Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

На правах рукописи



Черникова Ольга Вячеславовна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С АДСОРБЦИОННО-ЩЕЛОЧНЫМ МЕТОДОМ

Специальность 2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Рухов Артем Викторович,
доктор технических наук,
профессор

Ярославль - 2026

Содержание

ВВЕДЕНИЕ……..5
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ……...14
1.1 Назначение турбинных масел…….14
1.2 Состав и характеристики смазочных масел……...15
1.3 Особенности изменений состава масел в процессе эксплуатации……..18
1.4 Методы регенерации турбинных масел…….21
1.4.1 Физические методы……21
1.4.2 Физико-химические методы…….....23
1.4.3 Химические методы……...25
1.5 Экономические и экологические аспекты восстановления отработанных масел……27
1.6 Выводы по главе 1……27
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА……..29
2.1 Условия работы турбинной установки……...29
2.2 Методы очистки масла на действующей КС-28 Моршанское ЛПУМГ (Первомайский ПУ)……29
2.3 Зависимость кислотного числа и кинематической вязкости от времени эксплуатации масла……33
2.4 Контроль содержания металлических примесей в смазочном масле действующих турбинных установок……36
2.5 Методики и оборудование контроля физико-химических показателей турбинного масла……...37
2.6 Методики и оборудование для исследования адсорбционной очистки турбинного масла ТП-22С…….39
2.6.1. Подготовка адсорбента 39
2.6.2. Методика определения реакции среды (pH) водной вытяжки..... 42
2.6.3. Методика определения окислительной стабильности масла 43
2.6.4 Определение содержания летучих низкомолекулярных кислот..... 45
2.6.5. Определение содержания осадка 47
2.7 Выводы по главе 2……48

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С……...50
3.1 Постановка задачи экспериментального исследования процесса регенерации с применением адсорбционно-щелочной очистки……...50
3.1.1 Кинетика изменения кислотного числа при адсорбционно-щелочной регенерации…….52
3.1.2 Определение механических примесей и зольности турбинного масла 58
3.1.3 Исследование влияния температуры на процесс регенерации турбинного масла……60
3.1.4 Кинетические характеристики реакции: определение энергии активации и температурного коэффициента……61
3.1.5 Исследование влияния гидродинамических параметров перемешивания на кинетику процесса регенерации……...63
3.2 Выводы по главе 3……92
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АППАРАТА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДСОРБЦИОННО-ЩЕЛОЧНОГО ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С…….94
4.1 Эскизная схема процесса при установлении режимов работы установки для регенерации……..96
4.2 Материальный баланс процесса……100
4.3 Математическое описание процесса регенерации отработанного турбинного масла……101
4.4 Вывод и определение коэффициентов критериального уравнения для расчета эффективного коэффициента массоотдачи……104
4.5 Проверка адекватности математического описания кинетики массообмена ……108
4.6 Постановка и решение задачи оптимального проектирования аппарата для регенерации отработанного турбинного масла…….110
4.7 Методика определения режимов функционирования аппарата для регенерации……...119
4.8 Выводы по главе 4……..129
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ……..131
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ……133
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНЫХ ИСТОЧНИКОВ…….134

ПРИЛОЖЕНИЕ А Патенты, полученные по результатам работы…….151
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Материальный баланс процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С……..153
ПРИЛОЖЕНИЕ В Технологическая схема процесса…….155
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Документы по практической реализации результатов работы ……..156

