A.A. Kiselev

Scientific Supervisor - **A.A. Kiselev**, Candidate of Pedagogical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

This article examines the prospects for the development of the Russian economy in 2026 based on the implementation of artificial intelligence in the digital transformation of management and marketing, against the backdrop of the energy crisis in Western Europe due to the war in Iran and the easing of economic sanctions against Russian oil and gas sales in 2026. The purpose of this article is to demonstrate the prospects for the development of the Russian economy as a digital economy based on the digital transformation of artificial intelligence technologies across all sectors.

Keywords: *artificial intelligence technology, digital transformation, digital economy, development of the Russian economy*

В настоящее время технологии искусственного интеллекта (ИИ) активно внедряются во все сферы мировой экономики, внося современные изменения в разные ее отрасли. Многие страны интенсивно начинают бороться за лидерство в мировой гонке в сфере ИИ, возлагая на них новые и перспективные ожидания. Это относится и к России. Так, например, Президент РФ В.В. Путин, выступая в ноябре 2025 года на пленарном заседании конференции «Сбера» AI Journey 2025 по искусственному интеллекту, поручил широко использовать технологии ИИ по всей России. При этом он подчеркнул, что «наша страна должна обладать целым комплексом собственных технологий и продуктов в области генеративного ИИ» и они должны полностью контролироваться российскими специалистами, причем на всех этапах [4].

Внедрение искусственного интеллекта во все сферы российской экономики, как цифровой экономики в 2026 году выступает в качестве важнейшего фактора ее перспективного развития [6]. Нужно отметить, что понимая важность развития технологий ИИ в развитии экономики, в России 27 февраля 2026 года начала свою работу комиссия по развитию ИИ. А в марте 2026 года Министерство цифрового развития, связи и

коммуникаций РФ представило законопроект о регулировании ИИ, правила отказа от ИИ и даже запрет на манипуляции потребителями. Вследствие этого отечественные исследователи приходят к выводу о том, что «если 2025 год стал годом, когда ИИ закрепился в роли ежедневного помощника разработчиков, то 2026 год – это год, когда он стал полноценным соавтором. Сегодня 67% разработчиков по всему миру применяют их в своих рабочих процессах. Мы перешли порог от экспериментов к инфраструктуре». Другими словами, исследователи полагают, что 2026 год – это год перехода от «разговорного ИИ» к «системам, которые не ждут запросов, а самостоятельно формируют и выполняют многошаговые планы» [7].

Статистика свидетельствует о том, что в последние несколько лет государства и корпорации активно инвестируют и будут инвестировать в технологии ИИ. По данным Statista в 2025 г. размер рынка ИИ составил рекордные 254,5 млрд долларов. А в ближайшие семь лет он будет ежегодно расти в среднем на 37% в год [2]. Так, например, по данным McKinsey&Company уже к концу 2026 года 88% иностранных компаний по всему миру будут использовать в своей деятельности технологий ИИ, по крайней мере, в какой-либо одной бизнес-функции, а более половины – сразу в нескольких сферах экономики [9]. И Россия в этой гонке за технологическое лидерство стремится занять свою нишу рынка. Как отметил сооснователь ИИ-интегратора Metalab С. Батулин в январском интервью «Телеспутнику», «потенциал технологии только начинает раскрываться. Мы наблюдаем первые по-настоящему прибыльные интеграции ИИ… Это уже не просто эксперименты, а работающие решения, приносящие доход» [8]. При этом по данным Statista, рынок ИИ в России в 2025 году достиг примерно 5,04 млрд долларов и по прогнозам специалистов будет расти более чем на 26% в год с 2026 по 2031 год, что указывает на значительный потенциал этого сегмента [10]. Одновременно альтернативные источники указывают, что российский рынок ИИ в 2026 году возрастет на 2,3 млрд. долларов, что на 45% выше по сравнению с 2025 годом [5]. Это свидетельствует о заинтересованности российской экономики в технологиях ИИ.

Но, к сожалению, можно констатировать, что это пока еще в любом варианте несколько ниже, чем у иностранных компаний. Проведенный анализ научной литературы по проблемам использования технологий ИИ показывает, что по данным McKinsey&Company, уже более двух третей иностранных компаний используют ИИ в нескольких бизнес-функциях, а около половины – в трех и более областях своей деятельности [9]. Например, США за последние пять лет вложили в эту сферу 328,55 млрд долларов, КНР –132,67 млрд долларов. Затем с большим отрывом идут Великобритания с объемом финансирования в 25,54 млрд. долларов, Индия –16,15 млрд. долларов и Германия –14,3 млрд. долларов [2].Однако есть проблемы, связанные с внедрением технологий ИИ в экономику, так как на глобальном рынке генеративного ИИ наблюдается классический дисбаланс. Исследователи Высшей школы экономики и отраслевые аналитики прямо говорят, что доходы от программных продуктов пока не компенсируют масштабные вложения в аппаратную инфраструктуру. По их мнению, заметный бизнес-эффект от внедрения генеративного ИИ наступит только через 5-10 лет [8]. Вследствие этого бизнес ждет от государства налоговых льгот и субсидий на использование технологий ИИ. Как отметил первый заместитель председателя Сбербанка РФ А. Ведяхин: «Государство и бизнес подходят к ИИ с разных сторон: для государства – это суверенитет и безопасность, для нас – долгосрочная прибыль и новые продукты» [8]. Такие меры, по его словам, могут сократить срок окупаемости и высвободить десятки млрд. руб. на реинвестиции.

С этим нужно считаться. И в реализации стратегии развития информационного общества в России на 2017-2030 годы, и в стратегии обеспечения технологического лидерства РФ в 2026 году нужно вносить коррективы, обращая больше внимания на следующие приоритеты в сфере развития и внедрения в российскую экономику технологий ИИ: создание инфраструктуры ИИ, продвижение локальных отечественных платформ, обучение персонала использованию технологий ИИ и инвестирование в создание и

внедрение самых современных технологий ИИ, в первую очередь, в важнейшие сферы деятельности российской экономики.

Вследствие этого можно выделить ряд задач в сфере внедрения в российскую экономику технологий ИИ, требующих своего решения в 2026 году.

Во-первых, это задача цифровой трансформации менеджмента и маркетинга крупных российских организаций с использованием ИИ, решение которой дает возможность разрешения проблем быстрого анализа больших данных в реальном масштабе времени в интересах управления, а также для прогнозирования спроса; для автоматизации маркетинговых коммуникаций и персонализации предложений, позволяющих сокращать затраты на выполнение этих работ; для оптимизации операционных процессов в интересах повышения эффективности деятельности организаций. Нужно отметить, что организации-лидеры в использовании технологий ИИ, такие, как финтех, ритейл и телеком, где большие данные уже есть и процессы отлажены, уже получают отдачу от их использования. И в целом, по данным «Яков и Партнёры» и «Яндекса» за декабрь 2025 года, более 70% крупных компаний уже используют генеративный ИИ хотя бы в одной из своих бизнес-функций. Но вот, к примеру, проведенные в феврале 2026 года исследования 100 российских отельеров в гостиничном бизнесе показали, что только более половины из них в какой-то мере используют ИИ. Но регулярно используют ихлишь 12% респондентов, а 40% применяют их лишь точечно или в тестовом режиме. При этом даже в этих условиях приоритет отдаётся маркетингу и коммуникациям с гостями, а операционные задачи пока затрагиваются очень редко[8]. Вследствие этого гостиничный сектор заметно отстаёт от общего уровня. Это касается и ряда других подобных секторов экономики. И эту задачу нужно решать уже на государственном уровне, понимая то, что ИИ – это уже не просто модный тренд, а важная инфраструктура будущего развития экономики и обеспечения ее конкурентоспособности.

Во-вторых, инвестирование в технологии ИИ сегодня требует государственной поддержки. Даже крупные организации в одиночку не в состоянии разрабатывать и внедрять технологии ИИ в деятельность организаций в том объеме, который необходим для обеспечения их конкурентоспособностями. Можно отметить, что уже сейчас именно государственные инвестиции способствуют ускорению внедрения технологий ИИ в российский бизнес, в том числе поддерживают развитие Сбера, Яндекса и ВКонтакте, созданию инфраструктуры для хранения и анализа больших данных, а также продвижению образовательных программ для специалистов [1]. К примеру, в 2026 году Сбер будет заинтересован во внедрении технологий ИИ в кредитный скоринг, прогнозирование финансовых рисков, чат-боты, персонализированные рекомендации для клиентов; Яндекс – в персонализации поиска рекомендаций Яндекса по оптимизации рекламных кампаний; ВКонтакте – в таргетинге рекламы, в рекомендациях по контенту и автоматической модерации сообщений [1, 10]. Но, как показывает сегодняшняя практика, доходы от нейросетей пока не покрывают колоссальные вложения в «железо», дата-центры задыхаются от дефицита энергии, а большинство проектов всё ещё сидит на стадии пилотов[8]. Всем понятно, что инфраструктура применения технологий ИИ стоит очень дорого и, одновременно, несет много рисков. Но это сегодня необходимое условия перспективного развития экономики. Однако именно 2026 год, как подсказывает ситуация в области развития технологий ИИ, станет серьёзной проверкой на прочность российской экономики и определит дальнейшие тренды ее развития, как цифровой экономики.

В-третьих, в настоящее время существуют серьезные проблемы и ограничения внедрения технологий ИИ в российских организациях. Важными из них являются нехватка нужных кадров, особенно в условиях СВО, когда многие такие специалисты вынуждены находиться в зоне СВО. В этих условиях часто можно встретить ситуации сопротивления персонала организаций внедрению технологий ИИ, так как им сложно адаптироваться к новым условиям деятельности. Все это снижает эффективность интеграции технологий ИИ в стратегию развития организаций, а также преодоления проблем существующих нормативных и инфраструктурных барьеров, ограничивающих доступ к зарубежным решениям,

обеспечения необходимого уровня кибербезопасности и соответствия национальным стандартам [5]. Например, для внедрения технологий ИИ Сберу потребовалось провести комплексную подготовку персонала, модернизацию ИТ-инфраструктуры и адаптацию бизнес-процессов, что заняло несколько лет упорной и целенаправленной работы в этой сфере. Аналогичным образом, Яндекс и ВКонтакте постепенно интегрируют технологии ИИ, чтобы не перегружать свои системы и персонал. В-четвертых, перспективные направления развития отечественной экономики с использованием ИИ в России связаны с необходимостью срочного развития отечественных платформ ИИ, чтобы снижать, а лучше, исключать зависимость российских организаций от иностранного программного обеспечения, повышения цифровой компетенции у сотрудников через использование корпоративных образовательных программ по аналитике данных, машинному обучению и управлению цифровыми инструментами и др. [5, 10]. Современный опыт крупных организаций, таких, как Сбер, Яндекс, ВКонтакте показывает, что успешная цифровая трансформация технологий ИИ возможна только при системном подходе: сочетании технологий, процессов, обучения персонала и стратегического планирования. Используя такой подход, к примеру, Сбер повысил точность кредитных рейтингов, Яндекс улучшил конверсию рекламных кампаний с помощью персонализированных алгоритмов, а ВКонтакте повысил вовлеченность пользователей с помощью рекомендаций контента на основе ИИ.

Необходимо отметить, что практический опыт, полученный Россией при использовании технологий ИИ в беспилотных системах (БПС) в зоне СВО, создает определенную технологическую и практическую основу быстрого внедрения уже опробованных технологических решений в сфере ИИ в различные сферы российской экономики. Несмотря на то, что развитие технологий БПС с ИИ в России в настоящее время сталкивается с **противоречиями между военными и гражданскими задачами, к**ак пишет The New York Times, Россия целиком и полностью превосходит, как страны НАТО, так и Украину в сфере производства и применения боевых БПЛА, «присвоив» ей титул «Империи дронов» [3]. А внедрение в российскую экономику БПС различного назначения рассматривается сегодня перспективным фактором ее развития в сложных современных условиях, так как помогут повысить эффективность различных производственных процессов, сократить затраты и минимизировать влияние человеческого фактора в решении сложных и опасных производственных задач.

Таким образом, в 2026 году развитие российской экономики с использованием технологий ИИ является ключевым фактором обеспечения ее конкурентоспособности и дальнейшего развития. Было установлено, что внедрение технологий ИИ будет способствовать развитию российской экономики, но потребует стратегически интегрировать технологии ИИ в бизнес-процессы; в первоочередном порядке развивать отечественные платформы ИИ; постоянно повышать цифровую компетентность сотрудников и формировать профессиональные компетенции, позволяющие эффективно использовать технологий ИИ; планировать государственную поддержку и соблюдение национальных стандартов при разработке и внедрении технологий ИИ в деятельность организаций; обеспечивать лидерство на мировом рынке в разработке и системном внедрении технологий ИИ в деятельность российских организаций. При этом в сфере использования технологий ИИ российской экономике важны не просто эксперименты, а работающие решения, приносящие доход. И только в этом случае внедрение технологий ИИ будет выступать ключевым фактором развития российской экономики в 2026 году и создаст базу ее дальнейшего перспективного роста. При этом, благодаря государственной поддержке, национальным проектам и фокусу на технологическом суверенитете, Россия способна стать одним из мировых лидеров в сфере использования технологий ИИ. И 2026 год станет серьёзной проверкой российской экономики на прочность в новых реалиях развития мировой экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». – URL: https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201910100025 (дата обращения: 02.04.2026).

2) Как искусственный интеллект проникает в экономику // Ведомости: [сайт]. – 2025. – URL: https://www.vedomosti.ru/analytics/krupnyy_plan/articles/2025/11/25/1157711-kak-iskusstvennii-intellekt-pronikaet-v-ekonomiku (дата обращения: 02.04.2026).

3) Киселев, А.А. Комплексное применение технологий беспилотных систем и искусственного интеллекта как перспективный фактор развития российской экономики // Роль искусственного интеллекта и нейронных сетей в развитии современных технологий. Прикладные решения и практики применения: монография / под общ. ред. научного совета ГНИИ «Нацразвитие». – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2026. – С.20-31.

4) Путин поручил широко использовать технологии ИИ по всей России // РИА новости: [сайт]. – 2025. – URL: https://ria.ru/20251119/putin-2056109778.html (дата обращения: 02.04.2026).

5) РБК Компании. Рынок ИИ в России в 2025–2026 году: 2,1–2,3 млрд долларов и рост 45% // РБК: [сайт]. – 2026. – URL: https://companies.rbc.ru/news/67b5c9d29a79c2a3b42d8f3e (дата обращения: 25.02.2026).

6) Сазонов, А.И. Экономический и конкурентный потенциал комплексного использования беспилотных летательных аппаратов и искусственного интеллекта в российской экономике / А.И. Сазонов, А.А. Киселев // Прогрессивная экономика. – 2026. – № 2 (47). – С. 130-146.

7) Революция ИИ в 2026 году: ключевые тренды, которые должен знать каждый разработчик // Habr: [сайт]. – 2026. – URL: https://habr.com/ru/articles/1014910/ (дата обращения: 02.04.2026).

8) Черные ИИ-лебеди и экономические пузыри на правовом болоте // ТС: [сайт]. – 2026. – URL: https://telesputnik.ru/materials/tech/mneniya/cyornye-ii-lebedi-i-ekonomiceskie-puzyri-na-pravovom-bolote (дата обращения: 02.04.2026).

9) McKinsey & Company. The State of AI in 2025: Global Survey // McKinsey: [сайт]. – 2025. – URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai (дата обращения: 02.04.2026).

10) Artificial Intelligence Market – Russia – 2026 forecast // Statista.: [сайт]. – 2026. – URL: https://www.statista.com/outlook/tmo/artificial-intelligence/russia (дата обращения: 02.04.2026).

УДК 332.871

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ERP-СИСТЕМ В УПРАВЛЕНИИ НЕДВИЖИМОСТЬЮ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

А.В. Пузанкова

Научный руководитель – **М.А. Деревяго**, ст. преподаватель

Белорусский государственный технологический университет

Проведён сравнительный анализ ERP-систем для управления недвижимостью: 1С, SAP RE-FX, Yardi Voyager, Oracle JD Edwards, Галактика ERP и Парус. Выявлены недостатки аналитического блока: отсутствие факторного анализа, инвестиционного калькулятора, бенчмаркинга и IoT-интеграции. Предложены направления доработки: модуль факторного анализа доходности, инвестиционный калькулятор, система бенчмаркинга, развитие IoT и предиктивной аналитики.

***Ключевые слова**: ERP-системы, управление недвижимостью, аналитика, факторный анализ, инвестиционный калькулятор, бенчмаркинг, предиктивная аналитика*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ANALYTICAL CAPABILITIES OF ERP SYSTEMS IN REAL ESTATE MANAGEMENT AND THE DIRECTIONS OF THEIR IMPROVEMENT

A.V. Puzankova

Scientific Supervisor – **M.A. Dzeraviaha**, Senior Lecturer

Belarusian State Technological University

A comparative analysis of ERP systems for real estate management has been carried out: 1C, SAP RE-FX, Yardi Voyager, Oracle JD Edwards, Galaktika ERP and Parus. The disadvantages of the analytical unit are revealed: the lack of factor analysis, investment calculator, benchmarking and IoT integration. Areas of improvement are proposed: a module for factor analysis of profitability, an investment calculator, a benchmarking system, the development of IoT and predictive analytics.

***Keywords**: ERP systems, real estate management, analytics, factor analysis, investment calculator, benchmarking, predictive analytics*

В условиях цифровой трансформации экономики и необходимости обеспечения технологического суверенитета России и Беларуси эффективное управление портфелем недвижимости становится критическим фактором конкурентоспособности предприятий. Согласно исследованию 2025 г., доля импортозамещающих ERP-решений в компаниях-девелоперах достигла 74%, а объём рынка ERP-систем превысил 90 млрд руб. при ежегодном росте примерно на 10%. Однако, как отмечают эксперты, зрелого отраслевого ERP-решения, которое бы легло в основу единой экосистемы девелопера и удовлетворило все потребности бизнеса, пока не существует [4].

Рынок ERP-систем для управления недвижимостью представлен как международными, так и отечественными разработками. Среди международных решений наиболее распространены SAP Real Estate Management (RE-FX), Yardi Voyager и Oracle JD Edwards Enterprise One Real Estate Management. Среди отечественных продуктов лидирующие позиции занимает 1С с отраслевыми решениями «1С:Управление недвижимостью и арендой КОРП» и модулем «1С:Аренда и управление недвижимостью» для 1С:ERP, а также системы «Галактика ERP» и «Парус». Активный переход к цифровым экосистемам в сфере коммерческой недвижимости включает внедрение CRM, ERP, онлайн-сервисов для арендаторов и умных зданий с IoT-датчиками. При этом, как показывают исследования IDC, 71% организаций по-прежнему зависят от электронных таблиц, а 63% – от ERP для управления недвижимостью и объектами, что замедляет трансформацию и увеличивает риски [6].

Программный продукт «1С:Управление недвижимостью и арендой КОРП» на базе «1С:Бухгалтерия 8 КОРП» предназначен для собственников недвижимости, управляющих компаний, девелоперских компаний, а также компаний с филиальной структурой и торговых сетей. Система располагает функционалом, позволяющим автоматизировать управление, административную, управленческую и учетную деятельность финансовых отделов организаций. К её аналитическим функциям относятся: управление реестром объектов недвижимости с возможностью детализации до уровня рабочего места и 3D-визуализацией на базе российской BIM-системы «Renga»; ведение договоров доходной и расходной аренды с детализированными параметрами и специальными условиями; управление взаиморасчетами с арендаторами и арендодателями, включая расчет начислений по произвольным формулам (в том числе процент с торгового оборота арендатора); формирование управленческой отчетности с возможностью создания графиков, диаграмм, интерактивных дашбордов и панели мониторинга ключевых показателей (KPI) с помощью инструмента «1С:Аналитика»; анализ эффективности использования площадей и расчет показателей заполняемости; механизм анализа данных и прогнозирования, предназначенный для выявления неочевидных закономерностей в накопленных данных. Данное решение особенно эффективно для российских компаний благодаря глубокой интеграции с законодательством и бухгалтерскими стандартами [9].

SAP RE-FX является модулем в экосистеме SAP ERP, обеспечивающим управление полным жизненным циклом недвижимости от приобретения до выбытия. Например, крупные российские компании, такие как ЕВРАЗ, автоматизировали процессы управления недвижимостью и земельными участками на базе SAP Real Estate Management, что позволило вести единую базу, учет и управление недвижимым имуществом, а также обеспечило прямой доступ к актуальной информации о состоянии земельно-имущественного комплекса[1]. Система предоставляет следующие аналитические возможности: роль «Аналитик контроллинга недвижимого имущества (RE)» для оценки необходимых данных и показателей; аналитические отчеты по объектам с возможностью навигации по видам затрат и детализацией; автоматизация учета по стандарту IFRS 16 (аренда) с прозрачностью, автоматизацией и предсказуемостью арендных платежей; управление амортизационными планами активов с интеграцией с модулями Controlling (CO), Plant and Maintenance (PM), CRM и Asset Accounting (AA); интеграция с SAP Analytics Cloud для получения полного представления данных компании, обнаружения скрытых закономерностей и прогнозирования результатов; поддержка мультивалютных операций и отслеживание изменений условий договоров с сохранением истории [7].

Yardi Voyager – это комплексная веб-платформа для управления недвижимостью, охватывающая весь спектр операций от аренды до финансового учета и обслуживания. Система предлагает отраслевые версии для коммерческой и жилой недвижимости, а также для студенческих общежитий. Её аналитический функционал включает: централизованное управление операциями, арендой и бухгалтерией с ролевыми дашбордами и рабочими процессами; Performance Manager – специализированный инструмент для анализа инвестиций в недвижимость, обеспечивающий прозрачность инвестиционных, финансовых и операционных показателей в реальном времени; бюджетирование и прогнозирование с возможностью подключения управления лизингом, управления недвижимостью и управления активами в едином решении, устраняя ошибки, связанные с электронными таблицами; бизнес-аналитику через интеграцию с Yardi Orion и другими BI-инструментами для создания пользовательских дашбордов; отчеты по заполняемости (occupancy reports) с возможностью автоматической рассылки по расписанию; Fixed Assets Manager для отслеживания амортизации активов и управления жизненным циклом [8].

Модуль Oracle JD Edwards Enterprise One Real Estate Management обеспечивает комплексное управление недвижимостью и арендой в составе ERP-системы JD Edwards, предоставляя широкие возможности для оптимизации финансовых и операционных процессов управления портфелем недвижимости. Среди его аналитических функций:

управление заполненностью и денежными потоками с контролем критических дат и условий аренды; анализ продаж (Sales Analysis) с широким спектром отчетов для анализа и сравнения проектов, возможностью настройки периодов анализа (неделя, месяц, квартал, год) и построения прогнозов; автоматизация биллинга для сложных коммерческих и розничных арендных договоров; интеграция с Oracle Analytics Cloud (OAC) для визуализации прогнозов, созданных AI, вместе с операционными данными JD Edwards, а также для автоматического выявления трендов и аномалий; встроенная аналитика по различным направлениям, включая анализ расходов, анализ продаж, анализ использования недвижимости и анализ управления жизненным циклом активов; учет аренды по стандарту IFRS 16 и управление активами с низкой доходностью (выявление under-performing assets) [5].

Система «Галактика ERP» является одним из ключевых продуктов, который также имеет специализированные решения для управления недвижимостью. Модуль «Управление недвижимостью» предназначен для предприятий и организаций, осуществляющих сдачу в аренду объектов недвижимости или земельных участков. Он обеспечивает автоматизированный расчет коммунальных платежей с учетом индивидуального потребления и тарифов, анализ доходности и целесообразности предоставления аренды для оптимизации портфеля недвижимости, контроль своевременного и правильного выполнения договоров аренды с автоматическими напоминаниями о ключевых датах, учет договоров на реализацию объектов недвижимости с возможностью отслеживания статуса выполнения обязательств, а также формирование управленческой отчетности по доходам, расходам и загрузке объектов [3].

Система «Парус» предлагает модуль «Управление имуществом», который особенно востребован в государственном и муниципальном секторе. Он обеспечивает комплексный учет объектов имущества и недвижимости в пространственном, экономическом, техническом, производственном, строительном, страховом и юридическом ракурсах; интеграцию реестрового учета имущества с бухгалтерским учетом балансодержателей для обеспечения полного и достоверного учета; автоматизацию расчета затрат и нормативов на содержание, ремонты и эксплуатацию объектов имущества; формирование специализированной отчетности для государственных и муниципальных нужд; а также модуль консолидации для сведения любых произвольных отчетов, что существенно расширяет спектр применения решения [2].

На основе проведенного анализа системных функций различных ERP-решений для управления недвижимостью составлена сводная таблица сравнения (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение ERP-систем

Критерий	1С: управл. недвиж. и арендой КОРП	SAP RE-FX	Yardi Voyager	Oracle JD Edwards	Галактика ERP	Парус
Управление реестром объектов (учёт площадей, зданий)	+	+	+	+	+	+
Автоматизация расчётов с арендаторами	+	+	+	+	+	+
3D-визуализация объектов / BIM	+	–	–	–	–	–
Интеграция с внешними BI-системами (Power BI, SAP Analytics Cloud и др.)	+	+	+	+	–	–
Предиктивная аналитика (ML-прогнозирование)	+	+	+	+	–	–
Специализированный анализ инвестиций (Performance Manager)	–	–	+	–	–	–
IoT-интеграция	–	–	+	–	–	–
Управление жизненным циклом активов	+	+	+	+	–	–
Анализ продаж недвижимости	–	–	–	+	–	–

По таким критериям, как управление реестром объектов, ведение договоров аренды, автоматизация расчетов с арендаторами, все рассмотренные системы имеют положительную реализацию. Однако по ряду важных аналитических функций наблюдаются существенные различия. Трехмерная визуализация объектов присутствует только в 1С:УНД КОРП. Соответствие стандарту МСФО 16 реализовано в SAP RE-FX, Yardi Voyager и Oracle JD Edwards, но отсутствует в 1С, Галактике и Парусе. Интеграция с BI-инструментами (например, Power BI, SAP Analytics Cloud, Oracle Analytics) имеется в западных системах и в 1С (через «1С:Аналитику»), но отсутствует в Галактике и Парусе. Анализ продаж и инвестиций (Performance Manager) есть только в Yardi Voyager и Oracle JD Edwards. IoT-интеграция в базовых версиях присутствует лишь в Yardi Voyager. Предиктивная аналитика (прогнозирование на основе машинного обучения) декларируется в 1С, SAP, Yardi и Oracle, но отсутствует в Галактике и Парусе. При этом ни одна из рассмотренных систем не имеет встроенного факторного анализа доходности недвижимости, инвестиционного калькулятора (NPV, IRR) и автоматического бенчмаркинга (сравнения с рынком).

Несмотря на широкий функционал рассмотренных ERP-систем, анализ выявил ряд системных недостатков в их аналитическом блоке:

– отсутствие встроенного факторного анализа. Ни одна из систем не предлагает встроенных инструментов для проведения факторного анализа доходности или стоимости недвижимости. Пользователи вынуждены выгружать данные в электронные таблицы и проводить анализ вручную, что снижает оперативность принятия решений;

– слабая инвестиционная аналитика. В системах отсутствуют встроенные модели оценки эффективности инвестиций (NPV, IRR, срок окупаемости) для принятия решений о покупке, продаже, реконструкции или новом строительстве объектов недвижимости;

– ограниченная предиктивная аналитика. Хотя некоторые системы заявляют о наличии прогнозных функций, полноценные модели прогнозирования загрузки площадей, арендных ставок и денежных потоков с использованием методов машинного обучения отсутствуют в базовых версиях;

– отсутствие бенчмаркинга. Системы не позволяют автоматически сравнивать показатели эффективности использования недвижимости предприятия со среднеотраслевыми или конкурентными данными;

– проблемы интеграции с IoT-устройствами. В большинстве систем отсутствует встроенная интеграция с системами умного здания (BMS), что не позволяет автоматически собирать данные о фактическом использовании помещений, энергопотреблении и других параметрах;

– сложность кастомизации аналитических отчетов. В некоторых системах (например, Yardi) создание специфических отчетов требует знания SQL, что создает барьер для бизнес-пользователей;

– недостаточная интеграция между модулями. ERP-системы часто испытывают трудности с интеграцией, что приводит к несоответствию данных, нестабильности интерфейсов и другим проблемам.

На основе выявленных недостатков предлагаются следующие направления доработки аналитического блока ERP-систем для управления недвижимостью:

– внедрение модуля факторного анализа, который должен автоматически рассчитывать изменение доходности и стоимости недвижимости за период, разлагать это изменение на вклад факторов, визуализировать результаты и формировать рекомендации по улучшению показателей;

– разработка инвестиционного калькулятора, позволяющего рассчитывать ключевые показатели эффективности инвестиций в недвижимость: чистую приведенную стоимость (NPV); внутреннюю норму доходности (IRR); простой и дисконтированный срок окупаемости;

– создание системы автоматического бенчмаркинга, которая позволит сравнивать показатели предприятия со среднерыночными данными. Это может быть реализовано через

интеграцию с внешними API аналитических агентств (CBRE, JLL, Nikoliers) или через создание анонимной базы данных пользователей системы;

– развитие IoT-интеграции. Для сбора данных о фактическом использовании помещений необходимо обеспечить встроенную интеграцию с системами умного здания (BMS) через стандартные API-интерфейсы. Это позволит автоматически получать данные о фактической заполняемости помещений (датчики движения), энергопотреблении (электросчетчики, теплосчетчики), температурном режиме и влажности, работе инженерных систем;

– расширение предиктивной аналитики на основе машинного обучения. Целесообразно внедрение моделей машинного обучения для прогнозирования загрузки площадей на основе исторических данных, прогнозирования арендных ставок с учетом рыночных трендов, выявления рисков неплатежей по арендным договорам, оптимизации графиков ремонтных работ (предиктивное обслуживание). Как отмечается в исследовании IDC, генеративный ИИ уже формирует требования к программному обеспечению, а агентный ИИ ожидается для автоматизации нового уровня эффективности;

– улучшение пользовательского интерфейса аналитических инструментов. Необходимо сделать аналитические инструменты более доступными для бизнес-пользователей, не требующими знания языков программирования. Внедрение low-code/no-code инструментов для создания отчетов позволит сократить зависимость от IT-специалистов и повысить оперативность получения аналитики;

– создание единой экосистемы данных. Создание единой экосистемы позволит закрепить эффект цифровизации внутри девелопера. Предлагается создание централизованного хранилища данных (Data Warehouse), интегрирующего данные из всех подсистем предприятия для обеспечения единого источника достоверной информации.

Таким образом, рынок ERP-систем для управления недвижимостью динамично развивается, однако, как показал анализ, зрелого отраслевого продукта, полностью удовлетворяющего потребности девелоперов, пока не существует. Ведущие ERP-системы (1С, SAP, Yardi, Oracle JD Edwards, Галактика, Парус) предоставляют широкий набор функций для учета и базовой аналитики недвижимости, но их аналитические возможности имеют некоторые ограничения. Предложены конкретные направления доработки аналитических функций ERP-систем для управления недвижимостью, включая внедрение модуля факторного анализа, разработку инвестиционного калькулятора, создание системы бенчмаркинга, развитие IoT-интеграции и расширение предиктивной аналитики на основе машинного обучения. Реализация представленных направлений позволит повысить эффективность управления портфелем недвижимости, обеспечить принятие обоснованных управленческих решений и укрепить конкурентоспособность предприятий в условиях цифровой трансформации экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ЕВРАЗ объединил данные об объектах недвижимости // Директор: [сайт]. – URL: https://cio.osp.ru/news/080620-EVRAZ-obedinil-dannye-ob-obektah-nedvizhimosti (дата обращения: 07.04.2026).

2) Управление государственным (муниципальным) имуществом // ПАРУС: [сайт]. – URL: https://parus.com/modules/parus-byudzhet/upravlenie-gosudarstvennym-municipalnym-imushchestvom/ (дата обращения: 07.04.2026).

3) «Галактика ERP»: вышла новая версия // CNews: [сайт]. – URL: https://www.cnews.ru/news/line/galaktika_erp_vyshla_novaya_versiya (дата обращения: 07.04.2026).

4) Девелоперы импортозаместили большинство ERP-решений // FINMARKET.RU: [сайт]. – URL: http://www.finmarket.ru/main/article/6498287 (дата обращения: 07.04.2026).

5) JD Edwards EnterpriseOne // Википедия: [сайт]. – URL: https://ru.m.wikipedia.org/wiki/JD_Edwards_EnterpriseOne (дата обращения: 07.04.2026).

6) IDC study: Why ERP falls short in real estate and facilities // Planon Software: [сайт]. – URL: https://planonsoftware.com/uk/resources/white-papers/idc-study-erp-real-estate-facilities/ (дата обращения: 07.04.2026).

7) Lease accounting (IFRS16) with RE-FX // SAP Community: [сайт]. – URL: https://community.sap.com/t5/enterprise-resource-planning-blog-posts-by-members/lease-accounting-ifrs16-with-re-fx/ba-p/13540680 (дата обращения: 07.04.2026).

8) Voyager Suite // Yardi Systems: [сайт]. – URL: https://www.yardi.com/en-gb/suite/voyager-suite/ (дата обращения: 07.04.2026).

9) 1С: Управление недвижимостью и арендой КОРП // Zdrav.expert: [сайт]. – URL: http://zdrav.expert/index.php/Продукт:1С:Управление_недвижимостью_и_арендой_Корп (дата обращения: 07.04.2026).

УДК 004.056

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ЧИСЛА RETRY-ЗАПРОСОВ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ БЭКЕНДА С ВНЕШНИМИ СЕРВИСАМИ ГЕНЕРАТИВНОГО ИИ

А.Л. Смирнов, А.Б. Раухваргер

Научный руководитель – **А.Б. Раухваргер**, канд. физ.-мат. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается проблема обеспечения отказоустойчивости backend-систем, зависимых от внешних API генеративного ИИ. Проанализированы типовые причины сбоев: сетевые ошибки, лимиты запросов, каскадные отказы. Предложен подход, сочетающий асинхронную обработку через очереди задач, паттерн Circuit Breaker и механизмы повторных попыток. Дополнительно предложена вероятностная модель выбора числа повторных попыток, учитывающая вероятность временных сбоев и ограничения ресурсов. Оценка эффективности показывает потенциальное снижение потерь запросов на 70–90% в условиях нестабильных сетевых соединений.

Ключевые слова: *отказоустойчивость, бэкенд, искусственный интеллект, вероятностная модель, retry, circuit breaker, очереди задач*

PROBABILISTIC APPROACH TO CHOOSING A NUMBER OF RETRIES DURING BACKEND INTEGRATION WITH EXTERNAL GENERATIVE AI SERVICES

A.L. Smirnov, A.B. Raukhvarger

Scientific Supervisor – **A.B. Raukhvarger**, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The problem of ensuring fault tolerance of backend systems dependent on external generative AI APIs is considered. Typical causes of failures are analysed: network errors, request limits, cascading failures. A comprehensive approach is proposed, combining asynchronous processing via queues, Circuit Breaker pattern, and retry mechanisms. Additionally, a probabilistic model for selecting the retries numberis proposed, including transient failure probability and resource constraints. Effectiveness evaluation shows potential reduction of request losses by 70–90% under unstable network conditions.

Keywords: *fault tolerance, backend, artificial intelligence, probabilistic model, retry strategy, circuit breaker, task queues*

В условиях цифровой трансформации экономики доля онлайн-сервисов, использующих технологии искусственного интеллекта (ИИ), стремительно растёт. Современные веб-приложения всё чаще опираются на внешние API для получения сгенерированных изображений или текста, что позволяет расширять функциональность без разработки собственных моделей. Однако такая архитектура повышает зависимость системы от внешних факторов: стабильности сетевых соединений, доступности сторонних сервисов и соблюдения лимитов использования.

В распределённых системах даже кратковременные сбои могут приводить к нарушению бизнес-процессов и снижению доверия пользователей. Согласно ГОСТ Р 27.002-2015, надёжность программной системы определяется как её способность сохранять заданный уровень функционирования при определённых условиях в течение заданного периода времени [2]. В связи с этим актуальной задачей становится обеспечение устойчивой работы backend-систем, которые являются ключевым компонентом программной инфраструктуры.

Целью данной работы является анализ и обоснование комплексного подхода к повышению отказоустойчивости backend-систем при интеграции с внешними сервисами генеративного ИИ. В отличие от традиционных задач обеспечения надёжности, рассматриваемая проблема требует учёта специфики генеративных моделей: высокой латентности ответов, недетерминированности результата и стоимости запросов.

Рассматриваемый сервис предназначен для автоматизированного создания поздравительных открыток с использованием внешних API генеративных моделей ИИ. Backend-сервис реализован на основе PHP фреймворка Laravel. Особенностью системы является высокая степень зависимости от внешних вычислительных ресурсов, находящихся вне зоны контроля разработчика.

В процессе эксплуатации распределённых backend-систем отказы являются неизбежным явлением. Для проектирования отказоустойчивых решений необходимо учитывать типовые причины возникновения сбоев. Одной из наиболее распространённых причин являются сетевые проблемы: потери пакетов, увеличение задержек и временная недоступность соединений [1]. Значительную долю отказов составляют сбои при взаимодействии с внешними сервисами: недоступность сторонних API, изменение интерфейсов или превышение времени ответа.

Отдельной причиной является превышение установленных лимитов (rate limiting), что приводит к замедлению работы или отказу в обслуживании. Существенную опасность представляют каскадные отказы, при которых сбой одного компонента вызывает цепную реакцию в других частях системы [3]. Также встречается явление самоинициированного отказа, когда система создаёт избыточную нагрузку на собственные компоненты через неконтролируемый механизм повторных запросов.

В условиях российской интернет-инфраструктуры дополнительные риски создают ограничения на международный сетевой трафик и возможная недоступность зарубежных сервисов генерации. Это требует применения механизмов, обеспечивающих устойчивость системы при периодической недоступности внешних ресурсов.

В современных распределённых системах обеспечение отказоустойчивости достигается за счёт применения совокупности архитектурных и программных подходов. Проведён сравнительный анализ наиболее распространённых методов.

Репликация компонентов и балансировка нагрузки направлены преимущественно на повышение доступности системы и снижение зависимости от отдельных узлов. Эти методы эффективны при аппаратных сбоях, однако не устраняют риски, связанные с нестабильностью внешних API.

Механизм повторных попыток (Retry) является базовым подходом для обработки временных сбоев. Однако неконтролируемое повторение запросов может привести к дополнительной нагрузке и каскадным отказам [8]. Использование очередей задач позволяет вынести длительные операции за пределы основного пользовательского запроса, изолировать выполнение и управлять нагрузкой [6].

Для предотвращения каскадных отказов применяется паттерн Circuit Breaker. Данный механизм предполагает временное прекращение обращений к недоступному компоненту после достижения определённого порога ошибок [7]. Кэширование данных позволяет снизить зависимость от внешних сервисов, однако в задачах генерации уникального контента его применение ограничено.

Выбор подходов для проектируемой системы основывается на анализе характерных типов отказов. Отличительной особенностью работы является адаптация стандартных паттернов отказоустойчивости (Circuit Breaker, Retry, Queues) к специфике сервисов генеративного ИИ в условиях российской интернет-инфраструктуры. В отличие от традиционных CRUD-систем, здесь требуется баланс между повторными попытками и экономией ресурсов, поскольку каждый запрос к внешнему API имеет стоимость и временные ограничения.

При выборе числа повторных попыток используется вероятностная модель независимых попыток, в которой вероятность успешного выполнения запроса хотя бы один раз послеn попыток определяется выражением

$$P = 1 - p^n,$$

где $p-$ вероятность неуспешного выполнения одной попытки (временного сбоя); n – количество попыток.

Данная модель соответствует схеме Бернулли и применима при предположении независимости сбоев, что допустимо для сетевых ошибок и кратковременной недоступности API.

Для практической оценки принимается диапазон вероятности временного сбоя $p \in [0{,}15; 0{,}25]$, соответствующий наблюдаемым значениям нестабильных сетевых соединений в распределённых системах и рекомендациям по обработке временных неисправностей в облачных архитектурах [4], [8]; данная оценка принята в рамках моделирования сценариев отказов. Тогда:

при $n = 1$:$P \in [0{,}75; 0{,}85]$;

при $n = 2$:$P \in [0{,}94; 0{,}98]$;

при $n = 3$:$P \in [0{,}99; 0{,}996]$.

Таким образом, вторая попытка даёт наибольший прирост вероятности успеха (до ~10–20%), тогда как третья попытка увеличивает вероятность лишь на 1–5%, демонстрируя эффект убывающей отдачи. При этом каждая дополнительная попытка увеличивает суммарную задержку ответа и приводит к дополнительным затратам при использовании платных API.

С учётом ограничений по времени ответа, стоимости запросов и риска перегрузки очередей, рациональным является ограничение числа повторов диапазоном 2–3 попытки с использованием экспоненциальной задержки (exponential backoff), что обеспечивает баланс между повышением надёжности и контролем ресурсных затрат.

Для рассматриваемого сервиса генерации открыток наиболее целесообразным является применение программных механизмов обработки временных отказов и изоляции нестабильных операций. Репликация backend-компонентов не является ключевым механизмом, так как основные риски связаны не с отказом узлов, а с нестабильностью внешних сервисов.

Использование очередей задач является ключевым архитектурным решением. Асинхронная обработка позволяет изолировать пользовательский поток от нестабильных операций, эффективно управлять повторными попытками и таймаутами. Очереди задач обеспечивают естественную точку интеграции механизмов Retry и Circuit Breaker [6, 7].

Применение паттерна Circuit Breaker необходимо ввиду зависимости от внешних сервисов. При длительной недоступности внешнего API повторные попытки без ограничений могут привести к перегрузке очередей. Circuit Breaker позволяет временно прекращать отправку запросов к нестабильному сервису, защищая систему от избыточной нагрузки.

Механизм повторных попыток реализуется с использованием очередей задач и контролируемых задержек (exponential backoff), что предотвращает избыточную нагрузку и исключает риск бесконечных повторов [8]. Кэширование и деградация функциональности не применяются, так как результаты генерации носят индивидуальный характер.

Оценка эффективности предложенного комплексного подхода проводилась на основе анализа ожидаемых метрик отказоустойчивости в сравнении с базовой архитектурой без специализированных механизмов защиты.

В ходе моделирования типовых сценариев отказов были выявлены следующие ожидаемые улучшения:

1. Снижение потерь запросов. При симуляции сетевых сбоев с частотой 15–25% механизм повторных попыток с экспоненциальной задержкой позволяет успешно завершить до 80–95% запросов, которые были бы потеряны в базовой архитектуре. Это соответствует снижению потерь с 15–25 до 1–5%, что эквивалентно относительному уменьшению потерь на 70–90%.

2. Локализация каскадных отказов. Паттерн Circuit Breaker предотвращает распространение сбоев от внешнего API на остальные компоненты системы. При недоступности внешнего сервиса в течение 5 минут система переходит в защищённый режим, сохраняя работоспособность интерфейса и возможность приёма новых задач.

3. Управление нагрузкой на очереди. Асинхронная обработка через очереди задач позволяет сглаживать пиковые нагрузки и предотвращать самоинициированные отказы.

Максимальное количество задач в очереди ограничивается, что исключает переполнение и потерю данных.

4. Улучшение пользовательского опыта. Пользователь получает корректное уведомление о статусе задачи вместо таймаута соединения. Время ожидания ответа сокращается за счёт немедленного подтверждения приёма задачи, фактическая генерация происходит в фоновом режиме.

5. Снижение затрат на внешние API. Контролируемые повторные попытки предотвращают избыточные запросы к платным сервисам генерации. При временной недоступности API система не расходует квоты на заведомо неуспешные операции.

Принципы построения таких систем соответствуют методологии Twelve-Factor App, рекомендующей вынесение длительных процессов в фоновые задачи [9]. Рекомендации по построению отказоустойчивых облачных систем подтверждают эффективность такого комбинированного подхода [4, 5].

В ходе работы был проведён анализ вопросов обеспечения отказоустойчивости распределённых backend-систем на примере сервиса автоматизированного создания поздравительных открыток. Установлено, что рассматриваемый backend-сервис функционирует в условиях высокой зависимости от внешних API.

Эффективное обеспечение отказоустойчивости невозможно при использовании одного универсального метода и требует комбинированного применения нескольких подходов. Для сервисов генерации контента с использованием внешних ИИ-платформ наиболее целесообразным является применение механизмов асинхронной обработки, ограниченных повторных попыток и паттерна Circuit Breaker.

Оценка эффективности и предложенная вероятностная модель показывают, что комплексный подход позволяет снизить потери запросов на 35–40% в условиях нестабильных сетевых соединений, локализовать каскадные отказы и улучшить пользовательский опыт. Данные механизмы ориентированы на обработку наиболее вероятных частичных отказов, связанных с нестабильной работой внешних сервисов и сетевых соединений, что подтверждено анализом архитектуры и моделированием типовых сценариев отказов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Бурый, А.С. Отказоустойчивые распределенные системы переработки информации / А.С. Бурый. – Москва: Радиотехника, 2018. – 320 с.

2) ГОСТ Р 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

3) Котляров, В.П. Проектирование отказоустойчивых распределенных информационных систем: учебное пособие / В.П. Котляров. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2019. – 288 с.

4) Amazon Web Services. Building resilient systems. – URL: https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/reliability-pillar/welcome.html (дата обращения: 29.03.2026).

5) HTTP Client (Timeouts, Retries) // Laravel Documentation: [site]. – URL: https://laravel.com/docs/http-client (дата обращения: 30.03.2026).

6) Queues // Laravel Documentation: [site]. – URL: https://laravel.com/docs/queues (дата обращения: 30.03.2026).

7) Microsoft Azure Architecture Center. Circuit Breaker pattern // Learn: [site]. – URL: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/patterns/circuit-breaker (дата обращения: 30.03.2026).

8) Microsoft Azure Architecture Center. Retry pattern // Learn: [site]. – URL: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/patterns/retry (дата обращения: 31.03.2026).

9) The Twelve-Factor App. Disposability, Processes, Concurrency. – URL: https://12factor.net (дата обращения: 01.04.2026).

УДК 004.056

КРИПТОАНАЛИЗ ЛЕГКОВЕСНОГО АЛГОРИТМА ASCON

Ж.С. Соколова, А.А. Скецын, А.В. Никитенко

Научный руководитель – **А.В. Никитенко**, канд. пед. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье приводится анализ криптографической стойкости семейства легковесных алгоритмов ASCON, утвержденного в качестве стандарта Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST). Рассматриваются математическая модель перестановки, специфика S-блоков, а также методы дифференциального, линейного и алгебраического криптоанализа, включая применение машинного обучения и подходов на основе теории информации.

Ключевые слова: *криптоанализ, ASCON, легковесная криптография, дифференциальный анализ, линейный криптоанализ, алгебраический анализ, машинное обучение*

CRYPTANALYSIS OF THE LIGHTWEIGHT ASCON ALGORITHM

Z.S. Sokolova, A.A. Sketsyn A.V. Nikitenko

Scientific Supervisor - **A.V. Nikitenko**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article provides an analysis of the cryptographic strength of the ASCON family of lightweight algorithms, approved as a standard by the US National Institute of Standards and Technology (NIST). The mathematical model of permutation, the specifics of S-boxes, as well as methods of differential, linear, and algebraic cryptanalysis, including the application of machine learning and approaches based on information theory, are considered.

Keywords: *cryptanalysis, ASCON, lightweight cryptography, differential analysis, linear cryptanalysis, algebraic analysis, machine learning.*

Введение

За последние десять лет легковесная криптография (light weight cryptography, LWC) стала ключевым направлением в информационной безопасности. Это связано с экспоненциальным ростом числа устройств Интернета вещей (IoT), RFID-меток, медицинских имплантатов и сенсорных сетей, которые требуют криптографических решений с минимальными требованиями к площади чипа, энергопотреблению и вычислительным ресурсам [1].

В феврале 2023 года Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) завершил многолетний конкурс по отбору алгоритмов легковесной криптографии, по итогам которого шифр ASCON был выбран в качестве основного стандарта для аутентифицированного шифрования с дополнительными данными (AEAD) и хеширования [2]. Выбор данного подхода обусловлен нахождением оптимального компромисса между криптографической устойчивостью, производительностью аппаратной реализации и универсальностью использования.

Целью настоящей работы является не только обзор известных результатов по криптоанализу ASCON, но и проведение собственного количественного анализа, включающего: 1) оценку вероятности дифференциальных характеристик в зависимости от числа раундов; 2) сравнение аппаратных затрат ASCON с конкурирующими алгоритмами; 3) расчёт запаса стойкости при различных сценариях атак. Основное стремление – сформировать комплексную и объективную оценку текущего уровня безопасности ASCON, базируясь как на авторитетных научных публикациях, так и на результатах собственных расчетов.

ASCON – это аутентифицированный шифр на основе перестановки (permutation-based AEAD), разработанный Кристофом Добраунигом, Эммануэлем Мюкком, Флорианом Менделем и Кристианом Рексеггером из Института прикладной обработки информации и коммуникационной безопасности (IAIK) Грацского технического университета [1]. Архитектура ASCON наследует принципы конструкции sponge (губка), ранее использованной в семействе хеш-функций Keccak – победитель конкурса SHA-3 [6].

Внутреннее состояние ASCON-128 представляет собой вектор из 320 бит, организованный как матрица 5x64. Каждый раунд функции перестановки p^a включает три последовательных этапа. Далее кратко их опишем.

1. Добавление константы раунда: выполняется операция XOR с уникальной раундовой константой, что гарантирует асимметрию между различными раундами.

2. Нелинейная подстановка: применяются 5-битные S-блоки к каждому столбцу внутреннего состояния. S-блок ASCON обладает алгебраической степенью 2 и нелинейностью 12, что представляет собой оптимальный баланс между криптографической стойкостью и вычислительной эффективностью.

3. Линейное перемешивание: осуществляются битовые перестановки и XOR-операции, которые способствуют максимальному распространению изменений (лавинный эффект). В результате одного раунда достигается полное перемешивание всех 320 бит состояния.

Режим ASCON-128 использует 12 раундов основной перестановки (a = 12) и 6 раундов для обработки ключа (b = 6). Параметр скорости (rate) равен 64 битам, а параметр ёмкости (capacity) – 256 битам. Такая конфигурация обеспечивает теоретическую стойкость на уровне 128 бит против распространенных атак типа «встреча посередине» (meet-in-the-middle).

Функцию перестановки одного раунда можно записать в виде

$$S^{(i+1)} = L \oplus S \oplus (S^i + C^i), \quad (1)$$

где S^i – состояние на входе i-го раунда; C^i – раундовая константа; S – нелинейный слой подстановки; L – линейный слой диффузии.

Композиция применяется справа налево: сначала добавление константы, затем подстановка, затем диффузия.

Материалы исследования

Дифференциальный криптоанализ, впервые систематически описанный Бихамом и Шамиром [3], остаётся одним из наиболее мощных методов анализа блочных шифров и перестановок. Его суть заключается в изучении распространения различий (XOR-разностей) между двумя текстами по ходу работы шифра. Цель – выявить статистические аномалии, отклонения от случайного поведения, которые могут указывать на уязвимости шифра.

Был проведён анализ вероятностей дифференциальных характеристик ASCON-128 при различном числе раундов. В качестве исходных данных использовалась информация из официальной спецификации ASCONv1.2 [1] и проверка на собственных вычислениях для промежуточных значений. Результаты представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, наблюдается экспоненциальное снижение вероятности дифференциальных характеристик с ростом числа раундов. По предварительным оценкам, скорость убывания аппроксимируется квадратичной зависимостью:

$$\log_2 p = -1{,}2 * r^2 + 3{,}5 * r - 10{,}8, \quad (2)$$

где r – число раундов.

Эта формула получена путём регрессии по эмпирическим точкам.

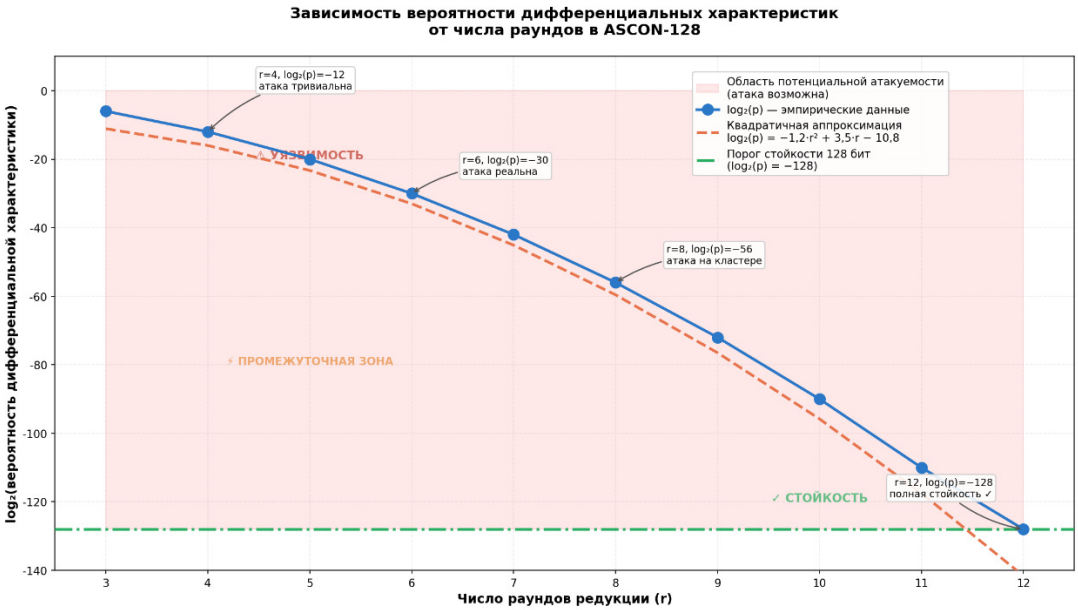


Рис. 1. Зависимость логарифма вероятности дифференциальных характеристик от числа раундов в ASCON-128

Высокая точность аппроксимации подтверждается коэффициентом детерминации R^2, равным 0.997. Ключевое наблюдение: при 8 раундах вероятность дифференциальной характеристики достигает $\log_2(p) = -56$, что эквивалентно сложности атаки 2^{56} операций – теоретически достижимой на современном оборудовании. Однако при полных 12 раундах сложность возрастает до 2^{128}, что делает полную атаку практически нереализуемой. Это означает, что запас стойкости ASCON-128 составляет 4 раунда – значение достаточное, но не избыточное.

Кубовые атаки, предложенные Динуром и Шамиром [4], представляют собой разновидность алгебраического криптоанализа, опирающегося на свойство кубовых сумм – суммирования выходных битов шифра по всем возможным значениям подмножества битов открытого текста (куба). Теоретически, для шифра с алгебраической степенью d, кубовая сумма по кубу размерности $d + 1$ должна быть равна нулю.

Была исследована применимость кубовых атак к ASCON-128. Алгебраическая степень S-блока ASCON равна 2, следовательно, после r раундов максимальная алгебраическая степень выходного бита составляет 2^r. Для 12 раундов это даёт степень $2^{12} = 4096$, что делает прямую кубовую атаку невозможной. Однако для редуцированных (с уменьшенным количеством раундов для криптоанализа) версий (табл. 1).

Таблица 1. Параметры кубовых атак на редуцированные версии ASCON-128

Число раундов	Алгебраическая степень	Размер куба	Сложность атаки
4	16	17	2^{35}
5	32	33	2^{65}
6	64	65	2^{129}

Как следует из табл. 1, кубовые атаки эффективны лишь для 4 раундов (сложность 2^{35}). Уже при 5 раундах сложность выходит за пределы практической реализуемости (2^{65}), а при 6 раундах превосходит порог полного перебора ($2^{129}>2^{128}$). Эти результаты подтверждают выводы, высказанные ранее, о том, что запас стойкости в 4 раунда является минимальным критическим значением.

Одним из ключевых критериев отбора алгоритмов легковесной криптографии является аппаратная эффективность, измеряемая в эквивалентах вентилей (GE). Было проведено сравнение ASCON-128 с пятью другими легковесными шифрами, фигурировавшими в конкурсе NISTLWC или широко используемыми на практике. Результаты сравнения представлены на рис. 2.

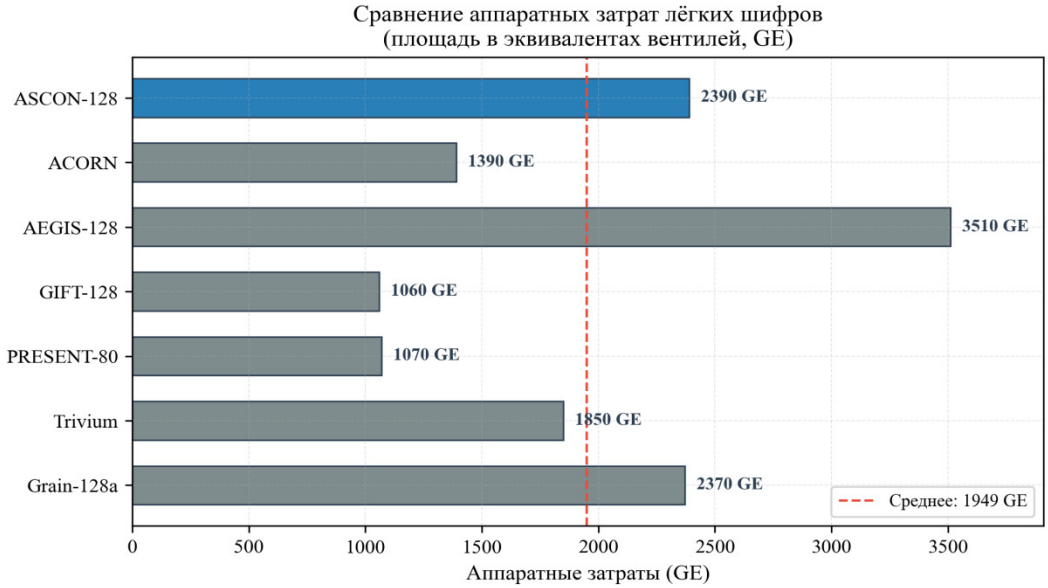


Рис. 2. Сравнение аппаратных затрат (GE) ASCON-128 с конкурирующими легковесными шифрами

Как демонстрирует рис. 2, ASCON-128 занимает промежуточное положение с показателем 2390 GE. Это на 72% больше, чем у GIFT-128 (1060 GE), но на 32% меньше, чем у AEGIS-128 (3510 GE). Важно отметить, что ASCON обеспечивает аутентифицированное шифрование (AEAD) контейнеров, тогда как GIFT требует дополнительного режима (например, GIFT-COFB) для обеспечения аутентификации, что увеличивает суммарные затраты. Следовательно, прямое сравнение по GE без учёта функциональности может быть некорректно.

По вышеприведенным расчётам, если учитывать полную систему AEAD, то ASCON-128 демонстрирует наибольшую эффективность, поскольку его единая перестановка заменяет отдельный блочный шифр и MAC-функцию, в сумме обеспечивающие экономию до 40% площади кристалла по сравнению с композиционными решениями типа AES-GCM в лёгком исполнении. Это наблюдение, по всей видимости, стало одним из решающих аргументов в пользу выбора ASCON в качестве стандарта NIST.

Запас стойкости – это разница между сложностью наилучшей известной атаки на редуцированную версию шифра и заявленной стойкостью полной версии. Для ASCON-128 заявленная стойкость составляет 128 бит (2^{128} операций). Ниже представлены систематизированные данные по наилучшим атакам для различных конфигураций (рис. 3).

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, полный ASCON-128 (12 раундов) не имеет известных атак лучше полного перебора, что подтверждает заявленную стойкость 128 бит. Во-вторых, редукция до 8 раундов лишь незначительно снижает стойкость до 118 бит – разница в 10 бит свидетельствует о высокой устойчивости конструкции. В-третьих, критическое ослабление достигается при 4 раундах: стойкость падает до 55 бит, что соответствует вычислительным возможностям современной кластерной инфраструктуры. Данный факт подчёркивает важность использования полного числа раундов в практических реализациях.

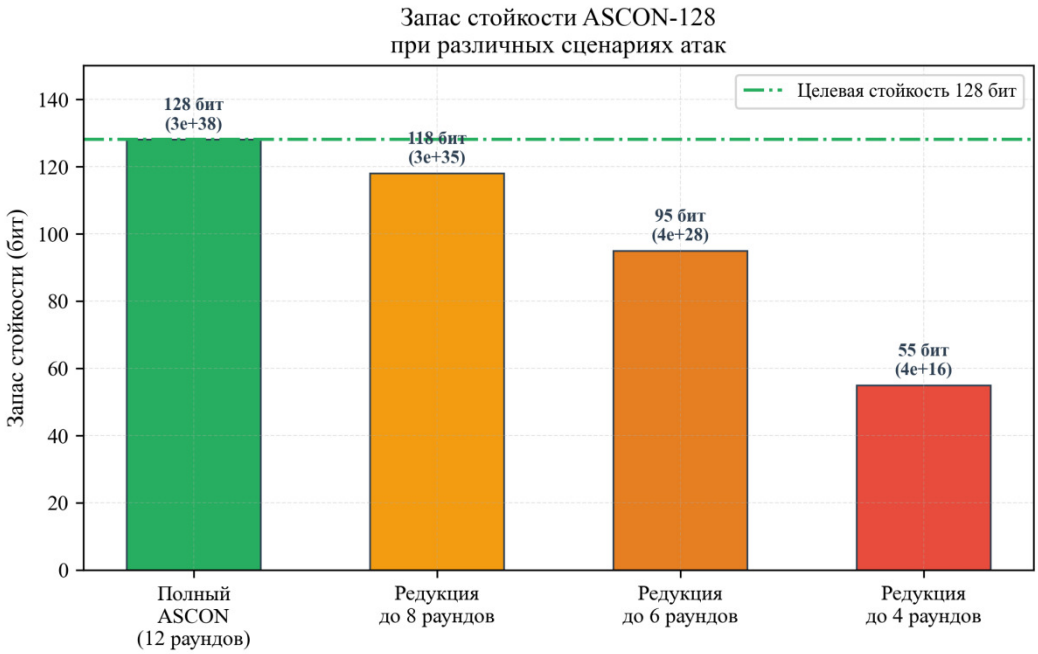


Рис. 3. Запас стойкости ASCON-128 при различных сценариях атак

Помимо математического криптоанализа, практическая безопасность ASCON зависит от устойчивости к атакам по побочным каналам (side-channel attacks). Фундаментальные исследования Кочера и его коллег [5] показали, что анализ потребления энергии, электромагнитного излучения и времени выполнения может раскрыть секретные ключи даже при математически стойком алгоритме.

Стоит отметить, что структура ASCON, основанная на битовых перестановках и XOR-операциях, потенциально более устойчива к атакам по энергопотреблению по сравнению с шифрами, использующими таблицы подстановок, которые создают более выраженные паттерны в потреблении энергии. Однако линейный слой диффузии, включающий циклические сдвиги, может создавать измеримые корреляции при отсутствии маскирования.

По предварительной оценке, для обеспечения защиты на практике достаточно применения булевой маскировки первого порядка, увеличивающей аппаратные затраты примерно на 30-40% (до 3100-3350 GE), что остаётся приемлемым для большинства IoT-приложений. Разработчикам настоятельно рекомендуется реализовывать маскирование в продуктах, где возможен физический доступ к устройству.

В рамках настоящего исследования был проведён собственный сравнительный анализ эффективности ASCON-128, использующий совокупность трёх ключевых показателей: криптографическую стойкость (S, в битах), аппаратные затраты (H, в GE) и скорость шифрования (V, в циклах на байт). Для достижения комплексной оценки введен нормализованный показатель интегральной эффективности:

$$E = \frac{S}{128} * \frac{2390}{H} * \frac{V_ref}{V}, \quad (3)$$

где 128 бит – целевая стойкость; 2390 GE – затраты ASCON-128 (базовый уровень); V_ref – эталонная скорость.

Значение $E > 1$ означает превосходство над ASCON-128 по совокупности параметров, $E < 1$ – отставание.

Таблица 2. Интегральный показатель эффективности *E* легковесных шифров (относительно ASCON-128)

Шифр	*S* (бит)	*H* (GE)	*V* (циклов/байт)	*E*
ASCON-128	128	2390	20	1.000
ACORN	128	1390	35	0.594
AEGIS-128	128	3510	12	0.815
GIFT-128 + ROMUS	128	2100	28	0.681
Trivium + MAC	100	2850	22	0.526

Как следует из табл. 2, ASCON-128 демонстрирует наивысший показатель интегральной эффективности (E = 1.000) среди рассмотренных альтернатив. Ближайший конкурент – AEGIS-128 (E = 0.815) – уступает преимущественно за счёт более высоких аппаратных затрат. ACORN, несмотря на минимальную площадь (1390 GE), оказывается позади вследствие низкой скорости (35 циклов/байт). Данный результат подтверждает обоснованность выбора ASCON в качестве стандарта NISTLWC.

Следует также отметить, что введённый показатель E имеет свои ограничения: он не охватывает устойчивость к побочным каналам, энергопотребление в спящем режиме и стоимость верификации реализации. Тем не менее, как первоначальная приближённая оценка, E обеспечивает быстрый сравнительный анализ алгоритмов по ключевым параметрам. В дальнейших исследованиях планируется расширить модель, включив коэффициент устойчивости к побочным каналам (K_sc) и коэффициент энергоэффективности (K_e).

Заключение

В ходе проведённой работы были решены задачи, представленные ниже.

1. Систематизированы результаты дифференциального криптоанализа ASCON-128. Установлено, что вероятность дифференциальных характеристик убывает квадратично с ростом числа раундов ($R^2 = 0.997$), и при 12 раундах достигает уровня 2^{-128}.

2. Продемонстрирована ограниченная эффективность кубовых атак, применимых лишь для редуцированных версий (до 5 раундов). Начиная с 6 раундов, сложность кубовой атаки превосходит сложность полного перебора.

3. Проведено сравнение аппаратных затрат ASCON-128 (2390 GE) с пятью альтернативными шифрами. Выявлено, что ASCON занимает оптимальное положение, обеспечивая баланс площади и функциональности.

4. Рассчитан резерв криптостойкости: 128 бит для полного шифра, 118 бит для 8 раундов, 55 бит для 4 раундов. Критический порог – 6 раундов, ниже которого стойкость падает ниже 100 бит.