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время система газотранспортировки и распределения в Российской Федерации предполагает применение сложного компрессорного оборудования, эксплуатацию которого невозможно представить без использования большой номенклатуры смазочных материалов. Ввиду особенностей компрессорного парка наиболее востребованной смазкой является турбинное масло ТП-22С [1, 2, 99]. В процессе эксплуатации, преимущественно, вследствие окисления, турбинное масло деградирует и требует замены [3–8]. Потребность в турбинном масле только газотранспортной системы Уренгой-Помары-Ужгород составляет сотни тонн в год. Ввиду больших объемов потребления кроме экономической проблемы, связанной с приобретением смазки, приходится решать экологическую проблему утилизации отработанного турбинного масла. Наиболее перспективным подходом при эксплуатации турбинных компрессионных установок является регенерация отработанного масла с последующим возвращением его в эксплуатацию по прямому назначению. Мировой опыт показывает, что предпочтительными являются комбинированные методы регенерации. Соответственно, разработка современных и эффективных процессов и аппаратурных решений для комбинированной регенерации отработанных турбинных масел с учетом исследования закономерностей элементарных процессов химической технологии представляет собой актуальную научно-практическую задачу [43, 44].

Объектом исследования является процесс и аппаратурное оформление регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия.

Предмет исследования – кинетика массообменного процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-

щелочным методом с применением комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия.

Цель исследования – совершенствование процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Разработка эффективной методики проведения экспериментальных исследований и оценка влияния параметров процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С (концентрации гидроксида калия в комплексном поглотителе, температуры, времени реализации процесса и гидродинамических параметров) на его кинетику.
2. Установление области контроля физико-химического процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С и выбор математического описания его кинетики.
3. Анализ массообменного процесса при регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом и установление вида критериального уравнения с определением его коэффициентов.
4. Модификация полученного критериального уравнения с целью дальнейшей оценки влияния концентрации гидроксида калия в составе комплексного поглотителя на процесс регенерации.
5. Постановка оптимизационной задачи определения основных конструктивных и режимных параметров процесса и аппаратурного оформления процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с использованием целевой функции, построенной на основе экономических критериев.
6. Разработка оригинального аппаратурного оформления процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия.

Научная новизна

Впервые установлен факт интенсификации химико-технологического процесса регенерации турбинного масла ТП-22С при введении гидроксида калия в состав комплексного поглотителя на основе цеолита NaX и выявлены особенности влияния концентрации гидроксида калия на кинетику совмещенного процесса регенерации, что позволило предложить метод интенсификации исследуемого химико-технологического процесса.

Впервые в результате экспериментального исследования процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом, протекающего в емкостном аппарате, установлены особенности влияния гидродинамических параметров перемешивания и температуры. Это позволило определить, что процесс регенерации протекает во внешнедиффузионной области и его кинетика определяется внешним массообменном.

Для процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, протекающего во внешнедиффузионной области, получено критериальное уравнение для определения эффективного коэффициента массоотдачи, и по результатам экспериментальных данных определены коэффициенты полученного критериального уравнения.

Проведена модификация критериального уравнения, учитывающая влияние концентрации гидроксида калия на поверхности комплексного поглотителя, позволившая отразить протекание совмещенного процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом.

Поставлена и решена локальная оптимизационная задача, позволившая установить конструктивные (определяющие размеры) и режимные параметры (время обработки, концентрация щелочи и частота вращения мешалки) для реализации химико-технологического процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением

комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия.

Соответствие специальности научных работников. Диссертация соответствует пунктам: «2. Теория подобия, моделирование и масштабирование химико-технологических процессов и аппаратов, машин и агрегатов»; «5. Способы, приемы, методология исследования химических процессов, протекающих в условиях взаимного влияния на них гидродинамики и тепломасообмена, совершенствование их аппаратурного оформления»; «8. Интеграция и оптимизация химико-технологических процессов и систем»; «9. Методы и способы интенсификации химико-технологических процессов, в том числе с помощью физико-химических воздействий на перерабатываемые материалы».

Практическая значимость

1. Разработан способ регенерации отработанного продукта и для турбинного масла ТП-22С определены условия эффективной очистки адсорбционно-щелочным методом на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия (Патент № 2804769 РФ), с учетом решения оптимизационной задачи в отношении данного процесса регенерации.

2. Выполнена оценка значения энергии активации для адсорбционно-щелочного метода регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С (E_a = 6,68 кДж/моль).