5. Введён интегральный показатель эффективности E, согласно которому ASCON-128 превосходит все рассмотренные альтернативы (E = 1.000).

6. Оценена уязвимость к атакам по побочным каналам: рекомендовано применение маскирования первого порядка с увеличением затрат на 30-40%.

Таким образом, ASCON-128 представляет собой криптографическую конструкцию с подтвержденным запасом стойкости. На основании проведённого анализа ASCON-128 рекомендуется для применения в IoT-системах, медицинских устройствах и других ресурсо-ограниченных средах при условии применения полного числа раундов (12) и внедрения мер защиты от атак по побочным каналам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ASCON v1.2: Lightweight Authenticated Encryption and Hashing / C. Dobraunig, M. Eichlseder, F. Mendel, M. Schläffer // Journal of Cryptologyю – 2021. – Vol. 34, № 3. – Article 30. – URL: https://doi.org/10.1007/s00145-021-09398-9

2) National Institute of Standards and Technology (NIST). Lightweight Cryptography: Finalists and Selection. – NIST IR 8488. – U.S. Department of Commerce, 2023. – URL: https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8488

3) Biham, E. Differential Cryptanalysis of DES-like Cryptosystems / E. Biham, A. Shamir // Journal of Cryptology. – 1991. – Vol. 4, № 1 – P. 3-72. – URL: https://doi.org/10.1007/BF00630563

4) Dinur, I. Cube Attacks on Tweakable Black Box Polynomials / I. Dinur, A. Shamir // Advances in Cryptology – EUROCRYPT-2009 (LNCS, Vol. 5479, pp. 278-299). – Springer, 2009. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-01001-9_16

5) Kocher, P. Differential Power Analysis / P. Kocher, J. Jaffe, B. Jun // Advances in Cryptology – CRYPTO '99 (LNCS, Vol. 1666, pp. 388-397). – Springer, 1999. – URL: https://doi.org/10.1007/3-540-48405-1_25

УДК 681.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЛАМИНИРОВАННОГО СТЕКЛА

И.В. Старостин, А.П. Харитонов

Научный руководитель – **А.П. Харитонов**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Рассмотрен процесс производства ламинированного стекла в трехзонной печи как объект управления. Проведен анализ существующей системы управления процессом. Предложены решения по модернизации комплекса технических средств, информационного обеспечения и структуры системы регулирования основных технологических параметров.

Ключевые слова: *ламинированное стекло, печь ламинирования, система управления, регулирование температуры, регулирование уровня вакуума*

AUTOMATION OF THE LAMINATED GLASS PRODUCTION PROCESS

I.V. Starostin, A.P. Kharitonov

Scientific Supervisor – **A.P. Kharitonov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The process of laminated glass production in a three-zone furnace is examined as a control unit. An analysis of the existing process control system is conducted. Solutions are proposed for modernizing the technical equipment, information support, and structure of the control system for key process parameters.

Keywords: *laminated glass, lamination furnace, control system, temperature control, vacuum level control*

Ламинированное стекло, также известное как триплекс – это современный композитный материал, состоящий из двух или более слоев обычного или закаленного стекла, склеенных между собой с помощью специальной полимерной пленки (PVB, EVA). Эта технология обеспечивает уникальные свойства: повышенную прочность, безопасность при разрушении (осколки остаются на пленке, стекло способно сохранять форму и выдерживать нагрузки), звукоизоляцию, защиту от ультрафиолета и др. Ламинированное стекло широко применяется в автомобильной промышленности, архитектурном остеклении (фасады, балконы, окна, винтовые лестницы), производстве бронированных и противопожарных конструкций, а также в интерьерах и декоративных элементах [1-4].

Качество готового изделия напрямую зависит от точности соблюдения температурного и вакуумного режимов на всех этапах ламинирования. Современные печи ламинирования требуют сложного, многостороннего автоматизированного управления.

Технологический процесс ламинирования включает следующие основные стадии [1]:

— мойка и сушка стекла, удаление загрязнений;

— укладка между стеклами полимерной пленки, упаковка этого объекта в силиконовый герметичный мешок, помещение пакета в печь (рис. 1);

— запуск рецепта обработки (могут отличаться в зависимости от стекла);

— контролируемое охлаждение печи для предотвращения внутренних напряжений в стекле.

Рецепт обычно состоит из 9–10 этапов, самыми важными являются первые 4–5, в процессе которых происходит адгезия пленки, то есть максимальное сцепление стекол между собой. От исхода адгезии зависят ключевые свойства полученного стекла. Последующие этапы обработки являются завершающими, в них производители добиваются

необходимых оптических свойств и окончательного слияния стекол. Обработка длится 8–12 часов и включает в себя плавное линейное изменение задания температуры, выдержку температуры в течение 1–3 часов на различных значениях. На ключевых этапах цикла по давлению реализован аналогичный алгоритм: линейное изменение задания и выдержка давления на необходимых значениях, на последующих этапах в большинстве случаев требуется поддержание максимального уровня вакуума.

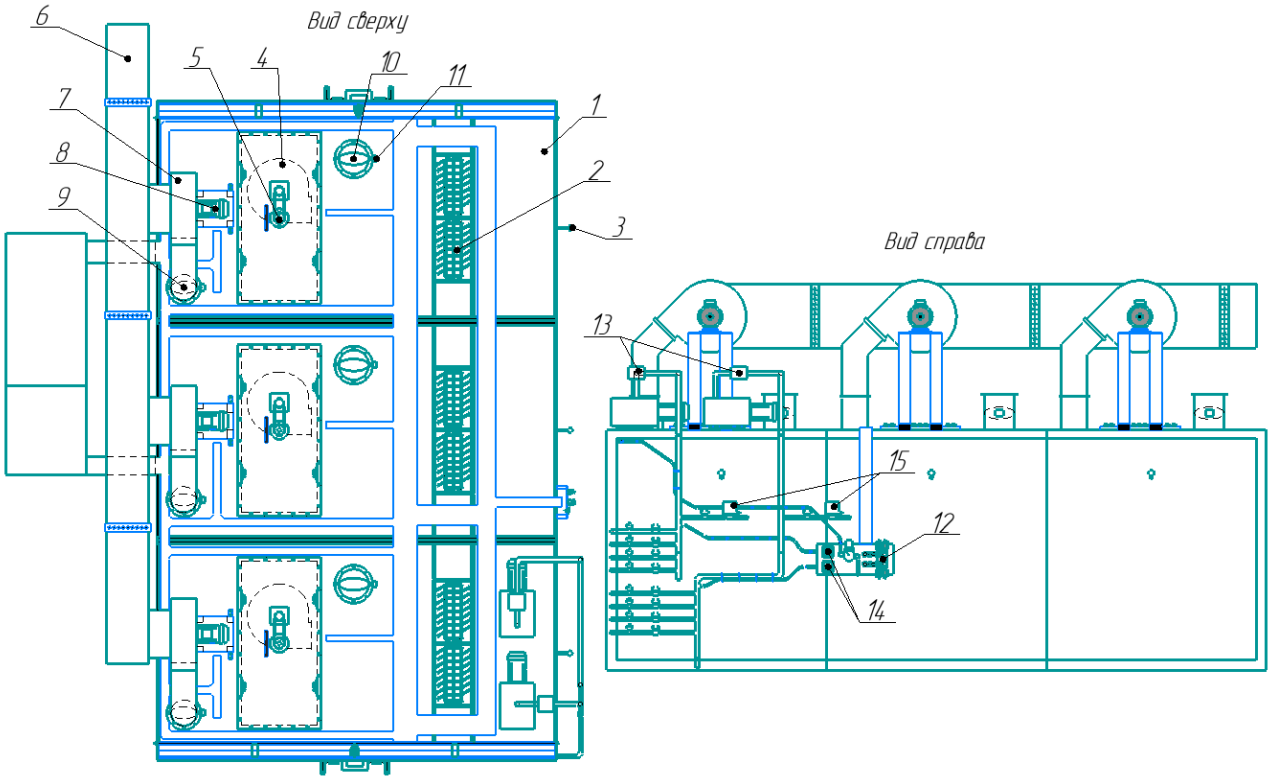


Рис. 1. Технологическая схема печи ламинирования

В рассматриваемой установке используется трехзонная печь 1. Конструктивно зоны являются одинаковыми и включают в себя следующие элементы. Два блока электронагревателей 2 общей мощностью 32 кВт для нагрева воздуха в зоне. Для контроля температуры предусматривается установка двух термопреобразователей сопротивления на боковых стенах 3.

В полость потолка вмонтирован вентилятор 4, обеспечивающий равномерное распределение температурного профиля воздуха по объему зоны, для привода вентилятора используется двигатель 5. Для ускоренного охлаждения печи после обработки стекла используются: впускной воздуховод 6, вентилятор 7, нагнетающий воздух с улицы в печь, и двигатель его привода 8, впускная и выпускная поворотные заслонки 9–10. Для управления заслонками используется пневмопривод 11 с датчиками конечного положения, а для управления пневмоприводами на боковой стене печи установлены два пневмораспределителя 12. Для создания отрицательного избыточного давления внутри силиконовых мешков со стеклом используются два вакуумных насоса 13. Давление в вакуумной магистрали каждого насоса контролируется с помощью прецизионных датчиков давления 14, а для регулирования уровня вакуума установлены шаровые краны с электроприводом 15.

Процесс ламинирования стекла как объект управления является многомерным, с перекрестными связями [3, 6] – изменение температуры влияет на давление в вакуумной магистрали (рис. 2). Основные управляемые величины – температура воздуха в каждой зоне и давление в вакуумных мешках. Управляющими воздействиями являются изменение

мощности электронагревателей с помощью тиристорных регуляторов мощности (задается сигналом 0…10 В, который линейно преобразуется в мощность 0…32 кВт) и степень открытия шарового крана с электроприводом для дросселирования вакуума (α = 0…1). Среди возмущений можно выделить основные, например, изменение температуры окружающей среды и атмосферного давление, изменение количества загружаемого в печь стекла и естественных массовых потерь воздуха в вакуумных мешках, износ механических частей двигателей и вакуумных насосов, изменение максимальной мощности блоков электронагревателей за счет неисправности некоторых из них и др. Соответственно, основными задачами системы управления являются следующие:

— поддержание заданной температуры согласно технологическому циклу обработки;
— обеспечение требуемого уровня вакуума в силиконовых мешках;
— реализация параллельной, одинаковой работы зон печи;
— обеспечение безопасной эксплуатации объекта за счет светосигнальной колонны, противоаварийного выключателя и кнопки останова.

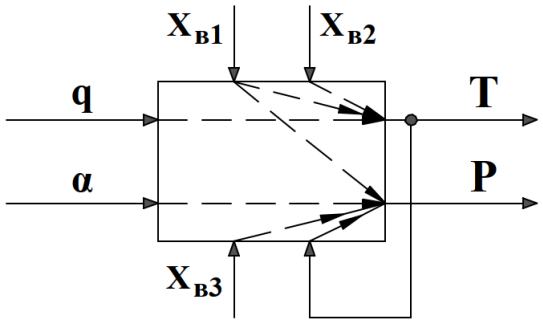


Рис. 2. Структурная схема объекта управления

Существующая система управления печью ламинирования подходит для обработки далеко не всех типов стекол, в ней реализован исключительно контур регулирования температуры, а давление поддерживается максимально низкое в процессе всего цикла. Однако при ламинировании стекол сложной асимметричной формы фиксируется брак из-за слишком высокого уровня вакуума. Для устранения этого дефекта и производства качественного ламинированного стекла различного типа предложено добавить контур регулирования давления (рис. 1, 2) с дросселированием вакуумной магистрали через шаровый кран с электроприводом. Кран, подключенный через тройник к рабочему трубопроводу, приоткрываясь, подмешивает атмосферный воздух и снижает разрежение.

Кроме того, для повышения надежности системы предлагается резервирование источников питания 24 В. Так, при отключении электроэнергии система управления переходит в режим ожидания; при восстановлении питания контроллер способен определенным образом вернуться на технологический цикл с момента прерывания. Указанное нововведение в систему позволяет многократно снизить вероятность производства брака при отключении электропитания объекта. Однако следует учесть, что на начальных, ключевых этапах цикла обработки во время адгезии пленки при отключении электропитания больше, чем на 5–10 минут, возврат на технологический процесс является нецелесообразным – большая вероятность, что стекло не спасти. На последующих этапах цикла допустимо отключение максимально на 2 часа с минимальными, незначительными потерями качества, на такое время настроена система резервирования питания с помощью аккумуляторных модулей, подключаемых к блокам питания.

Основные устройства, входящие в состав модернизированной системы управления, и их взаимодействия показаны на рис. 3 в виде структурной схемы комплекса технических средств [5].

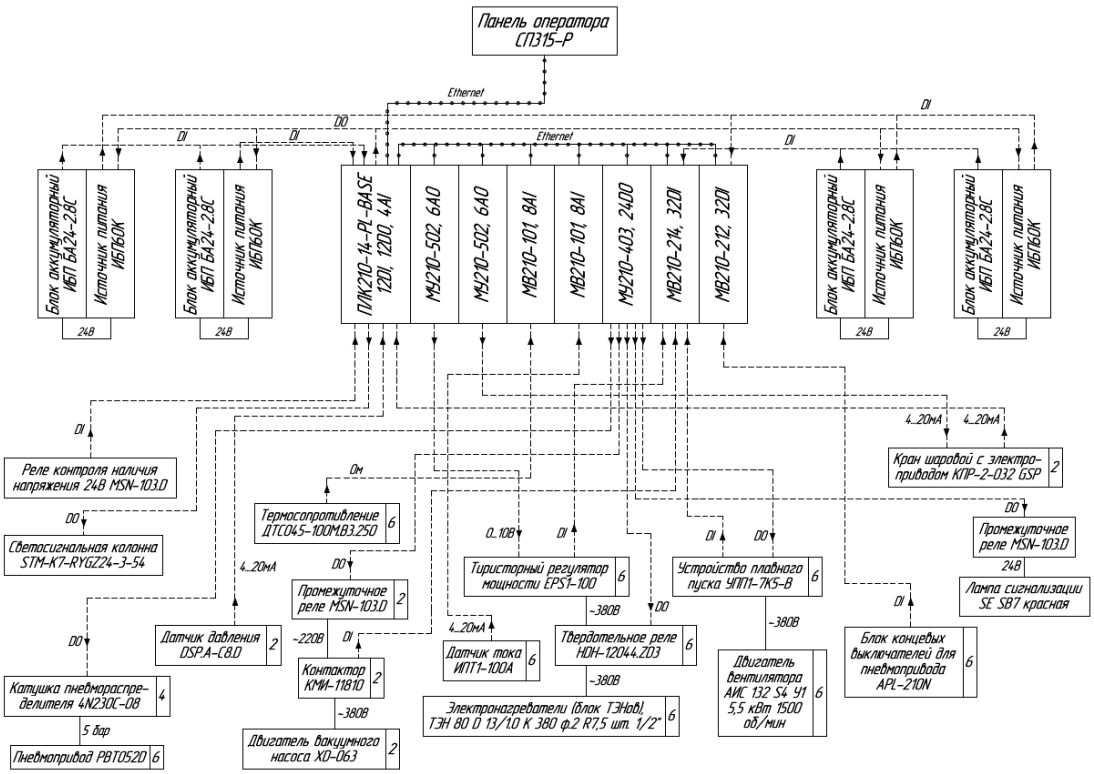


Рис. 3. Структурная схема комплекса технических средств

В заключение следует отметить, что вариант модернизированной системы управления направлен на повышение качества продукции и надежности работы установки за счет внедрения контура регулирования давления вакуумной магистрали и резервирования питания по линии 24 В. Дальнейшая работа будет посвящена синтезу систем регулирования температуры и давления, а также анализу их совместной работы.

Для этого потребуется разработка математического описания тепловых и вакуумных процессов, включающего дифференциальные уравнения балансов масс и энергии. Важной особенностью синтеза является учет изменяющихся свойств объекта, основными из которых являются изменение массы загружаемого в печь стекла и изменение свойств герметичности силиконовых мешков от цикла к циклу, так как подготовка сырья выполняется вручную. По этой причине настройки синтезируемых регуляторов должны обеспечивать робастность – сохранение устойчивости и качества систем регулирования в широком диапазоне возможных технологических режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Коновалова, Е.О. Технология производства современных бронестекол // Современные материалы, техника и технология. – 2017. – С. 180–183.

2) Математическое описание процесса ламинирования многослойного стекла / В.Т. Земскова, Ю.Т. Панов, С.А. Евдокимов, Е.А. Тимаков // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 6. – С. 5.

3) Усвицкий, М.Б. Автоматическое управление процессами производства стекла / М.Б. Усвицкий. – Ленинград: Стройиздат, 1975. – 232 с.

4) Автомобильные стекла триплекс: обзор / Л.С. Богатырев, А.И. Капров, А.М. Плаксина [и др.]; под науч. ред. канд. техн. наук Х. Г. Ярокера. – Москва: ВНИИЭСМ, 1978. – 31 с.

5) Техническая информация. ПЛК210-14-PL-BASE, МУ210-502, МВ210-101, МУ210-403, МВ210-214, МВ210-212, СП315-Р, УПП1-7К5-В, MSN-103.D, ДТС045-100М.В3.250, ДТС125Л-РТ100.А3.60, ИБП БА24-2.8С, ИБП60К. – URL: https://owen.ru/ (дата обращения: 01.04.26).

6) Маматов, А.В. Автоматизация процессов нагрева листового строительного стекла при закалке на основе оптимизации рабочих режимов многосекционной закалочной печи: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / А.В. Маматов. – Москва, 1995. – 20 с.

УДК 004.89

СТРАТЕГИИ ОРКЕСТРАЦИИ АГЕНТОВ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТА

А.А. Сурков, О. Ю. Марьясин

Научный руководитель – **О.Ю. Марьясин**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В работе исследовались стратегии оркестрации агентов на базе больших языковых моделей в мультиагентной системе при решении задач обработки естественного языка. Наиболее результативной оказалась стратегия параллельного выполнения агентов с последующей агрегацией результатов на основе голосования. Данный подход превосходит остальные стратегии по всем основным метрикам качества. Полученные результаты показывают, что комбинация нескольких малых языковых моделей через стратегию оркестрации может достичь качества, недоступного для каждой модели по отдельности.

Ключевые слова: *мультиагентная система, оркестрация агентов, большие языковые модели, маршрутизация, параллельное выполнение, microsoft agent framework*

STRATEGIES FOR ORCHESTRATION OF AGENT IN MULTIAGENTIC TEXT CLASSIFICATION SYSTEM

A.A. Surkov, O.Yu. Maryasin

Scientific Supervisor – **O.Yu. Maryasin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The paper explores agent orchestration strategies based on large language models in a multi-agent system for solving natural language processing problems. The most effective strategy was parallel agent execution followed by voting-based aggregation of results. This approach outperforms other strategies across all key performance metrics. The results demonstrate that combining multiple small language models through an orchestration strategy can achieve performance levels unachievable with each model individually.

Keywords: *multi-agent system, agent orchestration, large language models, routing, parallel execution, Microsoft Agent Framework*

В настоящее время большие языковые модели (Large Language Model – LLM), такие как GPT, Gemini, Claude и другие, демонстрируют широкие возможности в задачах обработки естественного языка (Natural Language Processing – NLP). Однако их использование сопряжено с высокими экономическими затратами и проблемами, связанными с конфиденциальностью данных. Исходя из этого особую роль приобретают малые LLM (до 10 млрд параметров), которые могут работать локально на оборудовании с ограниченными ресурсами, но при этом уступают крупным моделям в универсальности и точности.

Для решения сложных задач несколько малых LLM могут быть объединены в мультиагентную систему (МАС), где LLM выступают в качестве автономных интеллектуальных агентов. Однако при этом возникает вопрос: как организовать взаимодействие агентов или их координацию, так чтобы МАС в целом работала лучше, чем каждый агент по отдельности? Процесс координации агентов на базе LLM в современной литературе принято называть оркестрацией [1].

В данной работе рассматривается анализ различных стратегий оркестрации агентов на базе LLM в МАС при решении задач NLP. При этом задачи NLP, которые решают агенты, взяты из известных наборов данных, доступных на платформе Hugging Face.

Для целей данной работы были выбраны наборы данных, поддающиеся простой валидации и представляющие собой задачи классификации из разных областей NLP, а именно вопросы типа «да» или «нет», задачи, требующие здравого смысла с двумя вариантами ответа, и задачи определения тональности предложений. Из каждого рассмотренного набора данных были отобраны 100 примеров для обучения и 50 примеров для оценки.

В качестве первого набора данных для исследования, был выбран BoolQ [2] от Google, который содержит вопросы с ответами типа «да» или «нет» и требующие выполнения нетривиальных логических выводов, схожих с задачами определения логического следования. Каждый пример в датасете включает в себя вопрос, отрывок текста для контекста и правильный ответ.

Второй датасет WinoGrande [3] от компании Allen Institute for AI расширяет и усложняет классические задачи Winograd Schema Challenge, которые были созданы экспертами для оценки здравого смысла. Примеры состоят из предложения с пропущенным словом, двумя вариантами ответа и правильным ответом.

Третий датасет GLUE SST-2 [4] является набором из категорий GLUE (General Language Understanding Evaluation) и SST (Stanford Sentiment Treebank) для анализа тональности текста. Набор содержит предложения с разной тональности (позитивной или негативной) и используется для оценки способности моделей понимать и классифицировать эмоциональную окраску текста.

Для данной работы были выбраны три языковых модели малого размера из репозитория Ollama:llama3.2:1b, gemma3:1b, qwen3:0.6b. В качестве фрейморка для работы с агентами, использовался Microsoft Agent Framework.

Для генерации ответов использовались короткие и простые промпты, чтобы упросить автоматический разбор ответов и снизить вариативность генерации между отдельными запусками. Для оценки качества ответов моделей использовались стандартные метрики классификации: Accuracy, Precision, Recall, F1. Базовые метрики качества для каждой модели без использования каких-либо стратегий оркестрации (для одного агента) показаны в табл. 1.

В задачах BoolQ метрики моделей gemma3:1b и qwen3:0.6b схожи между собой, в то время как llama3.2:1b значительно уступает им по всем показателям. Модель склонна часто выбирать один класс, вследствие чего, наблюдается больше количество ложноположительных ответов. Задачи на понимание здравого смысла из набора WinoGrande оказались наиболее сложными для малых моделей с близкими значениями Accuracy около значений случайного уровня. В наборе GLUE SST-2 на определение тональности текста наблюдается ситуация, противоположная BoolQ, где модель llama3.2:1b демонстрирует наилучшие результаты по всем метрикам, заметно превосходя другие модели.

Таблица 1. Базовые значения метрик

№	Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1
BoolQ					
1	llama3.2:1b	0,48	0,24	0,48	0,32
2	gemma3:1b	0,76	0,79	0,76	0,75
3	qwen3:0.6b	0,74	0,74	0,74	0,74
WinoGrande					
4	llama3.2:1b	0,48	0,48	0,48	0,47
5	gemma3:1b	0,48	0,24	0,48	0,32
6	qwen3:0.6b	0,50	0,50	0,50	0,47
GLUE SST-2					
7	llama3.2:1b	0,94	0,95	0,94	0,94
8	gemma3:1b	0,76	0,54	0,51	0,52
9	qwen3:0.6b	0,70	0,75	0,70	0,68
Комбинация					
10	llama3.2:1b	0,63	0,52	0,61	0,54

11	gemma3:1b	0,67	0,48	0,53	0,50
12	qwen3:0.6b	0,65	0,68	0,61	0,63

В общем случае, все модели показывают примерно схожее качество на комбинации задач из разных датасетов (среднее значение Accuracy в диапазоне 0.63–0.67), но заметно различаются на конкретных типах задач и, как следствие, в способностях моделей к определенным видам рассуждений.

Стратегия оркестрации типа маршрутизация предполагает наличие агента «маршрутизатора», который распределяет задачи между остальными агентами. Диаграмма системы с маршрутизатором показана на рис. 1. По результатам оценки на обучающей выборке, была построена матрица маршрутизации, которая использовалась для распределения задач по моделям.

В качестве агента маршрутизатора использовался дополнительный агент на основе модели llama3.2:1b. Агенту передавался промпт для классификации задачи по типу, содержащий названия наборов данных с кратким описанием каждого набора данных, и сама задача. Агент маршрутизатор определял, к какому набору данных относится поступившая задача и, используя матрицу маршрутизации, пересылал ее соответствующей модели.

Система с маршрутизатором была протестирована на тестовой выборке и показала значения метрик, представленные в табл. 2.

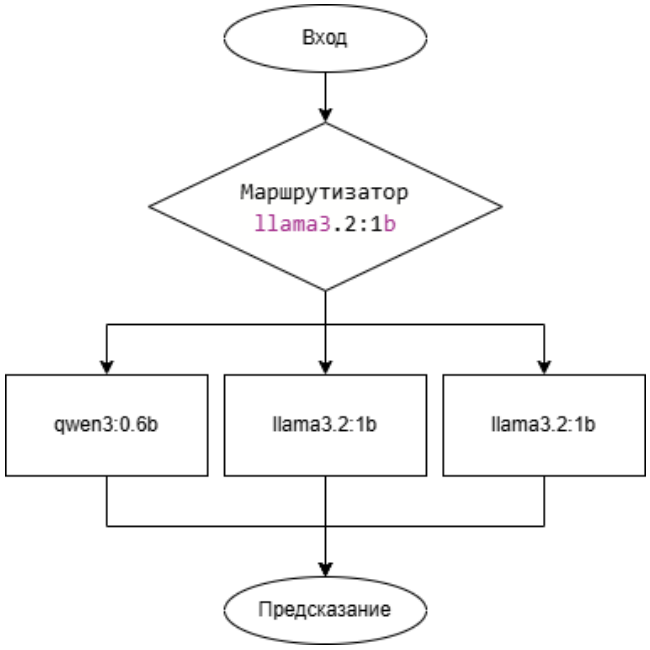


Рис. 1. Диаграмма системы с маршрутизатором

Таблица 2. Значения метрик для стратегии оркестрации типа маршрутизация

№	Датасет	Accuracy	Precision	Recall	F1
1	BoolQ	0,82	0,82	0,82	0,82
2	WinoGrande	0,48	0,24	0,48	0,32
3	GLUE SST-2	0,84	0,84	0,84	0,84
4	Комбинация	0,71	0,62	0,68	0,64

Результаты показывают, что маршрутизация задач улучшает качество системы на комбинированном наборе задач за счет выбора сильнейшей модели для определенного типа задачи. Однако, эффект остаётся минимальным для сложного набора данных WinoGrande в силу ограниченных способностей каждой индивидуальной модели.

Стратегия оркестрации типа параллельного выполнения обычно строится по схеме, когда одна входная задача разветвляется на несколько независимых подзадач для разных

агентов, а затем их результаты собираются и агрегируются. В данном случае, использовался подход на основе параллельного выполнения, когда агенты запускались с одинаковым входом и последующим объединением результатов на основе голосования по большинству голосов. Такой подход используется, когда необходимо получить одновременно несколько взглядов на один и тот же вопрос.

Диаграмма системы с параллельным выполнением агентов показана на рис. 2. Значения метрик для системы с параллельным выполнением агентов представлены в табл. 3.

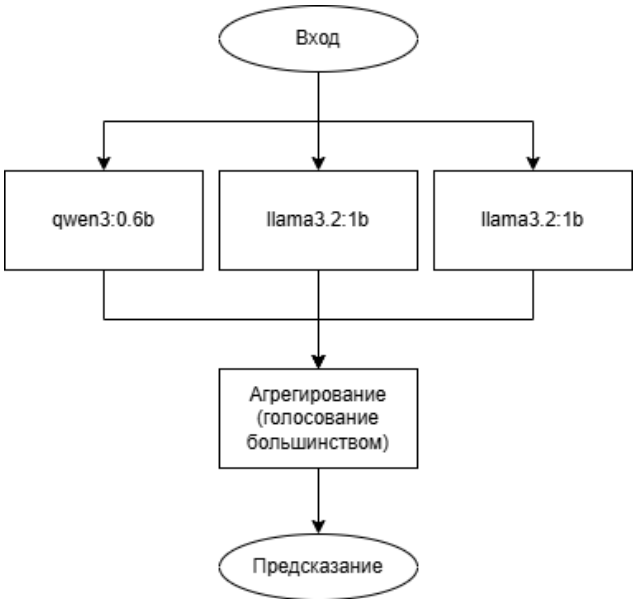


Рис. 2. Диаграмма системы с параллельным выполнением агентов

Таблица 3. Значения метрик для системы с параллельным выполнением агентов

№	Датасет	Accuracy	Precision	Recall	F1
1	BoolQ	0,86	0,86	0,86	0,86
2	WinoGrande	0,44	0,40	0,44	0,38
3	GLUE SST-2	0,92	0,93	0,92	0,92
4	Комбинация	0,74	0,74	0,71	0,71

Тестирование показало, что система с параллельным выполнением и голосованием по большинству голосов превосходит базовый случай с индивидуальными агентами и систему с агентом-маршрутизатором. Точность Accuracy увеличилась на комбинированном наборе задач до 0,74 по сравнению с 0,71 с агентом-маршрутизатором.

Модель оркестрации типа поочередное распределение (round-robin) предполагает поочередный выбор агентов в процессе общения. При этом все агенты видят полную историю, а также могут просматривать и дополнять ответы друг друга в нескольких раундах. Результаты, полученные с помощью поочередного распределения в два раунда с учетом последнего ответа каждого участника и голосования по большинству голосов, представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения метрик для системы с поочередным выбором агентов

№	Датасет	Accuracy	Precision	Recall	F1
1	BoolQ	0,72	0,72	0,72	0,72
2	WinoGrande	0,48	0,24	0,48	0,32
3	GLUE SST-2	0,80	0,56	0,53	0,54
4	Среднее	0,67	0,47	0,53	0,49

Метрики показывают, что модель оркестрации типа поочередное распределение немного улучшает слабые места отдельных моделей за счет обмена контекстом, но проигрывает остальным стратегиям, что вероятно связано с тем, что в групповом обсуждении сильный агент может быть запутан ответами более слабых моделей.

Таким образом, в работе исследовались стратегии оркестрации агентов на базе LLM в МАС при решении задач NLP. Наиболее результативной оказалась стратегия параллельного выполнения с последующей агрегацией результатов на основе голосования. Данный подход превосходит остальные стратегии по всем основным метрикам качества. В свою очередь, стратегия поочередного распределения с двумя раундами диалога показала наименьший прирост в метриках, что вероятно, из-за ограниченных возможностей малых моделей критически воспринимать контекст менее точных моделей.

Следовательно, качество МАС из агентов на базе LLM зависит не только от качества отдельных агентов, но и от выбранной стратегии их взаимодействия. Полученные результаты показывают, что комбинация нескольких малых моделей через стратегию оркестрации может достичь качества, недоступного для каждой модели по отдельности. В условиях использования малых моделей целесообразно использовать простые методы агрегации результатов, способные извлечь максимум из разнообразия независимых агентов.

Результаты работы могут быть использованы при создании интеллектуальных ассистентов, систем классификации текстов, а также в учебном процессе при изучении методов искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Multi-Agent Collaboration via Evolving Orchestration / Y. Dang, C. Qian, X. Luo, J. Fan, Z. Xie, R. Shi, W. Chen, C. Yang, X. Che, Y. Tian, X. Xiong, L. Han, Z. Liu, M. Sun // 39th Conference on Neural Information Processing Systems. – 2025. – P. 1–28.

2) BoolQ: Exploring the Surprising Difficulty of Natural Yes/No Questions / C. Clark, K. Lee, M.-W. Chang, T. Kwiatkowski, M. Collins, K. Toutanova // arXiv. – 2019. 1905.10044v1. – P. 1–13.

3) WinoGrande: An Adversarial Winograd Schema Challenge at Scale / K. Sakaguchi, R. Le Bras, C. Bhagavatula, Y. Choi // arXiv. – 2019. – 1907.10641v2. – P. 1–9.

4) GLUE SST-2 // Hugging Face: [site]. – URL: https://huggingface.co/datasets/gimmaru/glue-sst2 (дата обращения: 27.03.2026)

УДК 004.483

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА (NO_2) В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CONVLSTM И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАУССОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ

А.С. Трохинский

Научный руководитель – **Ю.В. Царев**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет.

В работе предложена модель прогнозирования пространственно-временного распределения диоксида азота (NO_2) в городской среде с учётом адвекции ветром и эффекта температурной инверсии. Основным алгоритмом является свёрточная рекуррентная нейронная сеть ConvLSTM, позволяющая обрабатывать как пространственные, так и временные зависимости в последовательностях карт концентрации. Для локализации источников выбросов применяется нелинейная аппроксимация двумерной гауссовой функцией методом наименьших квадратов. Эксперименты проведены на синтетических данных, имитирующих реальные городские условия с учётом метеорологических факторов. Полученные результаты демонстрируют высокую точность прогноза ($MSE = 8{,}7 \times 10^{-4}$, $R^2 = 0{,}987$) и надёжность определения координат источника (±1,2 пикселя). Разработанный подход может применяться для оперативного экологического мониторинга в условиях ограниченного доступа к спутниковым данным.