3. Установлены значения коэффициентов полученного модифицированного критериального уравнения, описывающего процесс массообмена при регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С.

4. Разработана инженерная методика расчета основных конструктивных параметров оригинального лопастного перемешивающего устройства с механическим приводом поднятия лопастей и определены их значения: диаметр мешалки 0,6 м, рабочий угол подъема лопасти мешалки 5,4°, масса противовеса 25 кг, вылет противовеса 0,15 м.

5. На примере регенерации турбинного масла ТП-22С установлены оптимальные значения режимных параметров протекания процесса: концентрация гидроксида калия (0,124 % от массы цеолита NaX), время обработки (9,7 часа) и частота вращения перемешивающего устройства (2,13 об/мин).

6. Разработана химико-технологическая схема регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом, переданная для внедрения в ООО «Газпромнефть - Промышленные инновации» в г. Санкт-Петербург и КС-28 Моршанское ЛПУМГ (Первомайский ПУ) Первомайского района Тамбовской области.

7. Процесс и аппарат регенерации отработанного масла адсорбционно-щелочным методом внедрен в «Агрокапиталспасский»: Тамбовская область, Староюрьевский район, с. Спасское; ООО «Возрождение»: Тамбовская область, Первомайский район, с. Чернышевка; ООО «Тем»: Тамбовская область, Первомайский район, с. Чернышевка.

8. Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке студентов направления 18.04.01 Химическая технология по дисциплине «Проектирование предприятий органического и нефтехимического синтеза».

Методология и методы исследования базируются на комплексе методов физического и математического моделирования, оптимизации химико-технологических процессов, экспериментального исследования, статистическом анализе экспериментальных данных, фундаментальных законах массопереноса.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментального исследования кинетики массообменного процесса при регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия.

2. Закономерность кинетики совмещенного процесса регенерации отработанного масла адсорбционно-щелочным методом, состоящая в его протекании в области внешнедиффузионного контроля за счет влияния концентрации гидроксида калия и гидродинамических параметров.

3. Критериальное уравнение и его модифицированный вид, описывающие массообмен совмещенного процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия.

4. Конструкция нового аппарата для регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия (Патент № 2870092 РФ).

5. Химико-технологическая схема регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия.

Достоверность результатов подтверждена применением фундаментальных физико-математических методов, метрологически аттестованного оборудования и средств измерений, сопоставления расчетных и экспериментальных данных.

Личный вклад автора заключается в выполнении полного цикла экспериментальных исследований по оценке влияния гидродинамических условий и концентрации гидроксида калия на кинетику адсорбционно-щелочного процесса регенерации масла ТП-22С, обработке данных, интерпретации кинетических характеристик (энергия активации, температурный коэффициент) и подтверждении внешнедиффузионного контроля массопереноса. Автор также принимал активное участие в обосновании полученных результатов и их публикации.

Апробация работы. Основные результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных

конференциях: IX Международная научно-практическая конференция «Мир науки без границ» (Тамбов, 2022); V Международная научно-практическая конференция «Научное обозрение: актуальные вопросы теории и практики» (Пенза, 2023); IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные аспекты научных исследований» (Москва, 2023); IV Международная научно-практическая конференция «Современные исследования: теория, практика, результаты» (Москва, 2024); XXVII Международная научно-практическая конференция «Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков» (Москва, 2024); XVII Международная научно-практическая конференции «Современные стратегии и цифровые трансформации устойчивого развития общества, образования и науки» (Москва, 2024); IX Международная научно-практическая конференция «Исследования и инновации: синергия знаний и практики (Москва, 2024); 65-я Международная мультидисциплинарная научно-практическая конференция «Eurasiascience» (Москва, 2024); XXXII Международная научно-практическая конференция «Устойчивое развитие общества: новые научные подходы и исследования» (Москва, 2026).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 3 научных статьи, в изданиях, рекомендуемых ВАК, 1 научная статья Web of Science и Scopus, получено 2 патента.