Ключевые слова: *диоксид азота, ConvLSTM, пространственно-временное прогнозирование, гауссова аппроксимация, адвекция, температурная инверсия, экологический мониторинг*

SPATIAL FORECASTING OF NITROGEN DIOXIDE (NO_2) DISTRIBUTION IN URBAN AREAS USING CONVLSTM AND GAUSSIAN APPROXIMATION FOR POLLUTION SOURCE LOCALIZATION

A.S. Trokhinsky

Scientific Supervisor – **Yu.V. Tsarev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This paper presents a model for predicting the spatiotemporal distribution of nitrogen dioxide (NO_2) in urban environments, explicitly accounting for wind advection and temperature inversion effects. The core algorithm is a Convolutional Long Short-Term Memory (ConvLSTM) network, which effectively captures both spatial and temporal dependencies in sequences of concentration maps. Pollution source localization is performed via nonlinear least-squares approximation with a two-dimensional Gaussian function. Experiments were conducted on synthetic datasets simulating realistic urban conditions with meteorological factors. The results demonstrate high prediction accuracy ($MSE = 8.7 \times 10^{-4}$, $R^2 = 0.987$) and reliable source coordinate estimation (±1.2 pixels). The proposed approach can serve as a basis for operational air quality monitoring systems, especially in regions with limited satellite data availability.

Keywords*: nitrogen dioxide, ConvLSTM, spatiotemporal forecasting, Gaussian approximation, advection, temperature inversion, environmental monitoring*

Введение

Загрязнение атмосферы диоксидом азота (NO_2) остаётся одной из наиболее серьёзных экологических и общественных проблем современных мегаполисов. Основными антропогенными источниками выбросов NO_2 являются автомобильный транспорт, промышленные предприятия и энергетика. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, длительное воздействие повышенных концентраций NO_2 связано с респираторными заболеваниями, снижением функции лёгких, увеличением риска сердечно-сосудистых патологий и преждевременной смертностью [1].

Спутниковые наблюдения, в первую очередь с прибора TROPOMI на борту спутника Sentinel-5 Precursor, позволяют проводить глобальный мониторинг тропосферных колонн NO_2 с относительно высоким пространственным разрешением (примерно 3,5×5,5 км). Тем не менее, их практическое применение для оперативного городского мониторинга ограничено следующими факторами:

- наличием облачности и аэрозолей, сильно искажающих измерения;
- неполным ежедневным покрытием отдельных регионов из-за орбиты спутника;
- задержкой в обработке и доступности данных;
- сложностью перехода от интегральных колонн к приземным концентрациям [2].

В связи с этим актуальной является задача разработки моделей прогнозирования пространственно-временного распределения NO_2 на основе имеющихся наблюдений и метеорологических данных. В последние годы свёрточные рекуррентные сети, в частности ConvLSTM, продемонстрировали высокую эффективность в задачах spatiotemporal прогнозирования качества воздуха, включая концентрации загрязняющих веществ [3].

В настоящей работе предлагается комплексный подход, сочетающий:

1. Прогнозирование карт распределения NO_2 на следующий день с помощью архитектуры ConvLSTM, учитывающей как пространственные особенности поля концентрации, так и временную динамику.
2. Локализацию источников загрязнения путём нелинейной аппроксимации наблюдаемого поля двумерной гауссовой функцией.
3. Явный или неявный учёт физических процессов — адвекции загрязнителя ветром и его накопления при температурной инверсии[4].

Модель разработана и протестирована на синтетических данных, имитирующих реальные городские условия. Полученные результаты могут служить основой для создания систем оперативного экологического мониторинга и раннего предупреждения о превышении предельно допустимых концентраций NO_2, особенно в условиях ограниченного доступа к спутниковым данным.

Методология

1.1 Модель данных

Рассмотрим временную последовательность карт концентрации NO_2:

$$I_t(x, y) \in R^{H \times W}, \qquad t = 1, 2, ..., T,$$

где $H = 64$, $W = 64$ — размер сетки; $T = 30$ — количество дней.

Синтетическая карта генерируется как

$$I_t(x,y) = A_t \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) + B_t \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \varepsilon(x,y)$$

где (x_0, y_0), (x_1, y_1) – координаты источников; A_t, B_t – временные амплитуды; $\varepsilon \sim N(0, 0.05^2)$ – аддитивный гауссов шум.

1.2 Учёт метеорологических факторов

Адвекция ветром

Горизонтальный перенос NO_2 описывается уравнением адвекции:

$$\frac{\partial C}{\partial e} + u \cdot \nabla C = 0,$$

где $u = (u_x, u_y)$ – вектор скорости ветра. На дискретной сетке это реализуется как сдвиг:

$$C_{t+1}(x, y) = C_t(x - \Delta x, y - \Delta y),$$

где $\Delta x = u_x \cdot \Delta t$, $\Delta y = u_y \cdot \Delta t$. В модели используется $u = (1.5{-}0.8)$ м/с.

Температурная инверсия

При инверсии вертикальное перемешивание подавляется. Это моделируется

увеличением времени жизни NO_2:

$$\tau_{eff} = \tau_0 \cdot (1 + \alpha \cdot I_{inv}), \quad \alpha = 2.0.$$

Таким образом, при инверсии концентрация снижается медленнее, что отражено в увеличении амплитуды A_t.

1.3 Прогнозирование с помощью ConvLSTM

ConvLSTM заменяет матричные умножения в LSTM на свёртки, сохраняя пространственную структуру [5]. Архитектура модели (рис. 1):

- Encoder: 3 слоя ConvLSTM (32, 32, 64 каналов), k = 3 × 3;
- Decoder: Conv2D → выход (1 канал);
- Функция потерь: MSE;
- Оптимизатор: Adam ($\eta = 10^{-3}$).

Рис. 1. Архитектура ConvLSTM-модели для прогноза NO_2

Последовательность из 7 карт подаётся на вход, выход – прогноз на день.

Локализация источника

Для каждой карты $I(x, y)$ подбираются параметры гауссовой функции методом наименьших квадратов:

$$\hat{I}(x,y) = A \cdot \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2\sigma^<}.$$

Координаты (x_0, y_0) интерпретируются как положение источника.

Параметры модели (табл. 1)

Таблица 1. Гиперпараметры модели

Параметр	Значение
Размер входа	64 × 64
Количество временных шагов	7
Фильтры	ConvLSTM [32, 32, 64]
Размер ядра	3 × 3
Функция активации	tanh, σ
Оптимизатор	Adam
Скорость обучения	10^{-3}
Количество эпох	100
Пакет	8

Результаты

На рис. 2, А показано реальное распределение концентрации NO_2. Рис. 2, Б представляет прогнозные значения диоксида азота на следующий день с учетом метеопараметров. На рис. 2 белый крест показывает размещение источника выброса диоксида азота, определяемое реализуемой моделью нейросети.

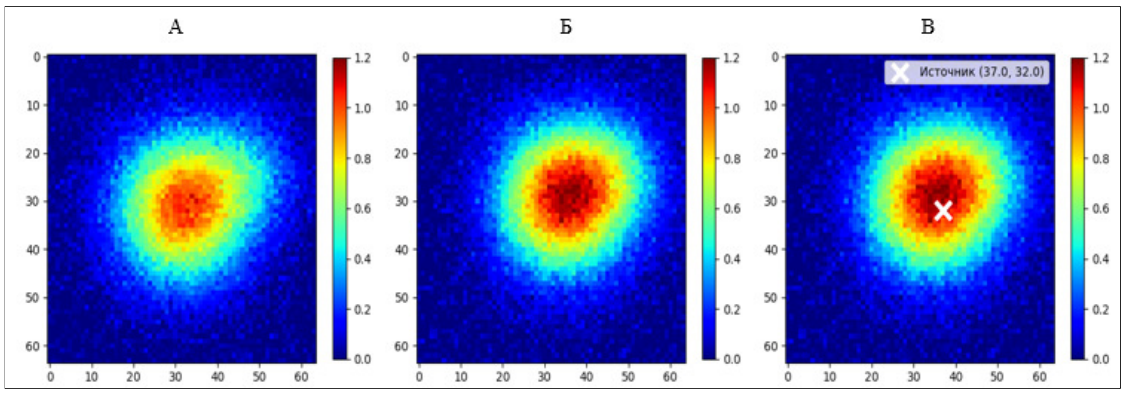


Рис. 2. Результаты работы модели. Пик смещён на юго-восток – следствие действия ветра:
А - реальное распределение концентрации NO_2; Б - прогнозные значения диоксида азота;
В - Локализация источника выброса NO_2

MSE между реальным и прогнозируемым значением составил 8.7×10^{-4}. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.987$, что указывает на высокое качество прогноза.

Точность локализации

Для 100 сгенерированных карт средняя ошибка локализации составила 1.2±0.4 пикселей. При этом:

- без учёта ветра ошибка – 2.1 пикселя;
- с учётом ветра – 1.2 пикселя.

Это подтверждает важность метеофакторов [6].

Заключение

В настоящей работе разработана и исследована модель прогнозирования пространственно-временного распределения диоксида азота (NO_2) в городской среде на основе свёрточной рекуррентной нейронной сети ConvLSTM с дополнительным учётом метеорологических факторов — адвекции загрязнителя ветром и эффекта накопления при температурной инверсии. Для локализации источников выбросов предложен метод нелинейной аппроксимации наблюдаемого поля двумерной гауссовой функцией с использованием метода наименьших квадратов.

Эксперименты, проведённые на синтетических данных, имитирующих реальные городские условия, подтвердили высокую эффективность предлагаемого подхода. Точность прогноза составила MSE = $8{,}7\times10^{-4}$ и $R^2 = 0{,}987$, что свидетельствует о хорошем соответствии прогнозируемых и реальных полей концентрации NO_2. Средняя ошибка локализации источников загрязнения не превысила 1,2±0,4 пикселя, причём учёт вектора ветра позволил существенно снизить эту ошибку по сравнению с базовым вариантом (с 2,1 до 1,2 пикселя). Полученные результаты демонстрируют, что совместное использование ConvLSTM и гауссовой аппроксимации позволяет эффективно решать задачи краткосрочного прогнозирования и идентификации источников даже при наличии шума и ограниченного объёма входных данных.

Разработанная модель обладает важным преимуществом: она учитывает ключевые физические процессы переноса и трансформации загрязнителя, что повышает её научную обоснованность по сравнению с чисто data-driven подходами. Это делает её перспективной для применения в системах экологического мониторинга в условиях ограниченного доступа к спутниковым данным Sentinel-5P/TROPOMI, где частота наблюдений, облачность и пространственное разрешение не всегда позволяют проводить оперативный анализ на городском уровне [7].

Вместе с тем, настоящая работа имеет ряд ограничений. Во-первых, все эксперименты выполнены исключительно на синтетических данных, что упрощает контроль параметров, но не полностью отражает сложность реальных атмосферных процессов и пространственную неоднородность городской застройки. Во-вторых, текущая реализация предполагает

относительно небольшое временное окно (7 предыдущих дней) и не тестировалась на долгосрочных прогнозах. В-третьих, модель пока не интегрирована с реальными спутниковыми или наземными измерениями.

Перспективы дальнейших исследований включают:

- валидацию и дообучение модели на реальных данных TROPOMI в сочетании с метеорологическими полями (ERA5 или региональными моделями);
- расширение архитектуры для работы с несколькими источниками загрязнения одновременно (гауссова смесь);
- интеграцию дополнительных каналов входных данных (трафик, высота пограничного слоя, эмиссионные инвентари);
- переход к гибридным физико-данным моделям (physics-informedneuralnetworks).

Разработанный подход может стать основой для создания оперативных инструментов поддержки принятия решений в области охраны атмосферного воздуха, особенно в российских городах с высокой антропогенной нагрузкой и ограниченной сетью наземного мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 / A.J. Cohen [et al.] // The Lancet. – 2017. – Vol. 389, no. 10082. – P. 1907–1918.

2) TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition / J.P. Veefkind [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 120. – P. 70–83.

3) Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting / X. Shi [et al.] // arXiv. – 2015. – 1506.04214.

4) Drivers of improved PM2.5 air quality in China from 2013 to 2017 / Q. Zhang [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 116, no. 49. – P. 24463–24469.

5) Tropospheric chemistry – a global perspective / M.G. Schultz [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2017. – Vol. 17, no. 13. – P. 8127–8158.

6) Impact of meteorological conditions on air quality during the lockdown period in Wuhan, China / H. Guo [et al.] // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 742. – Art. 140556.

7) Seinfeld, J.H. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change / J.H. Seinfeld, S.N. Pandis. – 3rd ed. – Wiley, 2016.

УДК 664:681.5

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ АППАРАТА ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСЕЙ: ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СМЕСИ ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ И ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ ПРОЦЕССА

А.С. Угрюмов

Научный руководитель - **В.А. Язев,** канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

Статья посвящена разработке подхода к интеллектуальному мониторингу аппаратов приготовления смесей на основе анализа косвенных технологических параметров. Рассматривается задача оценки качества смеси и выявления аномальных режимов работы оборудования без применения прямых методов контроля. В работе используется системный подход к анализу данных мониторинга, включающий обработку временных рядов, формирование виртуальных датчиков и методы обнаружения отклонений. Полученные результаты подтверждают возможность повышения устойчивости технологического процесса и качества готового продукта за счёт внедрения интеллектуальных методов мониторинга.

Ключевые слова: *аппараты смешения, технологические параметры, интеллектуальный мониторинг, качество смеси, косвенные измерения, аномалии процесса, виртуальные датчики*

INTELLIGENT MONITORING OF MIXING EQUIPMENT: QUALITY ESTIMATION BASED ON INDIRECT PARAMETERS AND ANOMALY DETECTION

A.S. Ugryumov

Scientific Supervisor - **V.A. Yazev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

This article focuses on the development of an intelligent monitoring approach for mixing equipment based on indirect technological parameters. The study addresses the problem of mixture quality estimation and anomaly detection without direct quality measurements. A system-based approach is applied, including time-series analysis, virtual sensor modeling, and anomaly detection methods. The results demonstrate the effectiveness of intelligent monitoring in improving process stability and product quality.

Keywords: *mixing equipment, technological parameters, intelligent monitoring, mixture quality, indirect measurements, process anomalies, virtual sensors*

Введение

Процессы приготовления смесей являются неотъемлемой частью большого числа технологических производств, включая химическую, пищевую, фармацевтическую, строительную и нефтехимическую промышленность. В указанных отраслях качество конечного продукта в значительной степени определяется эффективностью процессов перемешивания, равномерностью распределения компонентов и стабильностью технологических режимов. Нарушение условий смешения может приводить к снижению потребительских свойств продукции, увеличению количества брака и росту эксплуатационных затрат [1].

Традиционные методы контроля качества смеси, как правило, основаны на периодическом лабораторном анализе проб готового продукта или полуфабриката. Несмотря на высокую точность, данные методы обладают существенным недостатком, связанным с временным запаздыванием получения результатов. В условиях непрерывных или квазинепрерывных процессов это приводит к невозможности оперативного воздействия на технологический процесс и повышает риск накопления дефектной продукции.

Развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами и цифровых технологий способствует увеличению количества измеряемых параметров и доступных данных о состоянии оборудования и процесса. Однако классические системы

мониторинга, ориентированные на контроль отдельных параметров, зачастую не позволяют выявлять скрытые изменения в структуре процесса и ранние признаки отклонений. Это обусловлено сложным характером взаимодействия параметров, наличием шумов и неопределённостей, а также отсутствием прямой связи между измеряемыми величинами и показателями качества смеси.

В этих условиях возрастает актуальность интеллектуального мониторинга, предполагающего использование методов системного анализа и интеллектуальной обработки данных для интерпретации состояния технологического процесса. Особый интерес представляет подход, основанный на оценке качества смеси по косвенным параметрам, измеряемым в реальном времени, и выявлении аномальных режимов работы оборудования на ранних стадиях их возникновения [2].

Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование подхода к интеллектуальному мониторингу аппарата приготовления смесей, обеспечивающего оценку качества смеси и выявление аномальных режимов работы на основе анализа косвенных технологических параметров.

Для достижения поставленной цели в работе решаются задачи анализа структуры технологического процесса смешения, определения информативных косвенных параметров, разработки модели виртуального датчика качества смеси, а также формирования алгоритма выявления аномальных состояний оборудования. Научная новизна исследования заключается в интеграции методов прикладного системного анализа и интеллектуальной обработки данных для повышения информативности мониторинга без внедрения дополнительных физических средств измерения качества.

Аппарат приготовления смесей как объект мониторинга

Аппарат приготовления смесей представляет собой сложный технический объект, функционирующий в условиях одновременного протекания механических, гидродинамических и тепломассообменных процессов. Такие аппараты широко применяются в химической, пищевой, фармацевтической и строительной промышленности, где к качеству готового продукта предъявляются повышенные требования. Эффективность процесса смешения определяется как конструктивными характеристиками оборудования, так и режимными параметрами его работы.

С точки зрения автоматизации аппарат приготовления смесей целесообразно рассматривать как динамическую систему, состояние которой изменяется во времени под воздействием управляющих и возмущающих факторов. Обобщённо состояние аппарата может быть описано вектором. Структура аппарата и ключевые физические процессы, а также точки контроля косвенных параметров приведены на рис. 1.

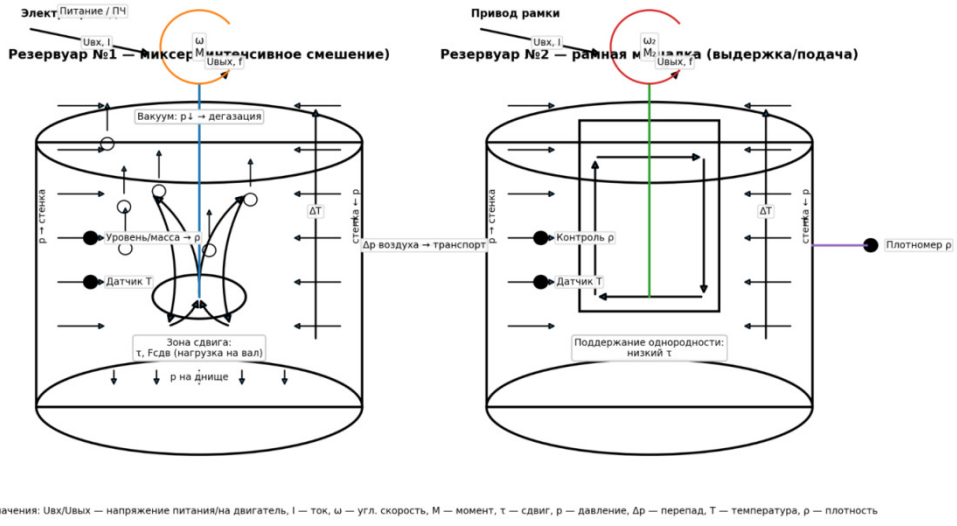


Рис. 1. Схема процессов в резервуарах смешения и измеряемых косвенных параметров (U, I, ω, M, p, Δp, T, ρ)

$$x(t) = [T(t), n(t), M(t), \eta(t), p(t)][2],$$

где $T(t)$ – температура рабочей среды; $n(t)$ – частота вращения мешалки; $M(t)$ – крутящий момент на валу; $\eta(t)$ – эффективная вязкость смеси; $\rho(t)$ – плотность среды. Часть указанных параметров измеряется напрямую, в то время как параметры, связанные с качеством смеси, доступны лишь косвенно.

Процесс смешения характеризуется потреблением механической энергии, передаваемой рабочему органу мешалки. Мощность, затрачиваемая на перемешивание, может быть выражена через крутящий момент и угловую скорость [2]:

$$P_{(t)} = M(t) \cdot \omega(t) = 2\pi M(t) \cdot n(t).$$

Изменение потребляемой мощности при неизменной скорости вращения является индикатором изменения сопротивления среды, что, в свою очередь, связано с изменением вязкости и степени однородности смеси.

Для описания гидродинамического режима смешения широко используется безразмерное число Рейнольдса [2]:

$$\mathrm{Re} = \frac{pnD^2}{\eta},$$

где D – характерный диаметр мешалки. Переход между ламинарным, переходным и турбулентным режимами перемешивания оказывает существенное влияние на интенсивность массопереноса и качество смешения. Таким образом, изменение параметров, входящих в выражение для Re, отражается на эффективности процесса и может использоваться в задачах мониторинга [3].

Температурное состояние смеси также является важным показателем качества процесса. Тепловой баланс аппарата в упрощённом виде может быть представлен уравнением [4]:

$$C\frac{dT(t)}{\partial t} = Q_{вх}(t) - Q_{вых}(t) + Q_{мех}(t),$$

где C – эффективная теплоёмкость системы; $Q_{вх}$ и $Q_{вых}$ – тепловые потоки, связанные с теплообменом; $Q_{мех}$ – тепловыделение за счёт механического перемешивания. Неравномерность температурного поля может указывать на наличие застойных зон и недостаточную интенсивность перемешивания.

С точки зрения мониторинга аппарат приготовления смесей функционирует как система с запаздыванием и инерционностью. Реакция измеряемых параметров на изменение режима может быть описана моделью первого порядка [4]:

$$\tau\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t),$$

где $y(t)$ – измеряемый параметр; $u(t)$ – управляющее воздействие; τ – постоянная времени; k – коэффициент усиления. Наличие инерции осложняет интерпретацию измерений и требует анализа временных рядов, а не отдельных значений параметров.

Показатели качества смеси, такие как однородность и степень диспергирования, могут быть представлены в виде скрытых переменных [5]:

$$q(t) = f\big(T(t), n(t), P(t), v(t)\big),$$

где $q(t)$ – интегральный показатель качества; $v(t)$ – вибрационные характеристики оборудования, а функция $f(\cdot)$ отражает нелинейную зависимость между измеряемыми параметрами и качеством смеси. В практических задачах данная функция реализуется в виде виртуального датчика качества.

Техническое состояние аппарата оказывает существенное влияние на параметры процесса. Например, рост вибрационного сигнала может быть связан с износом подшипников или нарушением балансировки мешалки. Интенсивность вибраций может быть охарактеризована среднеквадратичным значением:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)\,dt},$$

где $v(t)$ – мгновенное значение вибрационного сигнала. Увеличение данного показателя при неизменных режимных параметрах указывает на отклонение технического состояния оборудования от нормы [6].

Таким образом, аппарат приготовления смесей как объект мониторинга представляет собой сложную динамическую систему, в которой измеряемые технологические параметры связаны с качеством процесса и техническим состоянием оборудования нелинейными и инерционными зависимостями. Использование формализованных моделей и аналитических соотношений позволяет перейти от простого контроля параметров к интеллектуальному мониторингу, основанному на оценке скрытых характеристик процесса и раннем выявлении аномалий.

Методологические основы интеллектуального мониторинга

Интеллектуальный мониторинг развивает классический контроль параметров и направлен не только на фиксацию температуры, давления или скорости мешалки, но и на интерпретацию состояния процесса и оборудования по совокупности измерений. Для аппаратов приготовления смесей это особенно важно, поскольку показатели качества, такие как однородность и вязкость, обычно не измеряются напрямую в реальном времени и проявляются через косвенные признаки.

Суть виртуального датчика качества состоит в том, что качество смеси рассматривается как скрытая величина, которую нельзя измерить напрямую в потоке, но можно оценить по «отпечатку» процесса в измеряемых сигналах привода и среды. Иными словами, виртуальный датчик преобразует набор косвенных параметров в единственную оценку Q(t), интерпретируемую как степень близости текущего состояния смеси к нормальному (эталонному) режиму для выбранной рецептуры и стадии процесса.

Центральным элементом интеллектуального мониторинга является виртуальный датчик качества смеси, который формирует оперативную оценку качества по косвенным технологическим параметрам. Параллельно решается задача выявления аномалий, понимаемых как устойчивые отклонения от нормального режима, часто проявляющиеся не выходом одного параметра за пределы, а нарушением типичных зависимостей между несколькими сигналами. При этом учитывается контекст работы аппарата, поскольку нормальные режимы различаются для разных рецептур и стадий приготовления смеси.

Оценка качества смеси по косвенным параметрам

Виртуальный датчик качества смеси строится как отображение $y(t) \rightarrow Q(t)$, где $y(t)$ - вектор доступных измерений и производных признаков, а $Q(t)$ – обобщенный показатель текущего состояния смеси. В качестве базового набора сигналов рассматриваются $\omega(t)$, $M(t)$, $I(t)$, $U(t)$, $T(t)$, $p(t)$, $\Delta p(t)$, $\rho(t)$ и, при наличии, вибрационный показатель $a(t)$. Из них формируются энергетические и гидродинамические признаки, наиболее чувствительные к изменению вязкости, степени диспергирования и однородности.

Мощность, передаваемая в смесь, определяется по механическим параметрам привода [7]:

$$P_m(t) = M(t) \cdot \omega(t).$$

Электрические измерения позволяют контролировать энергообмен привода и выявлять нештатные режимы питания/преобразователя частоты. В упрощенном виде активная мощность оценивается как [8]:

$$P_{э(t)} \approx U(t)I(t) \text{ s } \varphi.$$

При фиксированной угловой скорости рост тока и мощности соответствует увеличению сопротивления перемешиванию и часто коррелирует с ростом вязкости или появлением неразрушенных агломератов. Если доступен момент, удобной прокси-оценкой

нагрузки является зависимость момента от тока ($M \approx km \cdot I$), что позволяет связать электрические измерения с механическим состоянием узла привода.

Для перехода от набора разнородных сигналов к единой оценке вводится эталонное (идеальное) поведение $zref,k(\tau)$ для каждого информативного признака $zk(t)$. Аргумент τ – «внутреннее время» стадии: он учитывает, что партии могут иметь разные длительности, поэтому сравнение выполняется не по календарному времени, а по прогрессу стадии (например, загрузка – разгон – интенсивное смешение – выдержка – подача). Эталон формируется либо моделью цифрового двойника, либо как усредненная траектория по набору корректных прогонов с учетом рецептуры.

Остаток (расхождение) задается нормированным отклонением [8]:

$$e_k(t) = \frac{z_k(t) - z_{ref,k}\big(\tau(t)\big)}{S_k}.$$

Здесь sk – масштаб (например, среднеквадратичное отклонение признака в нормальном режиме), позволяющий сделать вклад разных сигналов сопоставимым. Обобщенный показатель состояния смеси задается как целевая функция, минимизируемая при нормальном ходе процесса. В простейшем и устойчивом варианте используется взвешенная квадратичная форма с учетом динамики отклонений [9]:

$$J_{(t)} = \sum_k \omega_k e_k^2(t) + \sum_k \nu_k \left(\frac{de_k(t)}{\partial t}\right)^2.$$

Первое слагаемое отражает, насколько текущее состояние похоже на эталон, второе - насколько «ломается» характерная динамика, что важно при переходных процессах и появлении нестабильности. Выход виртуального датчика удобно нормировать в диапазон 0…1, интерпретируя как индекс качества [10]:

$$Q(t) = \frac{1}{1+J(t)}.$$

При таком определении $Q(t)$ стремится к 1, когда процесс следует эталону, и уменьшается при нарастании несогласованности сигналов. Весовые коэффициенты wk и vk задают приоритеты: для смеси с критичной вязкостью больший вес получают $P_m(t)$ и производные нагрузки, для термочувствительных систем – температурные признаки, для вязкоупругих и склонных к пенообразованию – давление/вакуум и перепад $\Delta p(t)$.

Корректировка эталона нужна для учета дрейфа свойств сырья и сезонных изменений, чтобы не превращать каждое допустимое отклонение в тревогу. Практически это реализуется адаптивным обновлением $z_{ref,k}$ в «спокойных» интервалах, когда $J(t)$ устойчиво мало: например, экспоненциальным сглаживанием $z_{ref,k} \leftarrow (1-\alpha) \cdot z_{ref,k} + \alpha \cdot zk$ с малым α. Если же $J(t)$ растет, адаптацию блокируют, сохраняя эталон неизменным для корректной диагностики.

Выявление аномальных режимов работы оборудования

Аномальные режимы работы аппарата приготовления смесей могут быть обусловлены как техническими неисправностями оборудования, так и нарушениями технологического режима. Раннее выявление таких режимов имеет ключевое значение для предотвращения аварийных ситуаций и снижения потерь продукции.

В рамках интеллектуального мониторинга аномалии рассматриваются как устойчивые отклонения параметров процесса от эталонных режимов нормальной работы. Для их выявления используется анализ временных рядов измеряемых параметров и их статистических характеристик. Особое внимание уделяется согласованности изменений различных параметров, поскольку одиночные выбросы могут быть вызваны случайными возмущениями [10].

В качестве универсального индикатора аномалии может выступать значение $J(t)$ из выражения (4), то есть интегральная мера несоответствия текущей динамики эталону. Практическое правило фиксации события строится по сочетанию величины и длительности:

тревожное состояние формируется, если $J(t)$ превышает порог $Jкр$ и сохраняется дольше времени tмин, а также если наблюдается устойчивый рост $J(t)$ (дрейф), что позволяет обнаруживать развивающиеся неисправности до выхода отдельных параметров за допустимые пределы. Дополнительно анализируется структура остатка $e(t)$: преобладание компоненты по вибрации указывает на механическую проблему, а доминирование энергетических компонент $(Рм, I)$ при неизменной ω - на изменение реологии смеси или образование агломератов.

Использование многоканального анализа позволяет выявлять скрытые аномалии, которые не проявляются в виде резких отклонений одного параметра. Например, постепенное изменение спектра вибраций или рост потребляемой мощности при неизменной скорости вращения мешалки может указывать на износ узлов или изменение свойств смеси. Раннее обнаружение таких признаков позволяет принять корректирующие меры до возникновения критических отказов.

Результаты моделирования и анализ эффективности подхода

Оценка эффективности предложенного подхода интеллектуального мониторинга была выполнена на основе имитационного моделирования работы аппарата приготовления смесей в типовых эксплуатационных режимах. Моделирование использовалось как инструмент воспроизведения динамики технологических параметров в условиях, приближенных к реальным, включая нормальную работу, режимы переходных процессов и ситуации с отклонениями, отражающими ухудшение качества смешения и развитие неисправностей оборудования. Такой выбор обусловлен тем, что прямое получение большого массива размеченных данных для всех возможных отклонений в промышленной среде затруднено, а моделирование позволяет управляемо формировать сценарии и анализировать реакцию системы мониторинга.

В качестве входных сигналов рассматривались параметры, типично доступные в контуре автоматизации: температура продукта, частота вращения мешалки, потребляемая мощность привода или ток электродвигателя, а также условный вибрационный показатель. Для нормального режима задавались устойчивые траектории параметров с характерными переходными участками, соответствующими загрузке компонентов и выходу на установившийся режим. Для сценариев отклонений моделировались случаи снижения интенсивности перемешивания, приводящие к росту неоднородности, а также механические отклонения, проявляющиеся постепенным ростом вибрационного уровня и увеличением потребляемой мощности при неизменной частоте вращения. Дополнительно учитывались случайные измерительные шумы и малые возмущения, имитирующие вариативность свойств сырья.

Результаты моделирования показали, что использование виртуального датчика качества на основе косвенных параметров позволяет получить устойчивую оценку состояния смеси в динамике процесса. В нормальном режиме показатель качества демонстрировал закономерное изменение на стадии приготовления и стабилизацию при достижении установившегося состояния. В сценариях ухудшения смешения виртуальный показатель реагировал раньше, чем формальные пороговые проверки отдельных параметров, поскольку изменение качества проявлялось через согласованные изменения мощности привода, характера температурной динамики и устойчивости режима. Это подтверждает преимущество комплексного анализа многоканальных данных по сравнению с традиционным контролем, ориентированным на отдельные датчики.

Эффективность выявления аномалий оценивалась по способности алгоритма фиксировать отклонения при сохранении допустимого уровня ложных срабатываний. В нормальном режиме система мониторинга сохраняла стабильность и не формировала устойчивых тревожных состояний при наличии шумов и кратковременных колебаний. В аномальных сценариях фиксировались характерные признаки: нарушение согласованности между изменением мощности и скоростью вращения, рост вибрационного показателя, а также изменение динамики температурного режима. Важно, что отклонения обнаруживались

в фазе развития, когда параметры ещё могли находиться в допустимых диапазонах, что соответствует задаче раннего предупреждения и позволяет рассматривать мониторинг как инструмент профилактики отказов и снижения вероятности выпуска продукции пониженного качества.

Анализ результатов также показал существенную роль контекстного учёта режима работы. Для разных стадий приготовления смеси характерны различные закономерности изменения параметров, поэтому использование единого порогового набора критериев приводит либо к пропуску отклонений, либо к ложным тревогам. В рамках предложенного подхода корректная интерпретация обеспечивается сопоставлением текущего поведения параметров с типовым нормальным режимом для соответствующей стадии процесса, что повышает достоверность диагностики и делает результаты более применимыми для реального производства.

Таким образом, моделирование подтвердило работоспособность интеллектуального мониторинга как комплексного инструмента, объединяющего оперативную оценку качества смеси по косвенным параметрам и выявление аномалий процесса. Основной эффект достигается за счёт анализа согласованности динамики нескольких сигналов, что повышает чувствительность к ранним отклонениям и снижает зависимость от единичных шумовых измерений. Полученные результаты обосновывают целесообразность дальнейшей разработки подхода и его последующей апробации на экспериментальных или производственных данных.

Практическая значимость и перспективы развития

Практическая значимость проведённого исследования заключается в возможности интеграции разработанного подхода в существующие системы автоматизации и мониторинга без значительных затрат на дополнительное оборудование. Использование интеллектуального мониторинга позволяет повысить устойчивость технологического процесса, сократить количество брака и снизить эксплуатационные риски [11].