Реализация результатов работы. Работа выполнена самостоятельно под руководством научного руководителя, заведующего кафедрой «Химия и химические технологии», доктора технических наук, профессора Рухова Артема Викторовича. Результаты работы внедрены в лекционный курс и лабораторный комплекс дисциплин «Специальная технология» по профессии лаборант химического анализа, читаемых в Учебно-производственном центре ООО «Газпром трансгаз Москва», а также используются в учебном процессе при подготовке студентов направления 18.04.01 Химическая технология по дисциплине «Проектирование предприятий органического и нефтехимического синтеза».

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка условных обозначений. Основное содержание диссертации изложено на 159 страницах машинописного текста, содержит 8 таблиц и 47 рисунков. Библиография включает 127 наименований.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, доктору технических наук, профессору Рухову Артему Викторовичу за систематическую помощь и ценные замечания, высказанные им при подготовке настоящей диссертации. Автор благодарит коллектив Тамбовского государственного технического университета за предоставленную возможность в проведении экспериментальных исследований, дружественную атмосферу и поддержку во время написания данной работы.

Степень разработанности темы. Проблема очистки отработанных масел и технологические подходы к производству вторичных масел рассмотрены в работах Коваленко В.П., Рыбакова К.В., Григорьева М.А., Осипова М.В., Ленивцева А.А., Шилова М.А., Немец В.Л., Стрельцова В.В., Картошкина А.П. и других.

Исследования таких ученых, как Татур И.Р., Погодаева Л.И., Зуева В.В., Телух Д.М., Дунаева А.В., Ревнивцева В.И., Голуб В.П., Итбаева В.К., Лукащук Ю.В., Острикова В.В., Нагорнова С.А., Клейменова О.А., Прохоренкова В.Д., Курочкина И.М., Хренникова А.О., Доровских Д.В. и др. внесли значительный вклад в решение задач повышения надежности газоперекачивающего оборудования и эффективности применения смазочных материалов при транспортировании природного газа.

Существующие методы очистки отработанных масел, ориентированные на повышение надежности оборудования и снижение затрат на очистку, не решают проблему эффективного использования ресурсов в газовой промышленности. В частности, крайне мало научных исследований, посвященных очистке и регенерации турбинных масел, широко используемых в газовой отрасли. Практически нет данных об использовании химических

методов регенерации в процессе очистки масел и их влияние на свойства конечного продукта.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

1.1 Назначение турбинных масел

Турбинные масла — специализированные смазочные материалы для подшипников газовых, гидравлических и иных турбин, турбокомпрессоров, а также рабочая жидкость в гидравлических системах управления производственным оборудованием. Масла должны быть устойчивы к окислению и пенообразованию, предотвращать образование лаковых отложений и нагара, обеспечивать деэмульгирование и защиту от коррозии [9–13].

Масла на основе парафинистых сернистых нефтей содержат антиокислительные, антикоррозионные, антипенные и противоизносные присадки. Их подбор и контроль обязательны для предотвращения износа оборудования и аварий [14–16].

Наиболее распространённое в России масло ТП-22С (ТУ 38.101821-2013, марки 1 и 2; марка 1 отличается улучшенной окислительной стабильностью). Оно заменило масла серий Т-22 (ГОСТ 21-74) и «Л» (ГОСТ 32-53), соответствует ГОСТ 9972-2020 и не рекомендуется к смешиванию с маслами без антиокислительных присадок или иного химического состава [17, 23]. Среди других марок турбинных масел менее распространены и более дорогостоящие: ТП-30 (ГОСТ 9972-74), «Торнадо Т-46» («ЛУКОЙЛ») и «Turbo Т-46» («Shell»). Стоимость определяется окислительной стабильностью, водоотделением и деаэрацией — параметрами, достигаемыми глубокой очисткой под высоким давлением [22].