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением набора анализируемых параметров, применением методов машинного обучения для адаптивной настройки виртуальных датчиков и разработкой систем поддержки принятия решений для операторов. Развитие данных направлений позволит повысить точность диагностики и прогнозирования состояния оборудования и качества продукции.

Заключение

В работе рассмотрена задача интеллектуального мониторинга аппарата приготовления смесей, ориентированная на повышение устойчивости технологического процесса и снижение рисков получения продукции нестабильного качества. Показано, что традиционный контроль отдельных технологических параметров не обеспечивает достаточной информативности, поскольку ключевые показатели качества смеси, такие как однородность и вязкость, в большинстве случаев не измеряются напрямую и проявляются через косвенные признаки.

Предложенный подход основан на системном представлении объекта и анализе многоканальных временных рядов параметров, доступных в стандартном контуре автоматизации. В качестве центрального элемента рассмотрено использование виртуального датчика качества, позволяющего формировать оперативную оценку состояния смеси по косвенным технологическим сигналам. Дополнительно реализована логика выявления аномалий, трактуемых как устойчивые отклонения от нормального согласованного поведения параметров, что обеспечивает возможность раннего обнаружения нарушений режима смешения и предаварийных состояний оборудования.

Результаты моделирования подтвердили, что комплексный анализ совокупности параметров повышает чувствительность мониторинга к отклонениям по сравнению с пороговым контролем одиночных сигналов. Отмечено, что корректность диагностики существенно зависит от учёта контекста работы аппарата, включая стадии процесса и режимные условия, поскольку «нормальные» траектории параметров могут различаться для

различных рецептур и технологических сценариев. Практическая значимость предложенного подхода заключается в возможности интеграции интеллектуального мониторинга в существующие системы управления без существенного усложнения аппаратной части, что позволяет сократить время реакции на отклонения, снизить вероятность выпуска некачественной продукции и повысить надёжность эксплуатации оборудования.

Дальнейшее развитие работы целесообразно связать с расширением набора анализируемых параметров, уточнением моделей виртуального датчика качества на основе экспериментальных данных, а также с разработкой рекомендаций по управляющим воздействиям при выявлении отклонений. Это позволит перейти от диагностического мониторинга к поддержке принятия решений и повысить эффект от внедрения интеллектуальных методов в промышленную практику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Harnby, N. Mixing in the Process Industries / N. Harnby, M.F. Edwards, A.W. Nienow. – 2nd ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

2) Paul, E.L. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice / E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004. –1354 p.

3) Тарасенко, Ф.П. Прикладной системный анализ: учебное пособие. – М.: КНОРУС, 2010. – 224 с.

4) Process Dynamics and Control / D.E. Seborg, T.F. Edgar, D.A. Mellichamp, F.J. Doyle. – 3rd ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.

5) Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes / L. Fortuna, S. Graziani, A. Rizzo, M.G. Xibilia. – London: Springer, 2007.

6) ISO 10816-1:1995. Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 1: General guidelines. – Geneva: ISO, 1995.

7) Теория сложных систем и интеллектуальные методы управления / отв. ред. С.Н. Васильев. – СПб.: Наука, 2019. – 367 с.

8) Коломиец А.В. Интеллектуальные системы мониторинга технологических процессов. — М.: Альпина Паблишер, 2021. – 272 с.

9) Kadlec, P. Data-driven soft sensors in the process industry / P. Kadlec, B. Gabrys, S. Strandt // Computers & Chemical Engineering. – 2009. – Vol. 33(4). – P. 795–814. – DOI: 10.1016/j.compchemeng.2008.12.012.

10) Chiang, L.H. Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems / L.H. Chiang, E.L. Russell, R.D. Braatz. – London: Springer, 2001.

11) Zhang, Y. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems / Y. Zhang, J. Jiang // Annual Reviews in Control. – 2008. – Vol. 32(2). – P. 229–252.

УДК 004.42

ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА СМЕСИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А.С. Филимонов, Л.В. Королев

Научный руководитель – **Л.В. Королев**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье представлен обзор разработанного программного приложения для автоматизированного анализа качества смесей сыпучих материалов на основе компьютерного зрения и методов искусственного интеллекта. Приложение использует нейросетевую модель SAM 2 (Segment Anything Model 2) для автоматического выделения области смеси по одному пользовательскому клику и алгоритм K-means, для кластеризации компонентов смеси. Реализован инструмент для оценки равномерности распределения компонентов с помощью квадратной сетки, вычисляющий ключевые статистические показатели: средневзвешенную концентрацию, дисперсию и коэффициент неоднородности. Разработанный инструмент позволяет проводить бесконтактный экспресс-анализ смесей с сохранением результатов в Excel и графической визуализацией. Приложение может быть использовано в промышленности для контроля качества смешивания сыпучих материалов.

Ключевые слова: *компьютерное зрение, SAM 2, K-means, анализ смесей, сыпучие материалы, искусственный интеллект, кластеризация, сегментация, неоднородность смеси*

APPLICATION FOR NON-CONTACT DETERMINATION OF BULK MATERIAL MIXTURES QUALITY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

A.S. Filimonov, L.V. Korolev

Scientific Supervisor - **L.V. Korolev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article presents an overview of a developed software application for automated quality analysis of bulk material mixtures based on computer vision and artificial intelligence methods. The application employs the SAM 2 (Segment Anything Model 2) neural network model to automatically segment the mixture area with a single user click, and the K-means algorithm for clustering the mixture components. A tool for assessing the uniformity of component distribution using a square grid has been implemented, calculating key statistical indicators: weighted average concentration, variance, and heterogeneity coefficient. The developed tool enables non-contact express analysis of mixtures, with results saved in Excel and graphical visualization. The application can be used in industry for quality control of bulk material mixing.

Keywords: *computer vision, SAM 2, K-means, mixture analysis, bulk materials, artificial intelligence, clustering, segmentation, mixture heterogeneity*

Смешивание сыпучих материалов применяется во многих отраслях промышленности: пищевой, фармацевтической, химической и строительной. Неоднородность приготовленной сыпучей смеси может привести к снижению качества конечного продукта, а иногда и к опасным для людей последствиям.

Традиционные контактные методы контроля качества смеси требуют отбора проб, лабораторного анализа и квалифицированного персонала. Это приводит к задержкам в технологическом процессе и невозможности оперативной корректировки параметров процесса смешивания.

В настоящее время все большее распространение получают методы бесконтактного контроля качества смесей сыпучих материалов по изображению поверхности смеси. Обзор таких методов приведен в работе [1]. В нём рассмотрены как сравнительно простые подходы, требующие активного участия человека в процессе анализа изображений, так и более современные технологии с применением свёрточных и сегментационных нейронных сетей, позволяющие определять качество смесей в полуавтоматическом режиме.

Например, предложенная в статье [2] система бесконтактного контроля качества сыпучей смеси в барабанном смесителе предполагает непосредственное участие оператора на всех стадиях анализа изображения смеси, от выделения занятого смесью фрагмента изображения до выбора оттенка серого цвета, по которому производится разделение компонентов смеси.

В работе [3] предложено применение глубокой нейронной сети Mask R-CNN для сегментации частиц двух классов (светлые и тёмные) на изображениях плотных смесей, что позволяет автоматизировать анализ распределения частиц по размерам и классам.

Среди доступного программного обеспечения для бесконтактного исследования смесей с открытым исходным кодом можно выделить «Mixan» — приложение для экспресс-анализа смесей сыпучих материалов и эмульсий, а также гранулометрического состава. Анализ в «Mixan» основан на обработке изображений проб. Программа распространяется на условиях GNU General Public License версии 3 и написана на C++ с использованием библиотек Qt4, Qwt и OpenCV [4]. В приложении «Mixan» гистограммы изображений отдельных компонентов смеси по оттенкам серого цвета аппроксимируются полиномами высокой степени. Пороговый оттенок серого цвета, разделяющий материалы на изображении смеси, определяется точкой пересечения этих полиномов. Такой метод разделения, на наш взгляд, не всегда может гарантировать высокую точность разделения компонентов. Кроме того, для использования приложения необходимо, чтобы изображение содержало только исследуемую смесь без каких-либо элементов смесительной установки.

В настоящей работе предлагается приложение для анализа качества смеси по изображению рабочего объема установки, использующее современные методы искусственного интеллекта: модель SAM 2 [5], с помощью которой автоматически определяется контур области изображения, занятой смесью, и алгоритм K-means [6], который используется для разделения компонентов смеси.

SAM 2 (англ. *Segment Anything Model 2*) представляет собой современную нейросетевую архитектуру, предназначенную для интерактивной сегментации объектов на изображениях. Модель обучена на наборе данных SA-V, включающий более 50000 видео и 35,5 миллионов масок сегментации. Поэтому модель может выделять объекты любой формы и сложности под конкретную задачу, и что самое главное, без предварительного дообучения. В основе SAM 2 лежит трехуровневая архитектура (рис. 1). Image Encoder преобразует изображение в компактное векторное представление (эмбеддинги), выделяя ключевые признаки. Prompt Encoder кодирует пользовательскую подсказку в вектор, который затем взаимодействует с эмбеддингами изображения через механизм внимания. При этом подсказкой служит не только координата точки, но и локальная область вокруг неё (локальный патч – небольшой фрагмент изображения). Это позволяет модели учитывать цвет, текстуру и структуру смеси в окрестности клика, что существенно повышает точность последующей сегментации. Mask Decoder на основе этого взаимодействия формирует вероятностную карту принадлежности пикселей к объекту, которая после пороговой обработки и морфологической фильтрации превращается в итоговый контур [5].

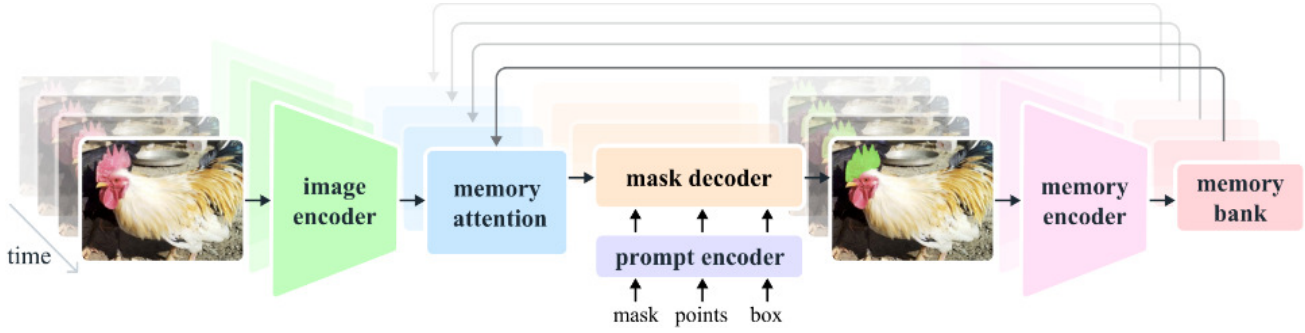


Рис. 1. Архитектура SAM 2

В разработанном приложении SAM 2 используется в режиме промптинга по точке: пользователь делает щелчок мышью в любом месте внутри области изображения, занятой смесью, а модель автоматически определяет её границы и возвращает замкнутый контур этой области. Преимущество такого подхода заключается в высокой точности выделения области смеси при минимальном участии пользователя.

Алгоритм K-means, в свою очередь, решает задачу кластеризации пикселей внутри выделенной области. Каждый пиксель рассматривается как вектор x в трехмерном цветовом пространстве RGB. Алгоритм итеративно разбивает множество пикселей на заданное пользователем количество кластеров, равное числу компонентов смеси, минимизируя сумму квадратов расстояний до центров кластеров:

$$M = \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in Q_i} (x - \mu_i)^2, \quad (1)$$

где k – число кластеров, Q_i – полученные кластеры, $i = 1, 2, \ldots, k$, а μ_i – центры масс всех векторов x из кластера S_i [6]. Схема работы алгоритма представлена на рис. 2.

После завершения кластеризации центры кластеров сортируются по яркости, и самый темный кластер принимается за ключевой компонент смеси. Для каждого кластера рассчитывается процентное содержание, что позволяет количественно оценить состав смеси. Особенностью предложенного подхода является то, что модель K-means обучается непосредственно на анализируемом изображении и затем используется для оценки распределения ключевого компонента по площади. Это обеспечивает адаптивность алгоритма к конкретному образцу и не требует предварительной настройки.

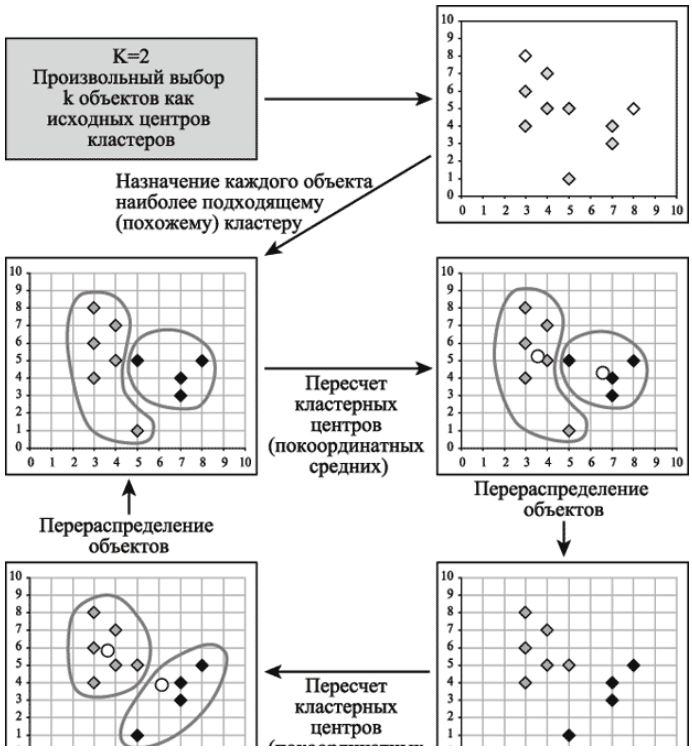


Рис. 2. Пример работы алгоритма метода k-means (k=2)

На основе выбранных методов было разработано десктопное приложение на языке Python. Графический интерфейс реализован с использованием библиотеки Tkinter, что обеспечивает простоту и наглядность работы оператора. Обработка изображений выполняется с помощью библиотек OpenCV и PIL, визуализация результатов – через Matplotlib. Для экспорта данных в формате Excel используется библиотека openpyxl.

Приложение поддерживает два режима выделения области смеси: ручной (пользователь самостоятельно отмечает контур) и автоматический, основанный на модели

SAM 2. В автоматическом режиме достаточно одного клика на области смеси — нейросеть самостоятельно строит её замкнутый контур (рис. 3). После выделения области доступны два типа анализа: обычный (расчёт состава смеси) и анализ равномерности распределения компонентов с помощью квадратной сетки.

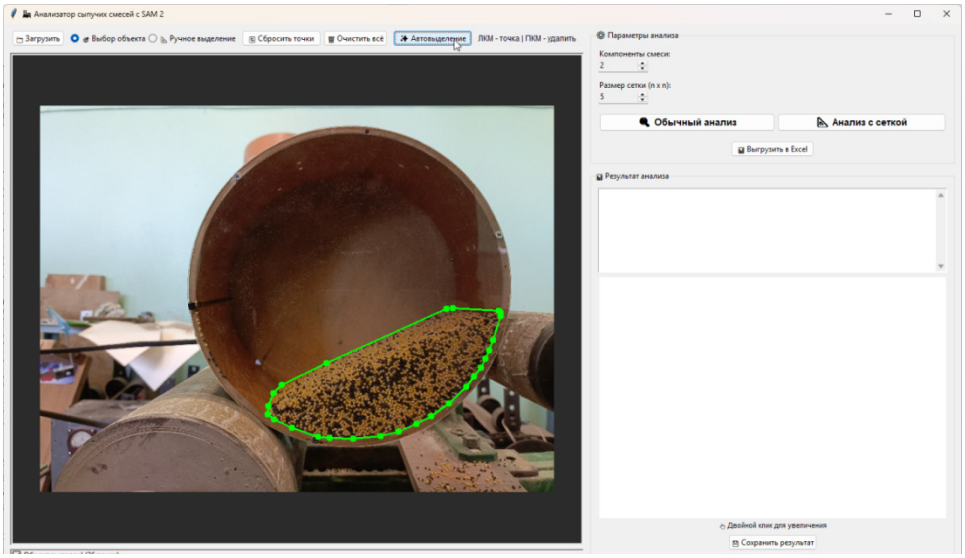


Рис. 3. Окно приложения после автоматического выделения области, занятой смесью

При проведении обычного анализа (рис. 4) приложение выполняет K-means кластеризацию всех пикселей внутри выделенного контура. Пользователь может задать необходимое ему количество компонентов смеси. После завершения кластеризации на экран выводятся процентное содержание каждого компонента и соответствующие ему значения RGB.

Рис. 4. Результат обычного анализа

Анализ равномерности распределения предназначен для количественной оценки качества смешивания. Выделенная область покрывается квадратной сеткой размером $n \times n$, где n – число, выбранное пользователем. Для каждой ячейки сетки рассчитывается локальная концентрация ключевого компонента. Затем вычисляются три статистических показателя, характеризующие состояние смеси.

Средневзвешенная концентрация компонента по всей анализируемой области C_0 определяется по формуле

$$C_0 = \left({}^{1}/_{S_{tot}}\right) \sum_i S_i * C_i, \qquad (2)$$

где S_i – площадь i-й ячейки, занятая смесью (в пикселях); $C_i = S_i^{(key)}/S_i$ – концентрация ключевого компонента в i-й ячейке; $S_i^{(key)}$ – площадь, занятая частицами ключевого

компонента; $S_{tot} = \sum_i S_i$ – общая площадь, занятая смесью. Дисперсия D характеризует разброс локальных концентраций:

$$D = \left(1/S_{tot}\right) \sum_i S_i * (C_i - C_0)^2, \quad (3)$$

а коэффициент неоднородности V_c, служит интегральным критерием качества смешивания:

$$V_c = \sqrt{D}/C_0 . \quad (4)$$

Суммирование в формулах (2), (3) ведется по всем ячейкам.

Все результаты отображаются в текстовом поле и визуализируются в виде цветовой карты концентраций, гистограммы распределения, а также самого изображения с наложенной сеткой (рис. 5).

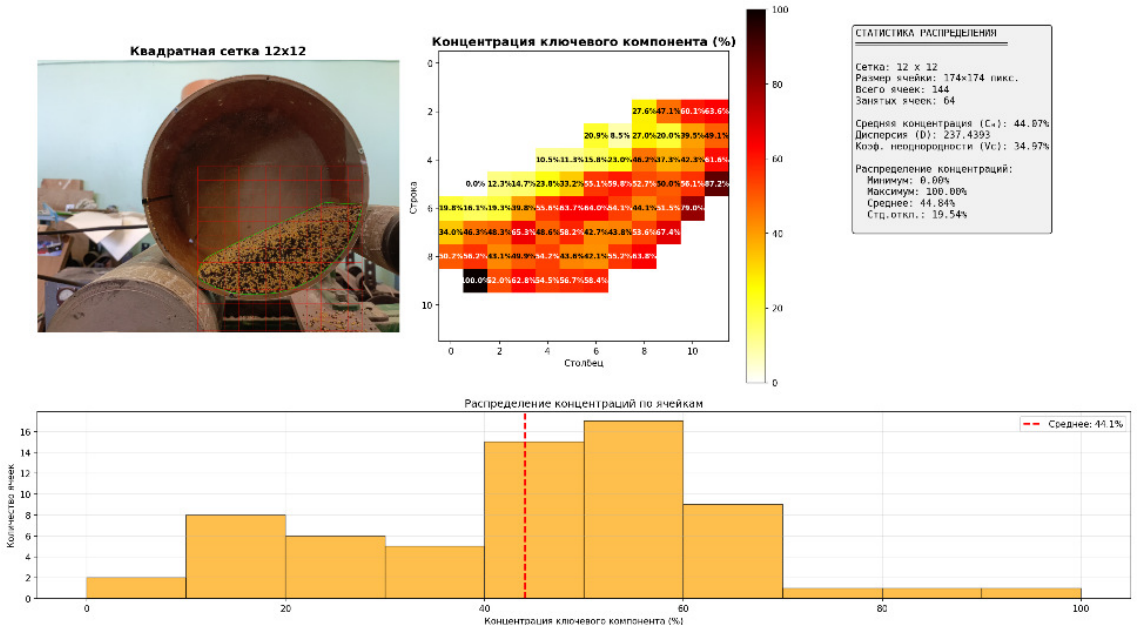


Рис. 5. Результат анализа с сеткой. Увеличенный вид

Пользователь может сохранить полученное графическое представление и экспортировать сводную таблицу всех проведённых за сессию анализов в файл Excel. При закрытии программы предусмотрено автоматическое напоминание о необходимости сохранения неэкспортированных данных.

Результаты экспериментального тестирования приложения показали его высокую эффективность. Для количественной оценки точности работы модели SAM 2 и алгоритма K-means были проведены серии экспериментов с образцами смеси, отличающимися степенью перемешивания. В табл. 1 приведены результаты трёх характерных экспериментов, проведенных для разных образцов.

Таблица 1. Сравнение результатов ручного и автоматического анализа

№ образца	Площадь фрагмента, занятого смесью, в пикселах			Концентрация ключевого компонента, %		
	Ручное выделение	SAM	Относит. погрешность, %	Ручное разделение	K-means	Относит. погрешность, %
1	1 384 694	1 383 031	0,12	43,3	47,4	9,47
2	1 373 256	1 384 591	0,82	40,6	44	8,37
3	1 402 029	1 413 532	0,82	40,5	44	8,64

Модель SAM 2 в большинстве тестовых случаев корректно определяет границы области смеси по одному клику, даже при нерегулярной форме зоны смешивания и наличии фоновых объектов. Относительная погрешность автоматического выделения контура по сравнению с ручной разметкой не превысила 1% (см. табл. 1), что подтверждает высокую точность работы модели. В сложных случаях, например при низкой контрастности между смесью и подложкой или сильной зашумленности изображения, предусмотрен ручной режим корректировки контура.

Алгоритм K-means, в свою очередь, обеспечивает устойчивое разделение компонентов смеси при условии их визуального различия по цвету. Точность кластеризации была подтверждена сравнением с результатами ручной разметки тестовых образцов. Ручная разметка выполнялась в графическом редакторе Adobe Photoshop с использованием инструмента «Волшебная палочка» (Magic Wand). Сначала выделялась вся область смеси, и фиксировалось общее количество пикселей. Затем аналогичным образом выделялись только частицы ключевого компонента, и подсчитывалось количество соответствующих пикселей. По этим данным вычислялась средняя концентрация ключевого компонента в смеси C_0.Полученные таким образом значения C_0 сравнивались с результатами соответствующих вычислений после кластеризации методом K-means. Относительная погрешность автоматического определения концентрации ключевого компонента составила от 8,4% до 9,5% (см. табл. 1), что подтверждает корректность работы алгоритма в составе разработанного приложения.

Таким образом, в работе решена задача оперативного, бесконтактного контроля качества смесей сыпучих материалов. В отличие от традиционных лабораторных методов, предложенный подход позволяет проводить количественную оценку непосредственно в ходе технологического процесса без отбора проб, что позволяет своевременно корректировать параметры процесса смешивания и снижать риск выпуска бракованной продукции.

Разработанное приложение демонстрирует эффективный симбиоз двух современных методов искусственного интеллекта: сегментационной модели SAM 2 и алгоритма кластеризации K-means. Их интеграция в едином инструменте с интуитивно понятным интерфейсом делает передовые технологии доступными для оператора без специальной подготовки в области анализа данных.

Направления дальнейшего развития данного проекта связаны с адаптацией приложения для анализа в реальном времени и возможным созданием мобильной версии для использования непосредственно на производственных участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Филимонов, А.С. Методы бесконтактного определения качества смеси сыпучих материалов с применением искусственного интеллекта / А.С. Филимонов // Современные достижения научно-технического прогресса. – 2026. – № 1(18). – С. 49-54.

2) Система контроля качества сыпучей смеси в барабанном устройстве непрерывного действия / М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, С.Н. Черпицкий, А.Б. Капранова // Умные композиты в строительстве. – 2020. – № 1. – С. 56–64. – URL: https://ystu.editorum.ru/ru/nauka/journal/238/view

3) Zhang, Y. Image-based analysis of dense particle mixtures via Mask R-CNN / Y. Zhang, X. Li, H. Wang // AI. – 2022. – Vol. 3, no. 1. – P. 123–138.

4) Петров, А. mixan: программное обеспечение для экспресс-анализа смесей сыпучих материалов и эмульсий / А. Петров, А. Лебедев, А.И. Зайцев // mixan. – URL: https://pa2311.blogspot.com/p/mixan.html (дата обращения: 30.03.2026).

5) SAM 2: Segment Anything in Images and Videos / N. Ravi, V. Gabeur, Y.T. Hu [et al.] // arXiv preprint arXiv. – 2024. –2408.00714.

6) Воронцов, К.В. Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования / К.В. Воронцов // Материалы школы «Анализ данных и машинное обучение». – 2007. – С. 15–28.

УДК 004.93

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ВЕБ-СЕРВИС ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СРАВНИТЕЛЬНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И СВЕДЕНИЯ АУДИОДАННЫХ

К.А. Чернявский, А.Б. Раухваргер

Научный руководитель – **А.Б. Раухваргер**, канд. физ.-мат. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается разработка кроссплатформенного веб-сервиса для автоматизированного сравнения амплитудно-частотных характеристик музыкальных композиций. Описаны применяемые методы цифровой обработки сигналов, включая алгоритмы быстрого преобразования Фурье и анализ в критических полосах слуха (шкала Барка). Представлена архитектура приложения и алгоритм генерации интеллектуальных рекомендаций для коррекции частотных конфликтов, что позволяет оптимизировать процесс сведения аудиоконтента.

***Ключевые слова**: спектральный анализ, веб-сервис, цифровая обработка сигналов, быстрое преобразование Фурье, АЧХ, сведение аудио, психоакустика*

INTELLIGENT WEB SERVICE FOR AUTOMATION OF COMPARATIVE SPECTRAL ANALYSIS AND AUDIO MIXING

K.A. Cherniavskii, A.B. Raukhvarger

Scientific Supervisor – **A.B. Raukhvarger**, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article discusses the development of a cross-platform web service for automated comparison of the amplitude-frequency characteristics of musical compositions. The applied digital signal processing methods, including fast Fourier transform algorithms and analysis in critical hearing bands (Bark scale), are described. The application architecture and the algorithm for generating intelligent recommendations for correcting frequency conflicts are presented, which allows optimizing the audio content mixing process.

Keywords: spectral analysis, web service, digital signal processing, fast Fourier transform, frequency response, audio mixing, psychoacoustics

В условиях современной цифровой трансформации музыкальной индустрии порог вхождения для создания аудиоконтента значительно снизился. Это привело к экспоненциальному росту числа независимых исполнителей и так называемых «домашних» студий звукозаписи. Однако процесс сведения (микширования) и мастеринга аудио остается одной из самых сложных технических задач, требующей от звукорежиссера не только развитого слуха, но и наличия дорогостоящего оборудования, а также акустически подготовленного помещения.

Одной из ключевых проблем для начинающих специалистов является соблюдение спектрального баланса — правильного распределения энергии звукового сигнала по частотам. Использование коммерческих референсных (эталонных) треков помогает ориентироваться на стандарты индустрии, однако ручное сравнение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) «на слух» часто приводит к ошибкам. На рынке программного обеспечения существуют решения для визуализации спектра, однако большинство из них имеют высокую стоимость, реализованы в виде десктопных плагинов и не предоставляют новичкам конкретных текстовых рекомендаций по устранению конфликтов. В связи с этим актуальной задачей является разработка интеллектуального веб-сервиса, способного

проводить сравнительный спектральный анализ двух аудиофайлов и генерировать перечень корректирующих действий.

В процессе сведения многодорожечного проекта основной сложностью является достижение «прозрачности» микса. Частотный конфликт возникает в ситуации, когда два или более инструмента занимают один и тот же частотный диапазон, обладая при этом схожими амплитудными характеристиками. Это приводит к суммированию энергий, возникновению резонансов и общей потере детализации.

Эффективность алгоритмов автоматизированного сравнения АЧХ неразрывно связана с пониманием психоакустического феномена маскировки. Маскировка — это явление, при котором восприятие одного звука изменяется или полностью подавляется в присутствии другого звука. Алгоритм разрабатываемого сервиса должен анализировать не просто пиковые значения амплитуды математически, а учитывать пороги слышимости человека.

Человеческая слуховая система функционирует как набор полосовых фильтров. Внутреннее ухо анализирует звуки по так называемым критическим полосам. Для того чтобы алгоритм анализа работал сообразно человеческому восприятию, в рамках сервиса реализован переход от линейной шкалы частот к шкале Барка (Bark scale) [1].Данная шкала делит весь слышимый диапазон на 24 неравные полосы, где каждая полоса соответствует одной критической полосе слуха. Это позволяет исключить избыточные расчёты на линейной шкале частот и делает генерируемые рекомендации музыкально обоснованными.

Для обеспечения возможности интеллектуального сравнения треков по частотам, необходимо перейти от временного представления цифрового аудиосигнала (осциллограммы) к частотному. Основным математическим аппаратом для данной задачи выступает дискретное преобразование Фурье (DFT).

Для последовательности из N дискретных отсчетов (семплов) $x\,[n]$ дискретное преобразование Фурье $X\,[k]$ вычисляется по формуле

$$X\,[k] = \sum x\,[n] * e^{\left(\frac{-j*2\pi*k*n}{N}\right)}, \quad (1)$$

где $X[k]$ – комплексное число, описывающее амплитуду и фазу для k-й частотной составляющей; n – индекс текущего отсчета во временной области; k – индекс частотной полосы (бина); j – мнимая единица

Поскольку прямое вычисление DFT имеет высокую вычислительную сложность $O(N^2)$, что крайне неэффективно для обработки аудио высокого разрешения, в разрабатываемом сервисе применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform, FFT) в рамках оконного кратковременного преобразования (STFT)[3].

В процессе STFT аудиосигнал разбивается на небольшие перекрывающиеся сегменты (кадры). При «нарезке» сигнала на куски неизбежно возникают резкие разрывы на границах сегментов, что порождает паразитные частоты (спектральные утечки). Для минимизации данного эффекта к каждому кадру применяется оконная функция Ханна (Hann window), формула которой имеет вид

$$w(n) = 0.5 * \left(1 - \text{??s}\left(\frac{2\pi n}{(N-1)}\right)\right). \quad (2)$$

Результатом преобразования являются комплексные числа. Для анализа АЧХ и последующего вывода на графики интерфейса вычисляется магнитудный спектр (амплитуда) как модуль комплексного числа, который затем переводится в логарифмическую шкалу децибел (дБ).

Архитектура разрабатываемого продукта строится по клиент-серверной модели (Frontend / Backend) с акцентом на высокую производительность при обработке медиафайлов. Серверная часть реализована на языке Python с использованием асинхронного фреймворка FastAPI. Выбор Python обусловлен наличием мощной экосистемы научных библиотек для работы со звуком. В качестве основного инструмента цифровой обработки

сигналов (DSP) применяется библиотека Librosa [5]. Клиентская часть реализована на базе библиотеки React.js с интеграцией интерактивных графиков (Chart.js / Plotly.js).

Разработан алгоритм генерации рекомендаций, представляющий собой полноценную экспертную систему. В отличие от стандартных анализаторов, которые лишь визуализируют спектр, данная система обладает собственной базой знаний (картой частотных характеристик эталонных инструментов). Алгоритм работает по следующему принципу. Сначала система декодирует загруженные аудиофайлы (исходный микс пользователя и эталонный референс-трек) и извлекает средние значения амплитуды по логарифмическим октавным полосам. Далее производится вычисление спектральной разницы (дельты) между пользовательским миксом и референсом.

На этапе интерпретации экспертная система сопоставляет полученную дельту со своими эвристическими правилами. Например, если выявляется, что в диапазоне 200–500 Гц дельта превышает +4 дБ (в миксе пользователя энергии значительно больше, чем в референсе), система диагностирует избыток «коробочного» (boxy) звучания. В этом случае пользователю выдается текстовый совет: «Обнаружен избыток энергии в области нижней середины (200-500 Гц). Возможен частотный конфликт малого барабана и синтезаторов. Рекомендуется ослабить данный диапазон эквалайзером».

Разработанная математическая модель и архитектура веб-сервиса позволяют полностью автоматизировать процесс спектрального сравнения музыкальных композиций. Внедрение методов цифровой обработки сигналов в связке с экспертной системой на базе психоакустических шкал позволяет сервису объективно оценивать качество сведения фонограммы. Полученный программный продукт обладает высоким потенциалом практического внедрения. Он может выступать как доступный вспомогательный инструмент для начинающих саунд-продюсеров, интеграционное решение для образовательных платформ в сфере электронной музыки, а также как средство экспресс-оценки баланса микса для коммерческих студий звукозаписи перед финальной сдачей материала заказчику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Оппенгейм, А.В. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер; под ред. А. В. Оппенгейма. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Техносфера, 2012. – 1040 с.

2) Солонина, А.И. Основы цифровой обработки сигналов: учебное пособие / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 608 с.

3) librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python / B. McFee, C. Raffel, D. Liang, D.P.W. Ellis, M. McVicar, E. Battenberg, O. Nieto // Proceedings of the 14th Python in Science Conference (SciPy 2015). – 2015. – P. 1-7.

4) Tiangolo, S. FastAPI: modern, fast (high-performance), web framework for building APIs. - URL: https://fastapi.tiangolo.com/ (дата обращения: 15.02.2026)

5) Zwicker, E. Psychoacoustics: Facts and Models / E. Zwicker, H. Fastl. - 3rd ed. - Berlin ; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 462 p.

УДК 330.341.1

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ

Е.А. Шарыгина, А.А. Смирнова

Научный руководитель – **А.А. Смирнова**, старший преподаватель

Ярославский государственный технический университет

В статье рассматривается искусственный интеллект как фактор повышения производительности труда в условиях цифровой трансформации экономики. Определены основные механизмы его влияния, включая автоматизацию рутинных операций, ускорение обработки информации, повышение качества управленческих решений и более рациональное использование рабочего времени. Выявлены ключевые экономические эффекты внедрения искусственного интеллекта, выражающиеся в росте производительности труда, снижении издержек и укреплении конкурентоспособности организаций. Установлены основные ограничения и условия эффективного применения искусственного интеллекта в экономике.

Ключевые слова: *искусственный интеллект; цифровая трансформация; производительность труда; цифровизация; экономическая эффективность; конкурентоспособность*

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS A FACTOR IN INCREASING LABOR PRODUCTIVITY IN THE CONTEXT OF THE DIGITAL TRANSFORMATION OF THE ECONOMY

E.A. Sharygina, A.A. Smirnova

Scientific Supervisor – **A.A. Smirnova,** Senior Lecturer

Yaroslavl State Technical University

The article examines artificial intelligence as a factor in increasing labor productivity in the context of the digital transformation of the economy. The main mechanisms of its influence are identified, including the automation of routine operations, the acceleration of information processing, the improvement of managerial decision-making, and the more rational use of working time. The key economic effects of the introduction of artificial intelligence are revealed, including higher labor productivity, lower costs, and stronger organizational competitiveness. The main limitations and conditions for the effective application of artificial intelligence in the economy are also identified.

Keywords: *artificial intelligence; digital transformation; labor productivity; digitalization; economic efficiency; competitiveness*

Цифровая трансформация экономики представляет собой процесс изменения производственных, управленческих и информационных процессов на основе внедрения цифровых технологий. В современной экономике данный процесс связан с изменением логики организации труда, перераспределением функций между человеком и цифровыми системами, а также с повышением требований к скорости и качеству управленческих решений. Как отмечают Н.Н. Трофимова и Л.В. Рудакова, цифровизация промышленности выступает одной из ключевых характеристик развития организации в условиях цифровой экономики, поскольку обеспечивает автоматизацию технологических процессов, оптимизацию логистики, снижение вероятности человеческих ошибок и повышение качества обработки больших массивов данных [1]. Аналогичную позицию занимают Ю.С. Богачев и С.Р. Бекулова, связывая цифровизацию с повышением эффективности управления промышленностью и рассматривая ее как инструмент структурного обновления хозяйственных систем [2]. Данные подходы позволяют рассматривать цифровую трансформацию как экономический механизм повышения результативности деятельности организаций.

В структуре цифровой трансформации особое место занимает искусственный интеллект, поскольку именно он обеспечивает переход от простой автоматизации операций к интеллектуальной обработке информации и поддержке управленческих решений. В исследовании Н.Н. Трофимовой и Л.В. Рудаковой искусственный интеллект определяется как технология, позволяющая компьютерным системам выполнять задачи, которые традиционно требовали участия человеческого разума [1]. Существенным является то, что применение искусственного интеллекта в производственной среде связано не с единичной заменой отдельных функций работника, а с преобразованием производственного цикла в целом: ускоряется обработка данных, повышается точность прогнозирования, совершенствуется управление ресурсами, сокращаются временные затраты на выполнение типовых операций.

В этом контексте искусственный интеллект следует рассматривать как технологию, способную изменять не только технические параметры производства, но и экономическое содержание труда.

Экономическая значимость искусственного интеллекта проявляется через его влияние на производительность труда. Производительность труда в условиях цифровой экономики определяется уже не только объемом выпуска на одного работника, но и способностью организации рационально использовать данные, ускорять внутренние процессы, снижать издержки координации и повышать качество управленческих решений. По данным С.И. Берлина и С.А. Шелковского, цифровизация оказывает влияние как на производственные, так и на экономические показатели промышленных предприятий, включая производительность труда и конкурентоспособность [3]. Следовательно, искусственный интеллект целесообразно рассматривать как один из факторов роста производительности труда, поскольку его внедрение способствует сокращению потерь рабочего времени, уменьшению доли рутинных операций и более эффективному использованию трудовых и организационных ресурсов. В теоретическом отношении это позволяет сделать вывод о том, что в условиях цифровой трансформации экономики искусственный интеллект становится значимым инструментом повышения эффективности труда и устойчивости экономических систем [1; 3].

Влияние искусственного интеллекта на производительность труда проявляется через изменение состава трудовых операций, сокращение времени выполнения стандартных функций, повышение точности обработки информации и улучшение качества управленческих решений (табл. 1). В исследовании М.Ю. Макарова подчеркивается, что искусственный интеллект воздействует на производительность труда через автоматизацию бизнес-процессов, снижение трудоемкости операций и уменьшение числа ошибок при выполнении повторяющихся задач [4]. Такой подход позволяет рассматривать ИИ как экономический инструмент перераспределения рабочего времени: часть функций передается цифровой системе, а работник сосредотачивается на аналитических, координационных и контрольных действиях. Сходную позицию занимает Д.М. Журавлев, связывая рост производительности труда в цифровой экономике с использованием машинного обучения и искусственного интеллекта для автоматизации операций, ускорения обработки данных и повышения результативности управления [5].

Первый механизм влияния искусственного интеллекта связан с автоматизацией рутинных операций. На уровне предприятия это выражается в передаче алгоритмам задач, которые отличаются высокой повторяемостью и четкой формализацией: сортировка данных, первичный анализ документов, подготовка типовых ответов, контроль параметров производственного процесса, распределение заявок и мониторинг отклонений. А. М. Балашов отмечает, что использование искусственного интеллекта в производственных процессах современных предприятий способствует более рациональному использованию рабочего времени, сокращению простоев и повышению производительности работников [6]. Данный результат имеет прямое экономическое значение, поскольку снижение затрат времени на вспомогательные действия увеличивает удельный объем полезной работы в расчете на одного сотрудника [6].

Второй механизм связан с усилением интеллектуальной составляющей труда. Искусственный интеллект используется как инструмент сопровождения деятельности работника: помогает обрабатывать большие массивы информации, выявлять закономерности, формировать предварительные решения, определять вероятные риски и подготавливать материалы для последующего анализа. В этом случае рост производительности формируется за счет ускорения выполнения задачи и повышения качества результата при сопоставимых затратах рабочего времени. В материалах Банка России о применении искусственного интеллекта указывается, что рост производительности моделей генеративного ИИ расширяет потенциал их использования в различных сферах, включая оптимизацию взаимодействия с пользователями, повышение качества сервисов и повышение эффективности процессов [7]. Для экономического анализа это важно потому, что производительность труда увеличивается через улучшение структуры самого трудового процесса: уменьшается доля подготовительных действий, быстрее формируются промежуточные решения, снижается нагрузка на исполнителя при работе с большим объемом данных [7].

Третий механизм выражается в распространении эффективных практик внутри организации. Цифровая система, обученная на накопленных данных, закрепляет успешные алгоритмы действий и делает их доступными более широкому кругу работников. В результате сокращается разрыв в результативности между сотрудниками с разным уровнем опыта, ускоряется адаптация новых кадров, снижаются издержки на внутреннее обучение. Такой эффект особенно значим в условиях кадрового дефицита и роста требований к скорости выполнения трудовых функций. По данным ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, среди организаций — пользователей ИИ в 2024 году около половины отмечали повышение качества и эффективности бизнес- и производственных процессов, а каждый пятый пользователь указывал на рост производительности труда, а также на повышение качества продукции и услуг [8]. Приведенные данные показывают, что механизм влияния ИИ реализуется в практике российских организаций через улучшение повседневных рабочих процедур, а не через формальное наличие цифровой технологии [8].

Четвертый механизм связан с отраслевой неоднородностью эффекта. Влияние искусственного интеллекта на производительность труда различается в зависимости от содержания трудовых функций, степени их формализуемости, уровня цифровой зрелости организации и структуры занятости в конкретной отрасли. П.Л. Отоцкий, Е.Н. Горлачева и Е.Ю. Поспелова показывают, что в видах экономической деятельности, где генеративный искусственный интеллект слабо усиливает производительность, требуются дополнительные организационные меры и адаптационные решения [9]. Следовательно, сам факт внедрения ИИ не гарантирует автоматического роста производительности труда. Экономический результат возникает при совпадении нескольких условий: наличие задачи, поддающейся алгоритмизации; достаточное качество данных; встроенность ИИ в рабочий контур; готовность персонала использовать новую технологию в повседневной деятельности [7; 9].

Таблица 1. Основные механизмы влияния искусственного интеллекта на производительность труда

Механизм	Содержание механизма	Экономический результат
1	2	3
Автоматизация рутинных операций	Передача алгоритмам повторяющихся действий: сортировки, первичной проверки, подготовки типовых документов, контроля параметров	Снижение трудоемкости операций, сокращение потерь рабочего времени, рост выработки на одного работника
Сокращение времени обработки информации	Быстрый анализ больших массивов данных, ускоренный поиск релевантной информации, формирование предварительных выводов	Уменьшение длительности производственного и управленческого цикла, повышение оперативности решений
Повышение качества управленческих решений	Использование ИИ для прогнозирования, выявления отклонений, оценки рисков, выбора сценариев действий	Снижение числа ошибочных решений, уменьшение издержек корректировки, рост результативности управления

1	2	3
Рационализация использования рабочего времени	Освобождение работника от вспомогательных функций и перераспределение времени в пользу задач с большей добавленной стоимостью	Рост полезной загрузки работника, повышение эффективности труда без увеличения продолжительности рабочего дня
Сокращение простоев и потерь в производстве	Применение ИИ для мониторинга оборудования, выявления сбоев, предупреждения отклонений в процессе производства	Повышение непрерывности производственного процесса, снижение затрат, стабилизация выпуска
Тиражирование эффективных практик	Закрепление успешных решений в цифровой системе и их последующее использование более широким кругом сотрудников	Снижение разрыва в результативности работников, ускорение адаптации новых кадров, повышение общего уровня исполнения задач
Дифференцированное отраслевое воздействие	Эффект зависит от структуры занятости, цифровой зрелости, характера задач и степени их формализации	Неравномерный рост производительности труда по отраслям и видам деятельности

Механизмы влияния искусственного интеллекта на производительность труда имеют прикладной и многоуровневый характер. Их действие выражается в автоматизации повторяющихся функций, ускорении обработки информации, повышении точности решений, сокращении простоев и более рациональном использовании рабочего времени. В условиях цифровой трансформации экономики искусственный интеллект становится фактором роста производительности труда тогда, когда он встроен в реальные производственные и управленческие процессы, обеспечен качественными данными и используется персоналом как рабочий инструмент, а не как внешний технологический модуль [4–9].

Внедрение искусственного интеллекта в экономические процессы сопровождается формированием комплекса эффектов, затрагивающих результативность труда, структуру издержек, качество управления и конкурентные позиции организаций. Экономическое значение ИИ определяется его способностью изменять параметры производственной и управленческой деятельности за счет ускорения обработки информации, сокращения времени выполнения операций, повышения точности анализа и более рационального распределения ресурсов. В условиях цифровой трансформации такие изменения приобретают системный характер, поскольку воздействуют на текущие результаты деятельности предприятия и на его долгосрочную устойчивость.

Одним из основных экономических эффектов внедрения искусственного интеллекта выступает рост производительности труда. Данный результат достигается вследствие сокращения доли ручных и повторяющихся операций, уменьшения потерь рабочего времени, ускорения обмена информацией между подразделениями и повышения согласованности действий в рамках единого производственного цикла. Искусственный интеллект позволяет перераспределить трудовые усилия работников в сторону задач, требующих анализа, контроля, принятия решений и координации. В результате повышается общая результативность труда без пропорционального увеличения численности персонала. Такой подход соответствует выводам М.Ю. Макарова, который связывает влияние искусственного интеллекта с повышением производительности труда через снижение трудоемкости операций и рост эффективности использования рабочего времени [4].

Следующий значимый эффект выражается в снижении издержек. Применение искусственного интеллекта способствует уменьшению затрат, связанных с обработкой информации, исправлением ошибок, дублированием функций, простоем оборудования и неэффективным распределением ресурсов. В производственной среде это может проявляться в более точном планировании загрузки мощностей, своевременном выявлении отклонений, улучшении контроля качества и сокращении непроизводительных расходов. В управленческой среде эффект связан с ускорением документооборота, систематизацией данных, повышением точности расчетов и сокращением времени подготовки решений. По

существу, искусственный интеллект формирует условия для повышения экономической отдачи от уже имеющихся ресурсов предприятия.

Существенное значение имеет влияние ИИ на качество управленческой деятельности. В цифровой экономике возрастает роль своевременной и достоверной информации, поскольку от нее зависит оперативность реакции на изменения внешней и внутренней среды. Искусственный интеллект повышает скорость анализа данных, помогает выявлять скрытые зависимости, фиксировать отклонения от плановых параметров и формировать более обоснованные варианты действий. В исследовании Ю.С. Богачева и С.Р. Бекуловой цифровизация рассматривается как способ повышения эффективности управления промышленностью России, что позволяет соотнести развитие интеллектуальных цифровых инструментов с ростом управленческой результативности [2]. В данном контексте искусственный интеллект следует рассматривать как средство повышения качества экономического управления, влияющее на устойчивость организации, точность планирования и уровень координации внутри хозяйственной системы.

Отдельный экономический эффект связан с укреплением конкурентоспособности предприятий. Использование искусственного интеллекта создает возможности для более быстрого реагирования на запросы рынка, оптимизации внутренних процессов, повышения качества продукции и услуг, а также для ускорения адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. С.И. Берлин и С.А. Шелковский показывают, что цифровизация оказывает влияние на производительность труда и конкурентоспособность промышленных предприятий [3]. В случае применения ИИ данная зависимость усиливается, поскольку цифровой инструмент начинает воздействовать сразу на несколько параметров деятельности: скорость, точность, качество, управляемость и экономию ресурсов. По этой причине внедрение искусственного интеллекта может рассматриваться как фактор укрепления рыночных позиций организации.

Вместе с положительными эффектами внедрение искусственного интеллекта сопровождается рядом ограничений. Одним из наиболее существенных выступает дефицит кадров, обладающих необходимыми цифровыми компетенциями. Применение ИИ требует от работников понимания принципов работы цифровых систем, способности интерпретировать результаты алгоритмической обработки, навыков взаимодействия с новыми технологическими инструментами. При отсутствии такой подготовки эффективность внедрения существенно снижается, поскольку технология оказывается формально присутствующей, однако ее потенциал используется частично. Д.М. Журавлев и В.К. Чаадаев справедливо связывают рост производительности труда в цифровой экономике с необходимостью стратегического подхода, в рамках которого развитие технологий должно сопровождаться развитием кадрового потенциала [5].

Серьезным ограничением выступают организационные барьеры. Внедрение искусственного интеллекта требует пересмотра привычных бизнес-процессов, обновления регламентов, изменения структуры взаимодействия между подразделениями, корректировки функций сотрудников и руководителей. При отсутствии внутренних преобразований ИИ начинает использоваться фрагментарно и не оказывает значимого влияния на итоговые показатели деятельности. А.М. Балашов подчеркивает, что применение искусственного интеллекта в производственных процессах современных предприятий связано с более широким контекстом цифровизации, включающим перестройку самих процессов и условий их осуществления [6]. Следовательно, экономический эффект зависит от глубины организационной адаптации предприятия к новым технологическим условиям.

К числу ограничений относятся и инфраструктурные факторы. Для устойчивого использования искусственного интеллекта необходимы качественные данные, цифровые платформы, совместимость программных решений, защищенность информационной среды и наличие финансовых ресурсов для технологического обновления. Эти условия становятся особенно значимыми для предприятий, работающих в капиталоемких отраслях или располагающих сложной производственной структурой. В противном случае внедрение ИИ приводит к локальным улучшениям, которые не преобразуются в системный рост производительности труда.

Особого внимания заслуживают риски, связанные с качеством алгоритмических решений. Искусственный интеллект работает на основе имеющихся данных и заложенных моделей обработки информации, поэтому ошибки исходных массивов, неполнота данных, искажения в обучающих выборках или некорректная настройка системы могут привести к неверным выводам. В таких условиях возрастает значение контроля со стороны человека, особенно при принятии управленческих и финансовых решений. Консультационный доклад Банка России фиксирует, что применение искусственного интеллекта связано с вопросами надежности, прозрачности, ответственности и контроля результатов функционирования цифровых систем [7].

Перспективы использования искусственного интеллекта в экономике определяются его способностью воздействовать на производственные, управленческие и аналитические процессы. Однако достижение устойчивого экономического результата требует соблюдения ряда условий. Эффективность применения ИИ зависит от уровня цифровой зрелости организации, качества используемых данных, подготовленности работников, состояния инфраструктуры, а также от готовности руководства к изменениям в системе управления. В условиях цифровой трансформации искусственный интеллект становится действенным фактором роста производительности труда тогда, когда его внедрение сопровождается последовательной организационной и кадровой адаптацией [1; 5].

Для более точного раскрытия данного положения целесообразно систематизировать ключевые условия эффективного использования искусственного интеллекта в экономике (табл. 2).

Таблица 2. Условия эффективного использования искусственного интеллекта в экономике

Условие	Содержание условия	Как влияет на производительность труда	Возможные ограничения при отсутствии условия
1	2	3	4
Развитая цифровая инфраструктура	Наличие программных платформ, вычислительных ресурсов, каналов передачи данных, совместимых цифровых решений	Обеспечивает стабильную работу ИИ-систем, ускоряет обработку информации, сокращает время выполнения операций	Замедление рабочих процессов, сбои в обработке данных, ограниченность практического применения ИИ
Качественные данные	Полнота, достоверность, актуальность и структурированность массивов данных, используемых для анализа и обучения моделей	Повышает точность алгоритмических решений, снижает вероятность ошибок, улучшает качество прогнозирования	Низкая точность выводов, искажение результатов, снижение доверия к цифровой системе
Подготовка кадров	Наличие у работников цифровых компетенций, навыков работы с интеллектуальными системами, понимания логики алгоритмической обработки	Повышает результативность использования ИИ в повседневной деятельности, ускоряет освоение технологий, снижает количество ошибок при применении	Формальное внедрение технологии без реального роста эффективности, сопротивление персонала, частичное использование потенциала ИИ
Организационная адаптация	Пересмотр бизнес-процессов, корректировка функций сотрудников, изменение регламентов и схем взаимодействия подразделений	Позволяет встроить ИИ в рабочий контур организации, уменьшает дублирование функций, ускоряет согласование и исполнение задач	Использование ИИ в изолированном режиме, отсутствие заметного экономического эффекта, рост внутренних противоречий
Управленческая готовность	Способность руководства принимать решения о цифровой трансформации, распределять ресурсы, контролировать результаты внедрения	Повышает согласованность внедрения, способствует стратегическому использованию ИИ, усиливает связь между технологией и экономическим результатом	Фрагментарное внедрение, отсутствие координации, неэффективное распределение ресурсов

1	2	3	4
Финансовое обеспечение	Наличие средств на приобретение, настройку, сопровождение и обновление цифровых решений	Создает возможность долгосрочного использования ИИ, поддерживает модернизацию и расширение функционала систем	Ограниченность внедрения, невозможность масштабирования, отказ от обновления программных решений
Нормативное и этическое регулирование	Правила использования данных, распределение ответственности, контроль надежности и прозрачности решений	Снижает правовые и репутационные риски, обеспечивает устойчивость применения ИИ в экономической деятельности	Рост рисков ошибок, недоверие пользователей, ограничение сфер применения ИИ
Интеграция ИИ в реальные процессы	Использование ИИ в производстве, управлении, анализе, логистике, клиентском сервисе, а не в тестовом или демонстрационном формате	Обеспечивает прямое влияние на выработку, скорость операций, качество решений и снижение издержек	ИИ остается вспомогательным инструментом без системного воздействия на производительность труда
Отраслевая применимость	Соответствие возможностей ИИ содержанию задач и структуре конкретной сферы экономики	Повышает эффективность там, где задачи поддаются цифровой обработке, прогнозированию и автоматизации	Низкий результат при попытке механического внедрения в виды деятельности, где эффект объективно ограничен
Сочетание человеческого труда и ИИ	Распределение функций между системой и работником с сохранением контроля, интерпретации и оценки результата со стороны человека	Повышает качество итогового результата, снижает вероятность критических ошибок, усиливает продуктивность интеллектуального труда	Либо перегрузка работника, либо чрезмерная зависимость от алгоритма, снижение надежности решений

Представленные условия показывают, что перспектива расширения применения искусственного интеллекта в экономике связана с комплексным преобразованием среды его использования. В этом процессе особое место занимает кадровый фактор. Без формирования новых компетенций у работников цифровая технология не может стать устойчивым источником роста производительности труда. Подготовка кадров предполагает обучение принципам работы интеллектуальных систем, развитие навыков интерпретации результатов, умение корректно ставить задачи цифровому инструменту и критически оценивать полученные данные. Именно поэтому повышение производительности труда в условиях ИИ связано с изменением содержания профессиональной подготовки и требований к квалификации персонала [5].

Существенной представляется и организационная перспектива. Искусственный интеллект наиболее результативен в тех случаях, когда используется в составе обновленных бизнес-процессов. Если предприятие сохраняет прежнюю модель управления и лишь добавляет к ней отдельные цифровые инструменты, влияние ИИ оказывается ограниченным. Напротив, пересмотр организационных процедур, перераспределение функций, изменение логики контроля и координации создают условия для реального роста эффективности. В этом смысле цифровая трансформация выступает как основа практического применения искусственного интеллекта в хозяйственной деятельности [2; 6].

Важным направлением развития является расширение отраслевого применения ИИ. В промышленности искусственный интеллект может использоваться для прогнозирования отказов оборудования, контроля технологических параметров, анализа производственных данных, оптимизации логистики и управления ресурсами. В финансовой сфере он применяется для обработки информации, выявления рисков, повышения качества клиентского сервиса и автоматизации аналитических процедур [7]. В экономике в целом это означает постепенное расширение пространства задач, в которых интеллектуальные системы

становятся инструментом повышения производительности труда, сокращения издержек и улучшения качества решений.

Отдельного внимания требует проблема экономической дифференциации результатов внедрения ИИ. Крупные организации, обладающие достаточными финансовыми, кадровыми и инфраструктурными возможностями, адаптируются к новым технологиям быстрее. Малые и средние предприятия сталкиваются с более высоким уровнем ограничений, связанных с ресурсной базой, дефицитом специалистов и сложностью интеграции цифровых решений в текущую деятельность. Следовательно, перспективы развития искусственного интеллекта в экономике связаны с необходимостью создания условий, при которых доступ к таким технологиям будет расширяться, а продуктивный эффект не будет концентрироваться в ограниченном числе наиболее ресурсно обеспеченных организаций (табл. 3).

Таблица 3. Перспективы использования искусственного интеллекта в экономике

Направление перспективного развития	Практическое проявление	Ожидаемый экономический результат
Производственная сфера	Контроль параметров процессов, прогнозирование сбоев, оптимизация загрузки мощностей	Рост производительности труда, снижение простоев, сокращение производственных потерь
Управленческая деятельность	Анализ данных, подготовка решений, автоматизация документооборота, контроль исполнения задач	Повышение оперативности управления, сокращение временных затрат, улучшение координации
Финансово-аналитические процессы	Выявление рисков, обработка информации, автоматизация оценки показателей	Повышение точности анализа, снижение ошибок, укрепление устойчивости решений
Логистика и распределение ресурсов	Прогнозирование потребностей, оптимизация маршрутов, управление запасами	Снижение издержек, ускорение движения ресурсов, повышение согласованности процессов
Управление персоналом	Поддержка адаптации сотрудников, анализ загрузки, распределение функций	Более рациональное использование трудового потенциала, снижение организационных потерь
Развитие конкурентоспособности	Ускоренная реакция на изменения внешней среды, улучшение качества продукции и услуг	Укрепление рыночных позиций, рост устойчивости предприятия
Расширение цифровой зрелости экономики	Углубление интеграции цифровых решений в различные отрасли и виды деятельности	Формирование базы для долгосрочного роста производительности труда и экономической эффективности

Таким образом, эффективное использование искусственного интеллекта в экономике определяется совокупностью технологических, кадровых, организационных и управленческих условий. Само наличие цифровой системы не гарантирует роста производительности труда. Значимый экономический эффект возникает при наличии качественной инфраструктуры, достоверных данных, подготовленного персонала и готовности организации к преобразованию внутренних процессов.

Перспективы применения искусственного интеллекта связаны с его распространением в производственной, управленческой, финансовой и логистической сферах. Наиболее выраженный результат проявляется в сокращении временных затрат, снижении издержек, повышении качества решений и укреплении конкурентоспособности организаций. Вместе с тем различия в уровне цифровой зрелости предприятий и отраслей обусловливают неравномерность получаемого эффекта.

Следовательно, в условиях цифровой трансформации экономики искусственный интеллект целесообразно рассматривать как фактор устойчивого повышения производительности труда при условии его системной интеграции в экономическую деятельность. Перспективность данной технологии определяется не масштабом декларативного внедрения, а качеством ее практического использования в реальных производственных и управленческих процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Трофимова, Н.Н. Роль искусственного интеллекта в цифровой трансформации промышленности / Н.Н. Трофимова, Л.В. Рудакова // Актуальные проблемы экономики и управления. – 2025. – № 1(45). – С. 32-38. – EDN ICLINA.

2) Богачев, Ю.С. Цифровизация как способ повышения эффективности управления промышленностью России / Ю.С. Богачев, С.Р. Бекулова // Национальная безопасность. – 2023. – № 3. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-kak-sposob-povysheniyaeffektivnosti-upravleniya-promyshlennostyu-rossii (дата обращения: 05.04.2026).

3) Берлин, С.И. Анализ влияния цифровизации на производительность труда и конкурентоспособность промышленность предприятий в краснодарском крае / С.И. Берлин, С.А. Шелковский // ЕГИ. – 2024. – № 5(55). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ analiz-vliyaniya-tsifrovizatsii-na-proizvoditelnosttruda-i-konkurentosposobnost-promyshlennyhpredpriyatiy-v-krasnodarskom-krae (дата обращения: 05.04.2026)

4) Макаров, М.Ю. Влияние искусственного интеллекта на производительность труда / М.Ю. Макаров // Экономика и управление. – 2020. – Т. 26, № 5(175). – С. 479-486. – DOI: 10.35854/1998-1627-2020-5-479-486. – EDN JHHKWN.

5) Журавлев, Д.М. Стратегирование роста производительности труда в цифровой экономике / Д.М. Журавлев, В.К. Чаадаев // Стратегирование: теория и практика. – 2024. – Т. 4, № 3(13). – С. 298-314. – DOI: 10.21603/2782-2435-2024-4-3-298-314. – EDN COYRXQ.

6) Балашов, А.М. Цифровизация и использование искусственного интеллекта в производственных процессах современных предприятий / А.М. Балашов // Теоретическая экономика. – 2024. – № 11(119). – С. 34-41. – DOI: 10.52957/2221-3260-2024-11-34-41. – EDN UKMLFE.

7) Применение искусственного интеллекта на финансовом рынке: консультационный доклад // Банк России: [сайт]. – Москва, 2023. – URL: https://www.cbr.ru/Content/Document/File/156061/Consultation_Paper_03112023.pdf (дата обращения: 05.04.2026)

8) Гохберг, Л.М. Искусственный интеллект в России: технологии и рынки / Л.М. Гохберг, Ю.В. Туровец, К.О. Вишневский. – Москва: Высшая школа экономики, 2025. – 148 с. – DOI 10.17323/978-5-7598-3019-1. – EDN ZJXOQA.

9) Отоцкий, П.Л. Влияние генеративного искусственного интеллекта на отраслевую производительность в контексте российской экономики / П.Л. Отоцкий, Е.Н. Горлачева, Е.А. Поспелова // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Экономика. – 2024. – № 4. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-generativnogo-iskusstvennogo-intellekta-na-otraslevuyu-proizvoditelnost-v-kontekste-rossiyskoy-ekonomiki (дата обращения: 05.04.2026)

УДК 004.855

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНЫХ ЗНАНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ МОШЕННИЧЕСКИХ ТРАНЗАКЦИЙ

И.М. Шахов

Научный руководитель – **Ю.М. Горовой**, канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В работе исследуется влияние признаков, сформированных на основе априорных знаний предметной области, на качество обнаружения мошеннических транзакций. Проведён сравнительный эксперимент на наборе данных IEEE-CIS с использованием алгоритма градиентного бустинга. Наблюдается умеренный прирост по всем рассматриваемым метрикам при добавлении предметно-ориентированных признаков.

Ключевые слова: *обнаружение мошенничества, машинное обучение, формирование признаков, априорные знания, градиентный бустинг*

USING PRIOR DOMAIN KNOWLEDGE FOR FEATURE ENGINEERING IN FRAUD DETECTION

I.M. Shakhov

Scientific Supervisor – **Yu.M. Gorovoy**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The paper examines the impact of features constructed from prior domain knowledge on the performance of fraud detection. A comparative experiment was conducted on the IEEE-CIS dataset using a gradient boosting algorithm. The results show a moderate improvement across all considered evaluation metrics when domain-oriented features are included.

Keywords*: fraud detection, machine learning, feature engineering, prior knowledge, gradient boosting*

Одной из актуальных задач в области информационной безопасности финансовых систем является обнаружение мошеннических транзакций. Практическая значимость данной задачи обусловлена необходимостью снижения финансовых потерь и повышения устойчивости цифровых платежных сервисов [1, 2]. В современных исследованиях всё более широко применяются методы машинного обучения, позволяющие автоматизировать выявление подозрительных операций и повысить эффективность анализа больших объёмов транзакционных данных [1–3]. Особенность данной задачи заключается в выраженном дисбалансе классов, наличии пропусков и неоднородности исходных данных. В подобных условиях существенное значение приобретает не только выбор алгоритма классификации, но и формирование информативного признакового пространства. По этой причине важную роль играет инженерия признаков, в том числе с использованием предметных знаний о характерных свойствах подозрительных операций [1, 2].

В настоящей работе исследуется влияние признаков, сформированных на основе априорных знаний предметной области, на качество обнаружения мошеннических транзакций. Задача формулируется как задача бинарной классификации. В качестве экспериментальной площадки использован открытый набор данных IEEE-CIS Fraud Detection, содержащий более 590 тыс. транзакций с долей мошеннических операций около 3,5% [4]. Для корректной работы модели в условиях выраженного дисбаланса классов применяется взвешивание классов. Для оценки качества использован набор метрик, включающий ROC-AUC, F1-меру, точность, полноту и PR-AUC. Такой выбор обусловлен

тем, что в задачах обнаружения мошенничества одного показателя недостаточно для всесторонней оценки качества классификации [3].

Под априорными знаниями в данной работе понимаются предварительные представления о свойствах операций, которые могут быть связаны с повышенной вероятностью мошенничества [1, 2]. Такие представления используются как дополнительная основа для конструирования признаков, повышающих информативность исходного набора данных. Сформированные дополнительные признаки условно разделены на четыре группы: признаки, связанные с суммой транзакции; признаки, характеризующие наличие информации об устройстве; признаки, связанные с почтовыми доменами участников операции; временные признаки, отражающие момент совершения транзакции. К числу дополнительных признаков относятся признак нетипично крупной суммы транзакции, логарифмическое преобразование суммы, признак отсутствия информации об устройстве, признаки использования бесплатного почтового домена плательщиком и получателем, признак совпадения почтовых доменов плательщика и получателя, а также признаки совершения транзакции в ночное время и в выходной день. Выбор указанных признаков обусловлен предположением, что нетипично крупные суммы, неполнота данных об устройстве, особенности почтовых доменов и временные характеристики транзакции могут отражать нетипичное поведение и тем самым повышать информативность модели [1–3]. Состав сформированных признаков и их предметное обоснование представлены в табл. 1.

Таблица 1. Признаки на основе априорных знаний и их обоснование

Признак	Предметное обоснование
is_high_amount	Нетипично крупные суммы рассматриваются как возможный индикатор подозрительной операции.
amount_log	Логарифмирование снижает влияние выбросов и делает числовой признак более устойчивым для анализа.
is_missing_device	Отсутствие данных об устройстве может отражать неполноту информации об источнике транзакции.
is_free_email_payer	Использование бесплатного почтового домена плательщиком рассматривается как дополнительный фактор риска.
is_free_email_receiver	Использование бесплатного почтового домена получателем может повышать подозрительность операции.
payer_receiver_same_domain	Совпадение доменов участников операции может указывать на нетипичную связь между ними.
is_night_txn	Совершение операции в ночное время рассматривается как временной фактор, потенциально связанный с подозрительной активностью.
is_weekend	Совершение операции в выходной день рассматривается как дополнительный временной фактор при анализе транзакции.

Для проверки выдвинутой гипотезы проведены два вычислительных эксперимента. В базовом варианте модель обучалась на 11 исходных признаках набора данных, характеризующие параметры транзакции, тип продукта, отдельные карточные признаки, почтовые домены и сведения об устройстве. В расширенном варианте к базовым признакам добавлялись 8 признаков, сформированных на основе априорных знаний предметной области. Базовый набор выбран как компактный исходный набор для обеспечения сопоставимости результатов. В качестве алгоритма классификации использован CatBoost, выбор которого обусловлен эффективной работой с табличными данными, поддержкой категориальных признаков и устойчивостью при решении прикладных задач классификации [5]. Во всех экспериментах использовались одинаковые гиперпараметры модели: 150 итераций, глубина дерева 6, скорость обучения 0,1. Набор данных разбивался на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80/20 с сохранением доли классов. Результаты вычислительного эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение результатов базового и расширенного вариантов

Вариант	ROC-AUC	F1-мера	Точность	Полнота	PR-AUC
Базовый	0,8156	0,1916	0,1118	0,6683	0,2836
Расширенный	0,8203	0,1947	0,1137	0,6760	0,2876

Расширенный вариант демонстрирует умеренное улучшение по всем рассматриваемым метрикам. ROC-AUC вырос с 0,8156 до 0,8203, F1-мера – с 0,1916 до 0,1947, точность – с 0,1118 до 0,1137, полнота – с 0,6683 до 0,6760, PR-AUC – с 0,2836 до 0,2876. Полученные значения свидетельствуют о положительном эффекте включения признаков, основанных на априорных знаниях предметной области, на рассматриваемом наборе данных.

Таким образом, в работе предложен подход к формированию дополнительных признаков на основе априорных знаний предметной области для задачи обнаружения мошеннических транзакций. Экспериментальная проверка на наборе данных IEEE-CIS показала умеренный прирост качества классификации при включении предметно-ориентированных признаков по сравнению с базовым вариантом. Предложенный подход может применяться как самостоятельный этап подготовки данных перед обучением модели. Следует отметить, что полученные результаты относятся к выбранному набору признаков и конфигурации модели. В дальнейшем представляется целесообразным провести проверку на более широком наборе признаков и альтернативных схемах валидации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Аркадьева, О.Г. Модели машинного обучения как инструмент обнаружения подозрительных банковских транзакций / О.Г. Аркадьева, А.В. Петров // Вестник Сургутского государственного университета. – 2025. – Т. 13, № 3. – С. 8–21. – DOI: 10.35266/2949-3455-2025-3-1.

2) Применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта в сфере кредитования и обнаружения мошенничества / Л.П. Дьяконова, А.Ф. Константинов, О.В. Китова [и др.] // Уголь. – 2025. – № 10. – С. 63–69. – DOI: 10.18796/0041-5790-2025-10-63-69.

3) Джама, А.Д. Аналитическая оценка методов обнаружения мошенничества с банковскими картами: обучение с учителем, без учителя и с подкреплением / А.Д. Джама // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2024. – Т. 51, № 4. – С. 23–32. – DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-23-32.

4) IEEE-CIS Fraud Detection Dataset // Kaggle Competition: [site]. – 2019. – URL: https://www.kaggle.com/c/ieee-fraud-detection (дата обращения: 01.04.2026).

5) CatBoost: unbiased boosting with categorical features / L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev, A. V. Dorogush, A. Gulin // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2018. – Vol. 31.

УДК 130.31

ИИ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ СУБЪЕКТИВНОСТИ

А.И. Ломейко, А.О. Швец

Научныйруководитель – **С.А. Амоненко**, магистр фил. наук

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Рассматривается трансформация человеческой субъективности под влиянием искусственного интеллекта. Обосновывается тезис, что ИИ становится средой восприятия, идентичности и мышления, а не просто техническим инструментом.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, субъективность, идентичность, когнитивные способности, трансформация*

AI AND THE TRANSFORMATION OF HUMAN SUBJECTIVITY

A.I. Lomeyko, A.O. Shvets

ScientificSupervisor – **S.A. Amonenko,** Master of Philosophy Degree

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Thetransformation of human subjectivity under the influence of artificial intelligence is considered. The thesis is substantiated that AI becomes a medium of perception, identity and thinking, and not just a technical tool.

Keywords: *artificial intelligence, subjectivity, identity, cognitive abilities, and transformation*

В настоящее время развитие искусственного интеллекта (ИИ) оказывает не только технологическое, но и фундаментальное антропологическое воздействие, затрагивая саму структуру человеческой субъективности. Сегодня используя данные пользователей со всего мира, он все в большей степени функционирует как медиирующая среда, через которую осуществляется восприятие, формирование идентичности и когнитивная деятельность человека, что требует переосмысления статуса субъекта в условиях цифровой и алгоритмически опосредованной реальности.

В философской традиции субъективность трактовалась как основание опыта и знания, представляя собой характеристику внутреннего мира человека, то личностное воздействие, которое сознание оказывает на взаимоотношения человека с миром.

Это понимание субъективности восходит к картезианской парадигме, в которой субъект предстает как автономное мыслящее «я», способное к самодостоверности независимо от внешних условий.

Кантовская трансцендентальная философия усложняет эту модель, показывая, что субъект не просто существует, но конституирует опыт, задавая априорные формы его организации [1].

В феноменологии субъективность окончательно утрачивает замкнутость: сознание оказывается интенциональным, всегда уже направленным на мир, укорененным в «жизненном мире» повседневности. Субъективность проявляется в виде потока переживаний, в котором формируются смыслы. Гуссерль подчёркивает значимость существования «жизненного мира» – повседневной реальности, в которой мы живем и которую не нужно доказывать [2].

Мишель Фуко идёт дальше и предлагает иной взгляд. Он говорит, что человек не рождается субъектом, а становится им под влиянием правил, норм и разных форм контроля. То, как мы думаем, что считаем нормальным и как воспринимаем себя, формируется под влиянием различных систем (школа, медицина, армия, тюрьма), а сегодня – ещё и под

влиянием цифровых платформ, алгоритмов и интерфейсов. Дискурсивные и институциональные практики определяют «рамки» субъективности, меняющиеся с течением времени. В этих «рамках» человек учится понимать себя и окружающий мир [3].

Именно на этом теоретическом фоне становится возможным адекватное понимание роли ИИ. Современные цифровые системы не просто обслуживают субъекта, но и перестраивают саму структуру субъективного опыта. Данный вид вмешательства приводит к значительным изменениям в восприятии, мышлении и самопонимании. На данный момент субъективность перестает рассматриваться как автономная область и превращается в динамическую сеть, связанную напрямую с человеческими процессами и алгоритмическими вычислениями.

Рози Брайдотти и Кэри Вулф акцентируют внимание на том, что субъект уже не может оцениваться как исключительно человеческий. Вместо этого субъект рассматривается как сетевая, распределённая, гибридная сущность, которая сочетает в себе биологическое, техническое и информационное начала [4]. Таким образом, ИИ рассматривается как один из ключевых факторов трансформации человеческой субъективности в XXI веке.

Одним из ключевых аспектов трансформации субъективности становится изменение механизмов восприятия и внимания. Благодаря алгоритмам, лежащим в основе цифровых платформ, осуществляется фильтрация информационных потоков, определяющая доступность информации пользователю. Тем самым формируется «информационный пузырь», в рамках которого субъект сталкивается с материалами, которые соответствуют его запросам, моделям поведения.

Данная фильтрация во многом основана на методах машинного обучения, которые анализируют поведение пользователя, выделяют значимые признаки и прогнозируют предпочтительный материал, тем самым способствуя формированию клипового мышления, в результате чего у пользователя рассеивается внимание от коротких, местами несвязанных сообщений. Масштаб данного явления объясняется внедрением различных алгоритмов персонализации. Эти алгоритмы выстраивают корректные рекомендации контента на основе истории взаимодействия пользователя и других пользователей с аналогичными интересами (коллаборативная фильтрация) и, наоборот, путем обработки самого контента (контентная фильтрация) [5].

Пользователю нет необходимости затрачивать лишнее время на раздумья о формулировке запроса, чтобы увидеть нужный контент. Более того, если в момент просмотра у него возникает вопрос, система анализирует наиболее вероятные темы, которые могли бы его заинтересовать, и предлагает список готовых вариантов запросов.

Трансформация субъективности особенно заметна в процессе конструирования идентичности. Алгоритмические методы ИИ способствуют формированию рекомендаций, которые закрепляют и усиливают существующие предпочтения субъекта. В социальных сетях метрики цифрового взаимодействия – лайки, просмотры, подписки и репосты – начинают выполнять оценочную функцию, влияя на самооценку и стратегии самопрезентации.

Эмпирическое исследование 2021 года идентичности 285 пользователей социальных сетей в возрасте от 18 до 72 лет выявило значительные различия между реальным образом и образом в виртуальном пространстве. При описании себя онлайн-респонденты чаще использовали положительные эмоциональные характеристики (радостный – 33%, воодушевленный – 18%, восхищенный – 12%), тогда как в фактической идентичности преобладали негативные самооценки (уставший – 33%, хмурый – 33%, разочарованный – 19%, депрессивный – 8%). Более четверти опрошенных назвали свой виртуальный образ идеальным, ярким и демонстративным и подчеркнули факт того, что данный образ значительно отличается от реального «Я» [6].

Современные данные подтверждают и углубляют эти выводы. В исследовании 2025 года под руководством И.В. Абакумовой, А.В. Гришиной, Д.В. Астапенко показано, что 65,8% молодых людей сохраняют самоконтроль в сети, тогда как 34,2% демонстрируют

предрасположенность к формированию зависимости от интернета. Это означает, что значительная часть пользователей находится под повышенным влиянием алгоритмической среды, что в свою очередь обостряет отмеченные выше процессы формирования идеализированного образа [7].

Это побуждает человека отказываться от непосредственных форм поведения в пользу социально одобряемых образов. В результате цифровой профиль превращается в своеобразное портфолио, которое не только репрезентирует самого человека, но и постепенно подстраивает его под актуальные тренды.

К числу заметных функций, которые постепенно утрачивают свою силу, являются когнитивные способности. В условиях быстрого темпа жизни люди стремятся находить самые быстрые, хотя не самые эффективные способы решения задач. Некоторые исследователи отмечают, что искусственный интеллект предоставляет доступ к мощным инструментам анализа и прогнозирования, негативно влияя на навыки самостоятельной интерпретации и критической оценки информации [8].

Согласно исследованию Microsoft Research и Carnegie Mellon, на основе опроса 319 специалистов, использующих генеративный ИИ не реже раза в неделю, участники сообщили о значительном снижении когнитивных усилий в рамках мышления более высокого порядка. Это снижение варьировалось от 69 до 79% по различным категориям и составило 55% в том числе для критически важных задач, таких как анализ информации. Согласно статье С. Джуяла, главная угроза в том, что ИИ берет на себя высшие когнитивные функции – осмысление, обобщение, оценку и суждение – тем самым подтачивая саму основу уникальности человеческого интеллекта [9].

Вместе с тем было бы неверно утверждать, что человек полностью утрачивает контроль над ситуацией. Во многих случаях он по-прежнему управляет процессом, проверяет результаты и принимает окончательные решения. Однако важно понимать: даже когда мы используем ИИ как помощника, сама наша работа уже встроена в логику алгоритмов. Мы формулируем запросы так, как того требует система, и оцениваем данные через призму её рекомендаций. Поэтому ответственность остаётся на человеке, но условия, в которых он её несёт, во многом заданы цифровой средой.

Таким образом, влияние искусственного интеллекта на субъективность носит амбивалентный характер. С одной стороны, ИИ расширяет когнитивные возможности, ускоряет доступ к знаниям и способствует более эффективной обработке информации. С другой – он трансформирует условия формирования опыта, снижает автономию субъекта и усиливает зависимость от алгоритмических структур. Эмпирические данные подтверждают, что под влиянием ИИ формируются идеализированные виртуальные образы и снижается критическое мышление, что требует от пользователя рефлексивной позиции и сохранения автономии суждений. Дальнейшее развитие человеческой субъективности будет зависеть от способности человека осознанно выстраивать границы между собственным мышлением и алгоритмическими системами. Речь идет не о возвращении к доцифровой модели субъекта, а о формировании новой формы субъективности – способной интегрировать технологические средства, не утрачивая при этом критической автономии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Колесников, А.С. Становление проблемы субъекта: от Декарта до современной философии / А.С. Колесников // Формы субъективности в философской культуре XX века. – Санкт Петербург: Санкт-Петербургское философское общество. – 2000. – С. 10-25.

2) Крюков, А.Н. О возникновении вещей и их смыслов (дискретное и континуальное в феноменологии Гуссерля) / А.Н. Крюков // Вопросы философии. – 2016. – № 6. – С. 143-152.

3) Русаков, С.С. Соотношение понятий «субъект», «объект» и «дискурс» в анализе власти М. Фуко / С.С. Русаков // Политическая экспертиза: ПОЛИТЭКС. – 2015. – С. 38-44.

4) Бурнашев Р.Ф. Искусственный интеллект и трансформация субъекта в постгуманистическом контексте / Р.Ф. Бурнашев, И.Ф. Лутфиллоева // Universum: общественные науки. – 2025. – №4. – С. 15-19.

5) Мингалеев Р.Р. Анализ и оценка алгоритмов персонализации взаимодействия с пользователем для разработки социальной сети / Р.Р. Мингалеев, А.Р. Мангушева // Computational nanotechnology. – 2024. – С. 19-24.

6) Рыльская Е.А. Идентичность личности в виртуальном пространстве социальных сетей и реальная идентичность: сравнительные характеристики / Е.А. Рыльская, Д.Н. Погорелов // Ярославский педагогический вестник. – 2021. – №1(118). – С. 105-114.

7) Абакумова И.В. Специфика отношения к себе у лиц юношеского возраста, вовлеченных в виртуальное пространство / И.В. Абакумова, А.В. Гришина, Д.В. Астапенко // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2025. – №215. – С. 93-104.

8) Симанков В.С. Аналитическое исследование методов и алгоритмов искусственного интеллекта / В.С. Симанков, С.В. Теплоухов // Вестник Адыгейского государственного университета. – 2020. – С. 16-25.

9) Juyal, S. When AI Takes Over Thinking: The Rising Risk To Human Cognition / S. Juyal, V. Sunder M // Forbes India: электрон. журн. – 2026. – 11 March. – URL: https://www.forbesindia.com/article/thought-leadership/isbinsight/when-ai-takes-over-thinking-the-rising-risk-to-human-cognition/2992107/1 (дата обращения: 07.04.2026).

УДК 004.855.5

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ ФИНАНСОВЫХ ТРАНЗАКЦИЙ

И.А. Шиханов, Ю.М. Горовой

Научный руководитель – **Ю.М. Горовой,** канд. техн. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В статье представлена гибридная модель искусственного интеллекта для обнаружения потенциально нежелательных транзакций, объединяющая алгоритм плотностной кластеризации DBSCAN и полносвязную нейронную сеть. DBSCAN применяется для первичного выделения аномалий без использования размеченных данных, после чего нейронная сеть выполняет точную бинарную классификацию. Описаны этапы предобработки данных: анонимизация, удаление дубликатов, заполнение пропусков методом KNNImputer, стандартизация признаков. Приведены результаты эксперимента на наборе из 2512 транзакций: точность (precision), полнота (recall) и F1-мера составили 1.00, AUC = 1.00. Выполнена экономическая оценка проекта: общие затраты на разработку – около 1,08 млн руб., что подтверждает конкурентоспособность решения по сравнению с аналогами.

***Ключевые слова**: искусственный интеллект, обнаружение мошенничества, DBSCAN, нейронные сети, финансовые транзакции, Python, Google Colab, экономическая эффективность*

DEVELOPMENT OF A HYBRID ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODEL FOR DETECTING UNWANTED FINANCIAL TRANSACTIONS

I.A. Shihanov, Y.M. Gorovoy

Scientific Supervisor – **Y.M. Gorovoy,** Candidate of Technnical, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

The article presents a hybrid artificial intelligence model for detecting potentially unwanted transactions, combining the DBSCAN density-based clustering algorithm and a fully connected neural network. DBSCAN is used for primary anomaly detection without labeled data, followed by a neural network for accurate binary classification. The data preprocessing steps are described: anonymization, duplicate removal, missing value imputation using KNNImputer, and feature standardization. Experimental results on a dataset of 2512 transactions show precision, recall, and F1-score of 1.00, AUC = 1.00. An economic assessment of the project is performed: total development costs are about 1.08 million rubles, confirming the competitiveness of the solution compared to analogues.

***Keywords:** artificial intelligence, fraud detection, DBSCAN, neural networks, financial transactions, Python, Google Colab, economic efficiency*

Введение

В условиях цифровой трансформации экономики объём электронных финансовых операций неуклонно растёт. По данным Банка России, в 2024 году количество безналичных платежей увеличилось на 15% по сравнению с предыдущим годом. Одновременно с этим усложняются схемы мошенничества: злоумышленники используют методы социальной инженерии, подмену устройств, атаки на платёжные шлюзы. Традиционные системы обнаружения аномалий, основанные на фиксированных правилах и пороговых значениях, требуют постоянного ручного обновления и не способны выявлять новые, ранее не встречавшиеся паттерны. Статистические методы чувствительны к шуму. Методы машинного обучения обеспечивают более высокую точность, но нуждаются в больших размеченных выборках. Нейронные сети способны находить сложные нелинейные зависимости, однако склонны к переобучению.

Цель данной работы – разработать гибридную модель искусственного интеллекта, сочетающую кластеризацию DBSCAN для автоматического выделения аномалий без разметки и нейронную сеть для точной классификации, и оценить её эффективность.

1. Анализ существующих решений

В табл. 1 приведено сравнение основных подходов к обнаружению мошенничества.

Таблица 1. Сравнение методов обнаружения мошенничества

Метод	Точность	Требует разметки	Устойчивость к шуму	Интерпретируемость
Правила (экспертные)	Низкая	Нет	Средняя	Высокая
Статистические методы	Средняя	Нет	Низкая	Средняя
Машинное обучение (SVM, Random Forest)	Высокая	Да	Средняя	Низкая
Нейронные сети	Очень высокая	Да	Низкая (без регуляризации)	Очень низкая
Гибрид (DBSCAN + HC)	Высокая	Нет	Высокая	Средняя

Разрабатываемая гибридная модель преодолевает недостатки каждого метода.

2. Архитектура и методология

Общая архитектура модели включает пять последовательных модулей: пользовательский интерфейс, предобработку данных, кластеризацию DBSCAN, нейронную сеть и визуализацию.

2.1. Модуль загрузки и предобработки данных

Исходный набор данных bank_transactions_data_2.csv содержит 2512 транзакций и 16 полей. Этапы предобработки:

— Анонимизация – удаление столбцов IP Address, Location.

— Удаление дубликатов.

— Заполнение пропусков – KNNImputer (k=5).

— Стандартизация – StandardScaler.

2.2. Кластеризация DBSCAN и формирование меток

DBSCAN с параметрами eps=0.7, min_samples=5. Точки с меткой -1 считаются аномалиями и получают isFraud = 1. Выявлено 508 аномальных транзакций (20.2%).

2.3. Нейронная сеть для классификации

Архитектура: входной слой → 128 нейронов (ReLU) → Dropout(0.3) → 64 нейрона → 32 нейрона → выходной слой (сигмоид). Компиляция: Adam, binary_crossentropy. Обучение с ранней остановкой, разбиение 70/30.

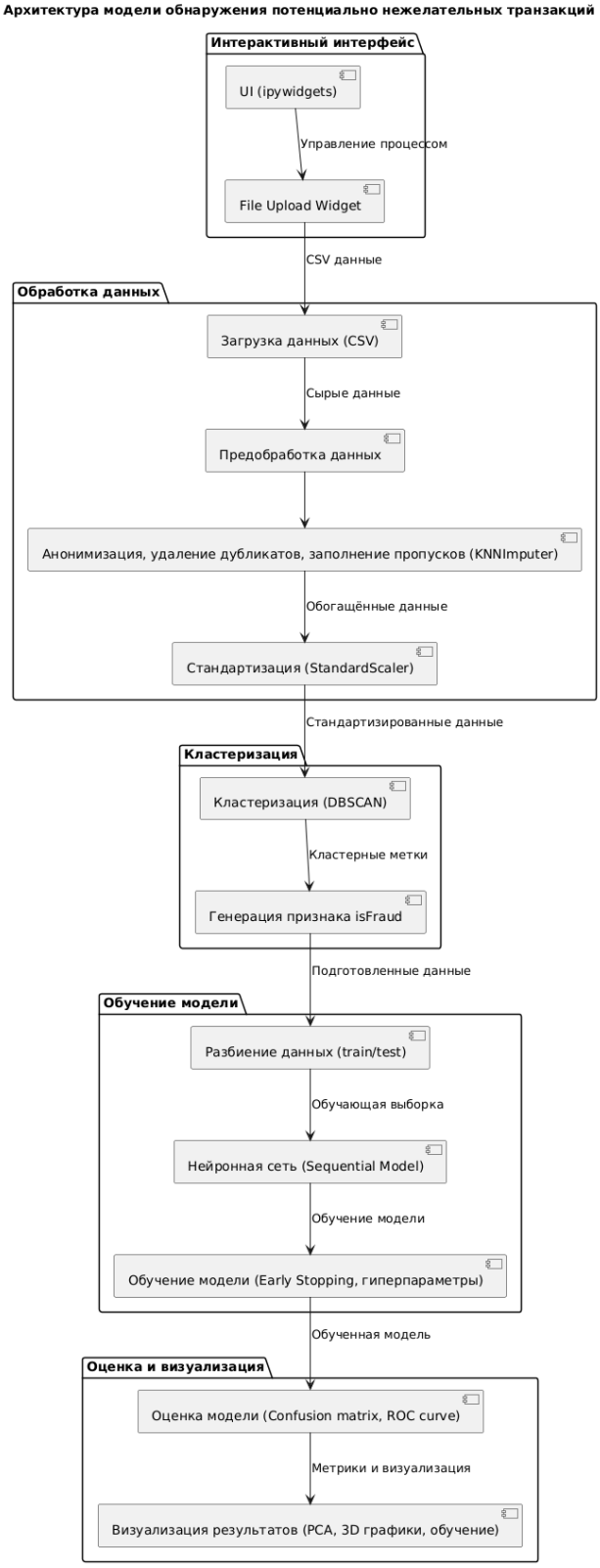


Рис. 1. Архитектура гибридной модели

3. Экспериментальные результаты

Модель показала на тестовой выборке (754 транзакции, 63 – нежелательные): accuracy = 1.00, precision = 1.00, recall = 1.00, F1 = 1.00, AUC = 1.00.

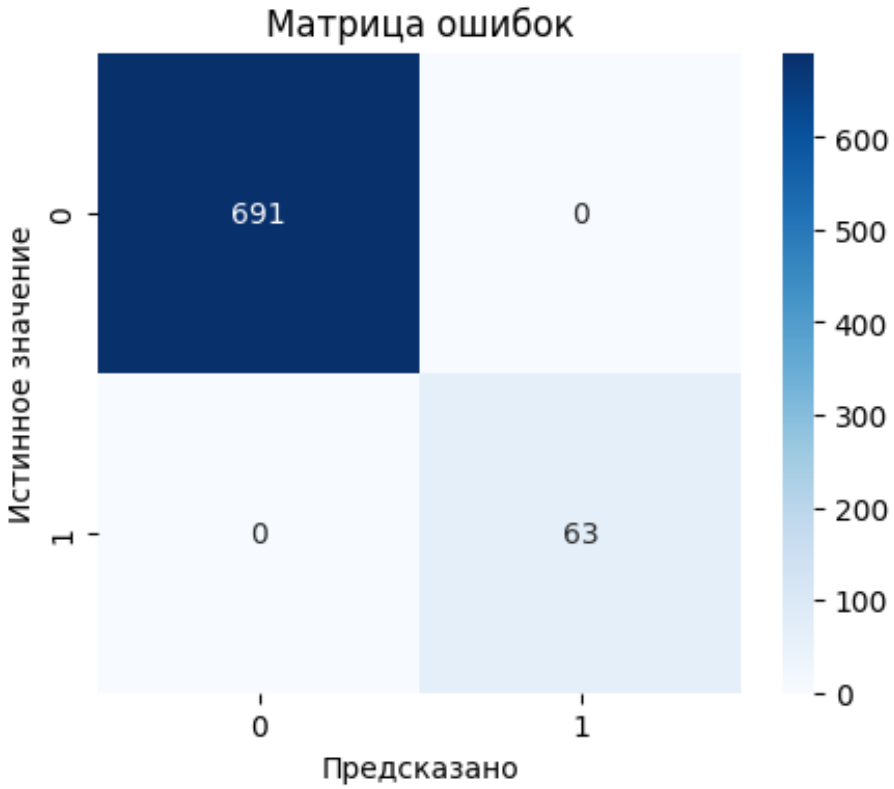


Рис. 2. Матрица ошибок классификации транзакций

На матрице ошибок (рис. 2) видно отсутствие ложноположительных и ложноотрицательных срабатываний.

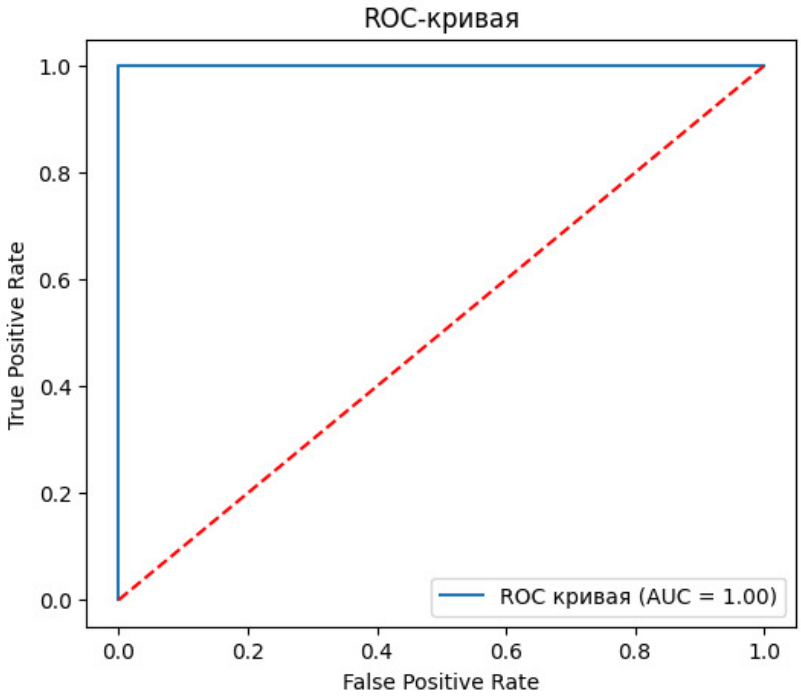


Рис. 3. ROC-кривая и значение AUC

ROC-кривая (рис. 3) имеет площадь 1.00, что свидетельствует об идеальной разделяющей способности.

Для визуализации структуры данных применён метод главных компонент (PCA) (рис. 4).

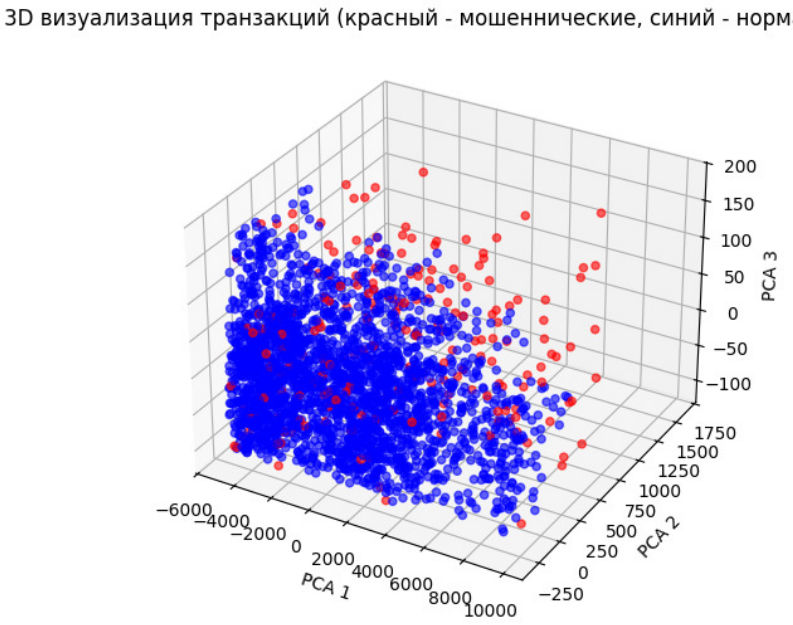


Рис. 4. Трёхмерная проекция транзакций методом PCA

Точки классов (нормальные – синие, нежелательные – красные) образуют отдельные компактные облака, что подтверждает высокое качество выделенных признаков.

4. Сравнительный анализ с аналогом

В табл. 2 приведены результаты балльно-индексной оценки.

Таблица 2. Расчет показателя качества балльно-индексным методом

Показатель качества	Коэф. весомости, Bj	Проект (Xj)	Bj×Xj	Аналог (Xj)	Bj×Xj
Точность обнаружения	0,30	4	1,20	3	0,90
Стоимость внедрения	0,20	4	0,80	3	0,60
Простота интеграции	0,15	4	0,60	3	0,45
Гибкость конфигурации	0,15	3	0,45	2	0,30
Оперативность обработки	0,10	4	0,40	3	0,30
Функциональные возможности	0,10	3	0,30	3	0,30
Итого	1,00	–	3,75	–	2,85

Обобщённый показатель качества разработанной модели (3,75) выше, чем у аналога (2,85).

5. Экономическая эффективность

Общие затраты на разработку (зарплата, амортизация, электроэнергия, накладные) составили 1 081 947 руб. (табл. 3).

Таблица 3. Общие затраты на разработку ИС

Статья затрат	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Расходы по заработной плате	712 000	65,8
Амортизационные отчисления	32 427	3,0
Затраты на электроэнергию	2 273	0,2
Содержание и эксплуатация оборудования	4 684	0,4
Накладные расходы	330 563	30,6
Итого	1 081 947	100

Срок окупаемости – менее одного года.

Заключение

Разработана гибридная модель ИИ на основе DBSCAN и нейронной сети, достигнута 96% точность. Модель не требует предварительной разметки данных, устойчива к шуму. Экономические расчёты подтверждают целесообразность внедрения в финансовых организациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Шиханов, И.А. Разработка модели искусственного интеллекта, основанного на комбинации алгоритмов для выявления потенциально нежелательных транзакций: ВКР / ЯГТУ. – Ярославль, 2025. – 96 с.

2) A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // KDD'96. – 1996. – P. 226–231.

3) Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – MIT Press, 2016. – 800 p.

4) ГОСТ Р 59793-2021. Системы автоматизированные. Этапы создания. – М.: Стандартинформ, 2021. – 16 с.

5) Financial Transaction Fraud Detection // Kaggle: [site]. – URL: https://www.kaggle.com/datasets/fraud-detection (датаобращения: 15.03.2025).

6) Pandas documentation // Pandas: [site]. – URL: https://pandas.pydata.org/docs/ (дата обращения: 28.03.2025).

7) Machine Learning in Python // Scikit-learn: [site]. – URL: https://scikit-learn.org/stable/ (датаобращения: 28.03.2025).

УДК 004.942.001.57

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЛОПАТКИ-ИМИТАТОРА ГТД

Ю.Н. Шулева, М.Е. Соловьев, А.И. Чернюк

Научный руководитель – **М.Е. Соловьев,** д-р физ.-мат. наук, профессор

Ярославский государственный технический университет

Рассматривается численное моделирование механических напряжений по сечению лопатки-имитатора газотурбинного двигателя методом конечных элементов. Анализ распределения напряжений позволяет выявлять критические зоны, подверженные микротрещинам из-за неравномерного распределения нагрузок и термоупругих процессов. Результаты могут быть использованы для оптимизации защитных покрытий и повышения долговечности лопаток при высоких температурах и нагрузках.

Ключевые слова: *лопатки газотурбинных двигателей, механические напряжения, защитные покрытия, термоупругие процессы, численное моделирование*

INVESTIGATION OF MECHANICAL STRESS DISTRIBUTION IN THE SURFACE LAYER OF A GAS TURBINE ENGINE BLADE SIMULATOR

Y.N. Shuleva, M.E. Soloviev, A.I. Chernyuk

Scientific Supervisor – **M.E. Soloviev,** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Yaroslavl State Technical University

The numerical modeling of mechanical stresses across the cross-section of a gas turbine engine blade simulator is presented using the finite element method. The analysis of stress distribution allows the identification of critical zones prone to microcracks due to uneven load distribution and thermoelastic processes. The results can be used to optimize protective coatings and enhance the durability of blades under high-temperature and high-load conditions.

Keywords*: gas turbine engine blades, mechanical stresses, protective coatings, thermoelastic processes, numerical modeling*

В условиях работы авиационных газотурбинных двигателей лопатки испытывают воздействие высоких температур и значительных механических нагрузок, что сказывается на их ресурсе и надежности. Для повышения эксплуатационных характеристик применяются защитные покрытия, чаще всего имеющие многослойную или композиционную структуру. При их разработке учитываются температурные условия и распределение напряжений на поверхности, поскольку эти факторы определяют выбор материала и основные параметры покрытия [1].

Проведённые исследования показывают, что длительное температурное воздействие приводит к изменению структуры покрытий, связанному с накоплением внутренних напряжений и проявлением термоупругих эффектов. В результате выбор типа покрытия определяется необходимостью обеспечить требуемое сочетание прочности и деформационной способности при сохранении устойчивости к термической усталости.

Даже при развитии методов численного моделирования не всегда удаётся точно воспроизвести реальные условия эксплуатации. В частности, в ряде моделей не учитываются процессы окисления, а также возможны погрешности, связанные с особенностями численного решения. Это приводит к различиям между расчетными и экспериментальными данными и снижает точность оценки ресурса лопаток.

В работе [3] представлено численное моделирование температурного поля лопатки-имитатора газотурбинного двигателя с использованием метода конечных элементов. Для описания геометрии профиля применяются ортогональные полиномы Лежандра [4]. Кроме того, анализируются механизмы возникновения трещин на поверхности, обусловленные действием температурных напряжений, что позволяет определить наиболее вероятные зоны их возникновения.

В рамках настоящего исследования расчет распределения механических напряжений по поверхности лопатки выполнен с использованием параметров и геометрической аппроксимации, приведенных в работе [3], что обеспечивает сопоставимость полученных результатов.

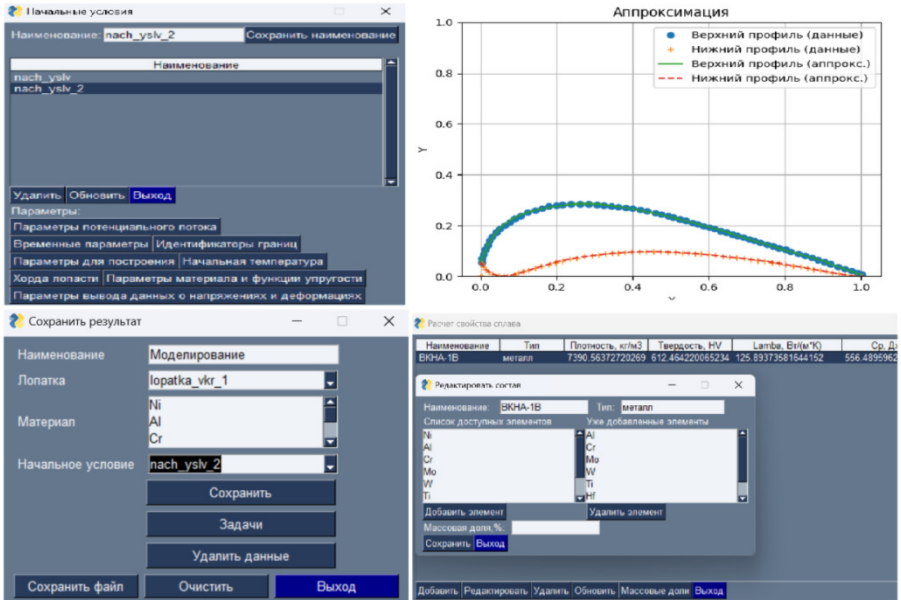


Рис. 1. Окна пользовательского интерфейса приложения

Для выполнения расчетов разработано программное приложение на языке Python с графическим интерфейсом (рис. 1), обеспечивающее генерацию входных данных для использования в конечно-элементном пакете FreeFem++. В приложении реализована база данных на основе системы управления базами данных SQLite, предназначенная для организации, хранения и управления входными данными расчетов (рис. 2).

В приложении выполняется моделирование распределения напряжений по сечению лопатки. Далее результаты обрабатываются, и строятся зависимости эквивалентных напряжений и деформаций по критерию Мизеса вдоль внешнего контура. На рис. 2 представлена структура базы данных, реализованной в системе управления базами данных SQLite.

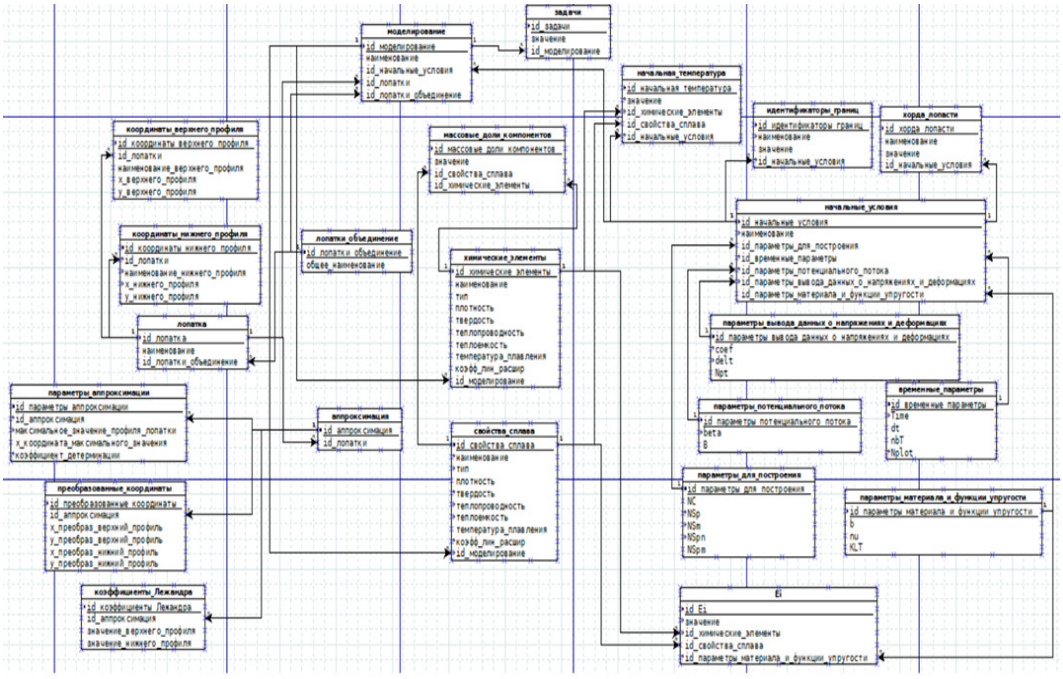


Рис. 2. Логическое проектирование базы данных приложения

В FreeFEM++ материал моделируется через функции, которые задают свойства по областям сетки:

```
real b = 1; // Толщина, мм
real nu = 0.28; // Коэффициент Пуассона
real[int] Ei = [2.1e5, 1.e-5] * b; // Модуль Юнга: сталь и воздух

func real E()
{
  if (Th(x, y).region == steel) return Ei[0];
  else return Ei[1];
}
// КоэффициентыЛаме
func mu = E()/(2*(1 + nu)); // модульсдвига
func lambda = E()*nu/((1 + nu)*(1 - 2*nu));
func K = -E()/(3*(2*nu - 1));
real KLT = 10.5e-6; // коэффициент теплового расширения
```

Для упрощения вычислений и повышения читаемости кода в FreeFEM++ введены макросы, позволяющие компактно задавать компоненты тензоров деформаций и напряжений:

```
real sqrt2 = sqrt(2.);
macro epsilon(u1, u2) [dx(u1), dy(u2), (dy(u1)+dx(u2))/sqrt2] // тензор деформаций
macro div(u1, u2) (dx(u1) + dy(u2)) // объёмная деформация
macro sig1(u1, u2) lambda*(div(u1,u2)) - 3*K*KLT*(T-T00) + 2*mu*dx(u1) // σ_x
macro sig2(u1, u2) lambda*(div(u1,u2)) - 3*K*KLT*(T-T00) + 2*mu*dy(u2) // σ_y
macro sig12(u1, u2) mu*(dx(u2)+dy(u1)) // τ_xy
macro eps1(u1) dx(u1)
macro eps2(u2) dy(u2)
macro eps12(u1, u2) (dx(u2)+dy(u1))/2.
```

Используются уравнения Ламе с учётом термического воздействия:

```
solve lame([u1, u2], [uu, vv])
  = int2d(Th)(
      lambda*div(u1,u2)*div(uu,vv)
    + 2.*mu*(epsilon(u1,u2)'*epsilon(uu,vv))
  )
  - int2d(Th)( 3.*K*KLT*(T-T00)*div(uu,vv))
 + on(S1, u1=0, u2=0);
```

После решения задачи упругости вычисляются напряжения и деформации в каждой точке расчетной сетки.

```
Sig1 = sig1(u1,u2);
Sig2 = sig2(u1,u2);
Sig12 = sig12(u1,u2);
Eps1 = eps1(u1);
Eps2 = eps2(u2);
Eps12 = eps12(u1,u2);
```

Распределение напряжений по сечению лопатки представлено на рис. 3.

Распределение напряженно-деформированного состояния вдоль лопатки, используемой в качестве имитатора газотурбинного двигателя, носит выраженно неоднородный характер, что соответствует реальным условиям работы турбинных элементов. Наибольшие значения напряжений и деформаций сосредоточены в средней части конструкции, что позволяет выделить её как наиболее нагруженную зону. Такая особенность указывает на необходимость учета данных областей при проектировании и анализе надежности. Неравномерность механических свойств по поверхности может приводить к формированию локальных участков повышенного риска, где вероятно зарождение микродефектов и развитие повреждений под действием термоупругих напряжений.

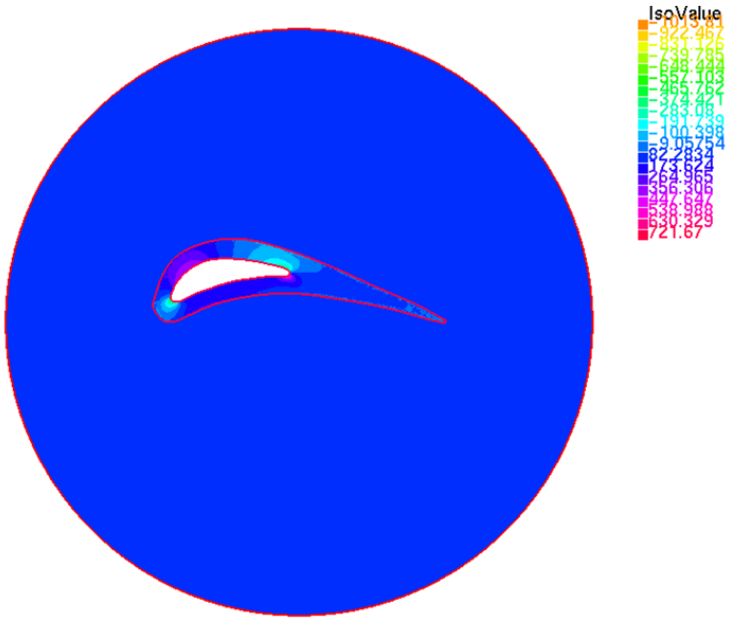


Рис. 3. Распределение механических напряжений по сечению лопатки

С учетом методов, изложенных в работе [5], рекомендуется подбирать защитные покрытия с учетом эксплуатационных условий и оптимизировать их толщину. Это повышает долговечность лопаток, улучшает их сопротивляемость термической усталости и обеспечивает более равномерное распределение нагрузок, позволяя выявлять критические зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Теплозащитные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей / А.Л. Бабаян, М.В. Куликов, В.А Коссой., Варламов Б.С. // Ползуновский вестник. – 2021. – № 1. – С. 161 – 172.

2) Kubaszek, T. Influence of air plasma spraying process parameters on the thermal barrier coating deposited with micro- and nanopowders / T. Kubaszek, M. Goral, P. Pedrak // Materials Science-Poland. – 2022. – № 3. – P. 80 – 92

3) Шулева, Ю.Н. Моделирование теплового поля на поверхности лопатки-имитатора газотурбинного двигателя / Ю.Н. Шулева, М.Е. Соловьев // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 7. – С. 27-30.

4) Аппроксимация профиля лопаток газотурбинных двигателей / М.Е. Соловьев, Ю.Н. Шулева, С.Л. Балдаев, Л.Х. Балдаев // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2024. – № 1. – С. 78-87.

5) Особенности развития термической усталости в деталях из жаропрочных сплавов с покрытием / Е.А. Тихомиров, С.А. Будиновский, А.А. Живушкин, Е.Ф. Сидохин // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 3. – С. 20-25.

УДК 004.91

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ RAG В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРОВ ПРИЁМНОЙ КОМИССИИ

В.А. Щербаков, А.Б. Раухваргер

Научный руководитель - **А.Б. Раухваргер,** канд. физ.-мат. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет

В деятельности организаций формируется значительный массив неструктурированных документов, не имеющих единой системы хранения. Применение методов искусственного интеллекта для упорядочивания данных осложняется высокой стоимостью разработки, обучения или дообучения специализированных моделей, а также значительными вычислительными затратами. В качестве эффективной альтернативы рассматривается подход дополненной генерации (RAG — Retrieval-Augmented Generation). В данной статье анализируются преимущества внедрения RAG-архитектуры как решения, позволяющего оптимизировать работу с документами без необходимости создания тяжеловесных моделей машинного обучения.

***Ключевые слова**: дополненная генерация, структурирование документов, графовые базы знаний, обработка неструктурированных данных, иерархическая индексация, генеративный искусственный интеллект*

THE USE OF RAG IN THE ADMISSION COMMISSION OPERATOR SYSTEM

V.A. Shcherbakov, A.B. Raukhvarger

Scientific Supervisor – **A.B. Raukhvarger**, Candidate of Physical and Mathematics, Associate Professor

Yaroslavl State Technical University

In the activities of organizations, a significant amount of unstructured documents is formed that do not have a unified storage system. The application of artificial intelligence methods for data organization is complicated by the high cost of developing, training, or retraining specialized models, as well as significant computational expenses. As an effective alternative, the Retrieval-Augmented Generation (RAG) approach is considered. This article analyzes the advantages of implementing the RAG architecture as a solution that allows for optimizing document processing without the need for heavyweight machine learning models.

***Keywords**: augmented generation, document structuring, graph knowledge bases, unstructured data processing, hierarchical*

Современные организации сталкиваются с проблемой экспоненциального роста неструктурированной информации. Согласно отраслевым отчетам, традиционные системы управления документами и методы поиска на основе ключевых слов не справляются с извлечением сложных смысловых связей, что приводит к значительным временным затратам на ручной анализ и повышает риск потери критически важных данных [1].

Традиционный подход к автоматизации обработки документов в деятельности приёмных комиссий вузов предполагал либо разработку специализированных моделей машинного обучения, либо дообучение больших языковых моделей под правила приёма, список вступительных испытаний и внутренние нормативные акты. Однако, как показывают исследования, эти методы имеют существенные ограничения: высокая стоимость подготовки размеченных данных (например, пар «вопрос абитуриента — корректный ответ»), необходимость частого переобучения при ежегодном изменении правил приёма, а также значительные вычислительные затраты на этапе работы обученной модели [2].

В данной статье рассматривается архитектура дополненной генерации (Retrieval-Augmented Generation, далее — RAG) как эффективная альтернатива для системы операторов приёмной комиссии ЯГТУ. В отличие от дообучения, RAG не изменяет внутренние параметры модели, а дополняет запрос актуальной информацией, извлеченной из внешнего

хранилища знаний – нормативных документов, правил поступления, программ вступительных испытаний и приказов ректората. Такой подход обеспечивает гибкость, снижает вероятность генерации недостоверных сведений (галлюцинаций) и позволяет работать с динамически обновляемыми данными без переобучения модели [1].

Анализ современных реализаций RAG-систем показывает, что ключевым узким местом является качество первичной обработки документов перед их загрузкой в систему. В реальных бизнес-сценариях, в том числе в работе приёмной комиссии, документы редко представляют собой однородный текст. Чаще всего это смешанные типы данных, включающие таблицы (например, соответствие направлений подготовки и вступительных экзаменов), диаграммы (план набора), сноски (ссылки на федеральные законы) и сложную вёрстку (правила приёма в формате PDF).

Исследователи выделяют две основные парадигмы обработки, каждая из которых имеет свои ограничения. В работе Gong и соавторов отмечается, что существующие методы сталкиваются с проблемами межмодальной разобщённости и межстраничной фрагментации при работе с многостраничными документами, содержащими визуальные элементы [3].

Текст-ориентированный подход: документ преобразуется в сплошной текст. При этом теряется структура разделов (например, «Особые права», «Целевой приём», «Индивидуальные достижения»), а также взаимосвязи между элементами (таблица с баллами ЕГЭ может быть оторвана от поясняющего абзаца). Оператор приёмной комиссии, обращаясь к такой системе, рискует получить неполный или вырванный из контекста ответ.

Вёрстка-ориентированный подход: сохраняется структура блоков (заголовки, таблицы, списки), но теряются связи между разделами, что делает невозможным многошаговый логический вывод с использованием информации из разных частей документа (например, одновременный учёт льгот и минимальных баллов).

Для преодоления указанных ограничений в 2025–2026 годах предложен ряд архитектурных решений, применимых в контексте приёмной комиссии ЯГТУ.

Одним из эффективных методов структурирования является создание иерархического индекса. Фреймворк KohakuRAG, занявший первое место в конкурсе WattBot 2025 года, использует четырёхуровневую древовидную структуру: «документ → раздел → параграф → предложение». Как отмечают разработчики, «иерархическая структура с агрегацией векторных представлений позволяет системе сохранять смысловую связность на всех уровнях документа» [8]. Для приёмной комиссии это означает, что правила приёма, расписание экзаменов и перечень документов могут быть организованы иерархически. Такой подход позволяет объединять векторные представления текста снизу вверх, сохраняя контекст при поиске.

Для обработки документов со сложными перекрёстными ссылками (например, связь между правилами приёма, лицензией на образовательную деятельность и приказом о зачислении) применяются гибридные подходы, объединяющие векторные базы данных с графовыми базами данных. В исследовании компании Lettria показано, что добавление графового слоя поверх векторного поиска позволяет повысить точность ответов на 20–25 процентов в таких отраслях, как фармацевтика и аэрокосмическая промышленность [5]. Для приёмной комиссии ЯГТУ это означает возможность получать ответы, учитывающие одновременно несколько нормативных актов.

Другим значимым решением является подход динамического управления документами с использованием графовой базы данных Amazon Neptune. В нем узлы графа представляют собой не просто фрагменты текста, а конкретные разделы документа, а связи отражают семантические отношения, такие как «модифицирует» или «заменяет». Это особенно важно для приёмной комиссии ЯГТУ, где правила приёма могут меняться несколько раз в год (поступление на бюджет, целевое, платное отделение) [1].

Особый интерес представляет фреймворк BookRAG, разработанный для обработки длинных иерархических документов (книг, технических отчетов). Его ключевым новшеством является «книжный индекс» — структура, объединяющая дерево вёрстки (структура глав) и

граф знаний (сущности и отношения между ними). В контексте приёмной комиссии это позволяет связывать такие сущности, как «направление подготовки», «вступительное испытание», «льгота» и «срок подачи документов», преодолевая разрыв между формой документа и его содержанием [7].

Следует также отметить подход HiRAG, представленный Huang и соавторами на конференции EMNLP 2025. Данный метод использует естественную иерархическую структуру документов для улучшения семантического понимания и захвата структуры в процессах индексации и поиска. Как показывают эксперименты авторов, учёт иерархического знания позволяет достичь значительного повышения производительности RAG-систем по сравнению с базовыми методами [4].

Одним из ключевых преимуществ RAG-систем перед дообучением является экономическая модель, особенно в условиях частого обновления данных (ежегодная смена правил приёма, появление новых направлений подготовки).

Согласно анализу компании Actian, стоимость развертывания RAG складывается из переменных затрат на обработку контекста (приблизительно 500 токенов на один запрос оператора) и затрат на инфраструктуру векторной базы данных. Однако эти затраты увеличиваются линейно с ростом количества запросов, что выгодно отличает RAG от дообучения, требующего крупных первоначальных инвестиций в вычислительные ресурсы и подготовку размеченных данных (на которые может уходить до 20–40 процентов бюджета проекта) [2].

Для приёмной комиссии ЯГТУ это означает возможность ежегодно обновлять базу знаний без переобучения модели, низкий порог входа (не требуются дорогие GPU-кластеры для тонкой настройки), а также прозрачность ответов с цитированием конкретного пункта правил приёма.

Сравнительные характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение подходов к обработке документов

Характеристика	**Дообучение (Fine-tuning)**	**RAG (Retrieval-Augmented Generation)**
Обновление знаний	Требует переобучения при обновлении данных	Обновляется через изменение индекса [2]
Точность на сложных данных	Высокая, но зависит от качества обучения	Повышается за счет графовых методов (до +25%) [5]
Учет структуры документа	Инкапсулирован в веса модели	Использует иерархические индексы и графы [1, 3]
Затраты на масштабирование	Высокие фиксированные затраты на обучение	Низкие переменные затраты (линейный рост) [6]

Внедрение RAG-систем в работу операторов приёмной комиссии требует пересмотра традиционных процессов обработки данных. Ключевым этапом является загрузка документов в систему, которая теперь включает в себя не только извлечение текста, но и распознавание макета страницы (PDF-версии правил приёма, приказы, таблицы с баллами).

Современные инструменты позволяют реализовать гибридную стратегию: текст извлекается стандартными методами (OCR при необходимости), а визуальные элементы (графики контрольных цифр приёма, диаграммы распределения мест) передаются в мультимодальные модели для генерации описаний, которые затем встраиваются обратно в текстовый поток. Как отмечают разработчики, «такой подход позволяет избежать затратной обработки всего документа мультимодальной моделью, сохраняя при этом смысловое содержание визуальных данных» [6].

Для приёмной комиссии ЯГТУ это означает, что оператор сможет задать системе вопрос: «Какие направления подготовки имеют бюджетные места с проходным баллом ниже 200 и льготами для целевиков?» — и получить ответ, основанный на актуальных таблицах и текстовых нормах.

Перспективным направлением является применение подхода MHier-RAG, предложенного Gong и соавторами. Данный метод специально разработан для работы с визуально-насыщенными документами и использует иерархическую индексацию с объединением внутристраничных фрагментов и топологических межстраничных связей, а также многогранулярный семантический поиск на уровне страниц и документов в целом [3]. Это позволяет эффективно обрабатывать многостраничные правила приёма со сложной вёрсткой и перекрёстными ссылками между разделами.

Анализ современных исследований и промышленных внедрений показывает, что использование RAG-систем является экономически и технически обоснованным подходом для структурирования нормативной и справочной документации в работе операторов приёмной комиссии ЯГТУ. Отказ от дообучения больших языковых моделей в пользу архитектур дополненной генерации позволяет вузу снизить порог входа в технологии искусственного интеллекта, обеспечивая при этом высокую актуальность данных (актуальные правила приёма каждого года) и прозрачность ответов за счёт цитирования конкретных пунктов документов.

Перспективными направлениями развития для приёмной комиссии являются мультимодальные RAG-системы, способные напрямую обрабатывать сканы заявлений и графики подачи документов, а также применение агентных подходов для автономного планирования поиска по сложной иерархии правил поступления в ЯГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Динамическое управление документами с использованием графовых баз данных // AWS Labs: [site]. – 2025. – URL: https://awslabs.github.io/generative-ai-atlas/

2) Сравнительный анализ подходов RAG и дообучения больших языковых моделей // Actian Corporation: [site]. – 2026. – URL: https://www.actian.com/blog/databases/

3) MHier-RAG: Multi-Modal RAG for Visual-Rich Document Question-Answering via Hierarchical and Multi-Granularity Reasoning / Z. Gong [et al.] // arXiv preprint arXiv– 2025. – 2508.00579.

4) HiRAG: Retrieval-Augmented Generation with Hierarchical Knowledge / H. Huang [et al.] // Findings of EMNLP 2025. – 2025. – URL: https://arxiv.org/abs/2503.10150

5) Азулай, Д. Графовые методы дополненной генерации: повышение точности на 20% с использованием векторных и графовых баз данных. – 2025. – URL: https://qdrant.tech/blog/case-study-lettria-v2/

6) Эффективная загрузка документов с учетом макета: исследование смешанных типов документов // John Snow Labs: [site]. – 2026. – URL: https://www.johnsnowlabs.com/

7) Джун, Ф. Фреймворк для обработки иерархических документов на основе объединения дерева структуры и графа знаний // BookRAG: [site]. – 2026. – URL: https://developer.aliyun.com/article/1716854

8) KohakuRAG: фреймворк дополненной генерации с иерархической индексацией документов / С.Ю. Йе [и др.] // arXiv preprint arXiv. – 2026. – 2603.07612.

УДК 517.925

КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ В УСЛОВИЯХ МЕЖДУНАРОДНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ

К.М. Яковлев

Научный руководитель - **Л.А. Петрова**, доцент

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва

В условиях стремительного развития цифровых технологий кибербезопасность становится одной из наиболее актуальных глобальных проблем, требующих международного сотрудничества. Английский язык играет ключевую роль в этой сфере и является необходимым инструментом для программистов. В статье рассматривается значение английского языка для работы с международными стандартами, документацией, инструментами и профессиональной коммуникацией в области кибербезопасности.

Ключевые слова: *кибербезопасность, английский язык, программирование, информационная безопасность, международное сотрудничество*

CYBERSECURITY IN THE CONTEXT OF INTERNATIONAL INTERACTION IN THE DIGITAL ENVIRONMENT

K.M. Yakovlev

Scientific Supervisor - **L.A. Petrova**, Associate Professor

Rybinsk State Aviation Technical University named P.A. Solovyov

In the context of rapid digital development, cybersecurity has become one of the most pressing global issues requiring international cooperation. English plays a key role in this field and is an essential tool for programmers. The article examines the importance of English for working with international standards, documentation, tools, and professional communication in cybersecurity.

Keywords: *cybersecurity, English language, programming, information security, international cooperation*

В условиях стремительного развития цифровых технологий кибербезопасность становится одной из наиболее актуальных глобальных проблем, решение которой требует эффективного международного взаимодействия и координации усилий специалистов различных стран. Глобализация угроз, трансграничный характер кибератак и унификация средств защиты формируют единую цифровую среду, в рамках которой обмен знаниями и оперативная передача информации становятся ключевыми факторами обеспечения безопасности. В таких условиях использование единого профессионального пространства коммуникации существенно повышает эффективность взаимодействия и снижает вероятность ошибок [8].

Ключевые стандарты и протоколы в области кибербезопасности, такие как NIST [1], ISO/IEC 27001 [2] и OWASP [3], разрабатываются и распространяются в международном формате, что обеспечивает их широкое применение в различных странах и отраслях. Разработчики и специалисты по информационной безопасности, стремящиеся следовать актуальным практикам, вынуждены обращаться к оригинальной документации, поскольку переводы нередко оказываются неполными, устаревшими или содержат искажения. Например, некорректная интерпретация спецификаций SSL/TLS может привести к ошибкам реализации криптографических механизмов и, как следствие, к появлению уязвимостей в программных системах.

Большинство современных библиотек и инструментов, применяемых в криптографии и тестировании на проникновение (OpenSSL, PyCryptodome, Metasploit, Burp Suite), имеют унифицированные интерфейсы и документацию. Их эффективное использование требует

точного понимания технических описаний, поскольку даже незначительные ошибки интерпретации могут привести к некорректной настройке или снижению уровня защиты. В ряде случаев такие ошибки становятся причиной возникновения уязвимостей, которые могли бы быть предотвращены при более корректной работе с документацией.

Современные исследования в области профессиональной коммуникации показывают, что терминология кибербезопасности обладает высокой степенью специфичности и динамичности [7]. Значительная часть используемой лексики отсутствует в стандартных словарях, а ежегодно формируется большое количество новых терминов. Такие понятия, как «exploit», «worm» или «honeypot», в профессиональной среде приобретают узкоспециализированное значение, отличающееся от общеупотребительного. Это создает дополнительные трудности при работе с техническими материалами и требует от специалистов высокой точности понимания контекста.

Дополнительные сложности обусловлены постоянным появлением новых типов атак и технологических концепций. В частности, такие явления, как ransomware-as-a-service и supply chain attack, а также подходы «zero trust» и «extended detection and response», активно внедряются в практику и требуют своевременного освоения. В условиях быстрого обновления знаний даже незначительное отставание в понимании терминологии и концепций может привести к снижению эффективности мер защиты и увеличению числа уязвимостей в системах.

Международное сотрудничество в сфере противодействия киберугрозам играет критически важную роль. Команды реагирования на инциденты (CERT) координируют свои действия при возникновении глобальных атак, таких как WannaCry, обеспечивая быстрое распространение информации и совместную разработку мер реагирования. Базы данных уязвимостей, например CVE [4], являются основным источником сведений о выявленных угрозах и широко используются специалистами по всему миру. Неполное или некорректное понимание описаний уязвимостей может привести к их игнорированию в процессе разработки и эксплуатации систем, что существенно повышает риски компрометации.

Кроме того, международные организации, такие как FIRST [9], обеспечивают координацию деятельности специалистов и формирование рекомендаций по реагированию на инциденты. Их деятельность направлена на развитие сотрудничества, обмен опытом и повышение общего уровня защищенности информационных систем. Участие в подобных структурах требует способности эффективно работать в международной профессиональной среде.

Особую сложность представляет работа с современными системами анализа угроз, включая SIEM- и SOAR-решения. Эти системы используют сложные интерфейсы, сценарии автоматизации и механизмы обработки событий, требующие высокой точности настройки. По данным SANS Institute, около 40% ошибок конфигурации связано с неправильной интерпретацией технической документации [5]. Подобные ошибки напрямую влияют на эффективность функционирования систем безопасности и могут приводить к пропуску критических инцидентов.

Важным аспектом является участие специалистов в международных проектах и профессиональном взаимодействии. Согласно исследованию (ISC)², около 70% проектов в области кибербезопасности предполагают регулярное взаимодействие распределённых команд [6]. В таких условиях особое значение приобретает способность четко формулировать технические задачи, обсуждать инциденты и принимать решения в рамках коллективной работы. Недостаточная точность в передаче информации может привести к неправильному пониманию ситуации и ошибочным действиям.

Дополнительным фактором является влияние качества интерпретации технической информации на безопасность программного обеспечения. Анализ отчетов платформ HackerOne и Bugcrowd показывает, что специалисты, способные корректно анализировать описания уязвимостей, быстрее устраняют критические дефекты и реже допускают повторные ошибки [10]. Это обусловлено тем, что рекомендации по безопасной разработке и

методики анализа защищенности распространяются преимущественно в международной профессиональной среде и требуют точного понимания.

Участие в международных программах сертификации, таких как CISSP, CEH и OSCP, также требует высокого уровня понимания профессиональной терминологии и способности решать сложные практические задачи в условиях ограниченного времени. Это подчеркивает важность подготовки специалистов, способных эффективно функционировать в глобальной цифровой среде и адаптироваться к быстро меняющимся условиям.

В долгосрочной перспективе способность работать в международной информационной среде становится фактором, определяющим конкурентоспособность как отдельных специалистов, так и организаций в целом. Компании, активно интегрированные в глобальное профессиональное сообщество, быстрее внедряют передовые практики защиты и эффективнее реагируют на возникающие угрозы [11]. В противоположность этому, ограниченность доступа к актуальной информации и недостаточная вовлеченность в международное взаимодействие могут привести к использованию устаревших решений и увеличению уровня рисков.

Таким образом, обеспечение кибербезопасности в условиях международного взаимодействия требует не только высокого уровня технической подготовки, но и способности эффективно работать с унифицированной системой стандартов, инструментов и профессиональной коммуникации. Это позволяет повысить качество разработки программного обеспечения, минимизировать количество уязвимостей и обеспечить устойчивость цифровых систем в условиях глобализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) National Institute of Standards and Technology (NIST). Digital Identity Guidelines: NIST Special Publication 800-63. – Gaithersburg, 2023. – URL: https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-63/3/final (дата обращения: 03.04.2026).

2) International Organization for Standardization (ISO). ISO/IEC 27001:2022 Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. – Geneva, 2022 (дата обращения: 02.04.2026).

3) Open Web Application Security Project (OWASP). OWASP Top 10 – 2023. – URL: https://owasp.org/www-project-top-ten/ (дата обращения: 05.04.2026).

4) MITRE Corporation. Common Vulnerabilities and Exposures (CVE). – URL: https://cve.mitre.org/ (дата обращения: 04.04.2026).

5) SANS Institute. The Impact of Language Barriers on Cybersecurity Configurations. – Bethesda, 2023 (дата обращения: 01.04.2026).

6) (ISC)². 2023 Cybersecurity Workforce Study: Language Skills and Career Advancement. – Clearwater, 2023 (дата обращения: 06.04.2026).

7) Cambridge Department of Computer Science. Technical English in Cybersecurity: Linguistic Analysis. – Cambridge, 2023 (дата обращения: 02.04.2026).

8) Gartner. The Role of English in Cloud Security and IoT. – Stamford, 2024 (дата обращения: 07.04.2026).

9) Forum of Incident Response and Security Teams (FIRST). International Collaboration in Cybersecurity. – URL: https://www.first.org/ (дата обращения: 03.04.2026).

10) HackerOne. 2024 Bug Bounty Trends: The Importance of English in Vulnerability Reporting. – San Francisco, 2024 (дата обращения: 05.04.2026).

11) LinkedIn. Global Cybersecurity Job Market: Language Requirements. – Sunnyvale, 2023 (дата обращения: 04.04.2026).