1.2 Состав и характеристики смазочных масел

Смазочные материалы состоят из двух основных компонентов: базовых масел, которые формируют основу и определяют базовые свойства, и присадок, которые улучшают и дополняют их функциональные характеристики. Процесс производства товарных масел включает две стадии: изготовление базовых масел и компаундирование его составляющих. Базовые масла различаются по вязкости и химическому составу, представляют собой основу товарного масла, готовую к смешению, но еще не содержащую присадок [9, 14, 30].

На рисунке 1 представлена схема классификации масел по областям применения:

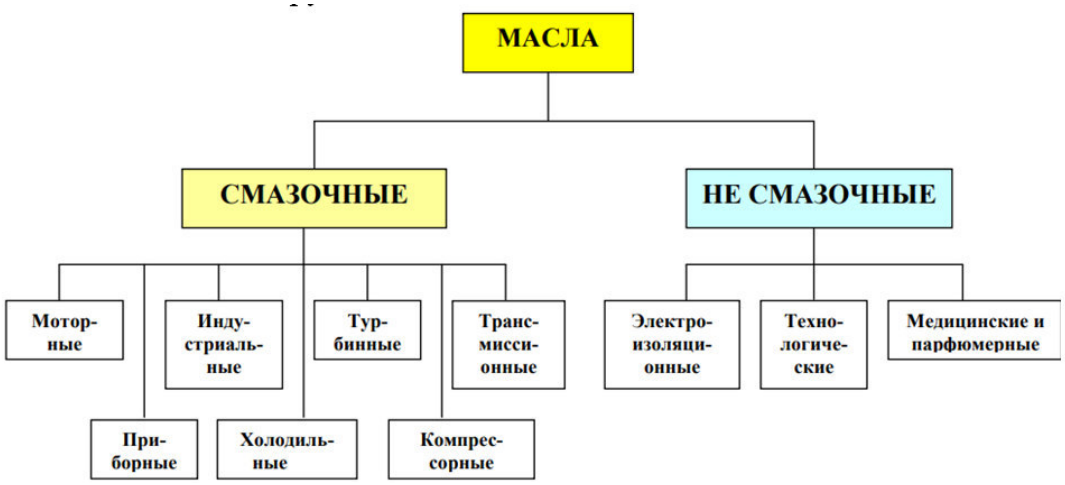


Рисунок 1 – Классификация масел по областям применения

Ключевой характеристикой смазочных масел являются *вязкостно-температурные свойства.* Они определяют текучесть масла при различных температурах и влияют на эффективность смазки [87].

Эксперименты, указанные в работе [18] показали, что удельная нагрузка, выдерживаемая подшипником скольжения, возрастает с увеличением вязкости масла, однако при повышении температуры вязкость снижается, что уменьшает несущую способность подшипника и может привести к повреждению баббитовой заливки.

Для обеспечения гидродинамического режима смазки необходима достаточная вязкость масла — она формирует масляную плёнку,

разделяющую трущиеся поверхности. Различают два режима смазки: жидкостный (полное разделение поверхностей) и граничный (неполное разделение) [19, 48].

Ключевой параметр при выборе масла — индекс вязкости, отражающий стабильность вязкости при температурных колебаниях: чем он выше, тем меньше меняется вязкость, что свидетельствует о более высоком качестве масла [21]. Исследования вязкостно-температурных свойств [20, 23–24] фокусируются преимущественно на статистической обработке данных и не раскрывают природу зависимостей. Это ограничивает возможности совершенствования вязкостно-температурных характеристик масел.

Кислотное число $K_ч$ (мг KOH/г) отражает содержание кислотных компонентов и служит индикатором деградации масла и истощения присадок; присутствие низкомолекулярных кислот повышает коррозионную активность и провоцирует образование шлама. Стабильность к окислению (исследования Черножукова Н.И., Крейна С.Э., Иванова К.И.) [25, 27] — ключевой эксплуатационный показатель: рост кислотности снижает смазывающую способность и способствует образованию шлама и нагара.

Температура вспышки характеризует количество легколетучих фракций (снижается с их ростом и обычно повышается с увеличением вязкости масла).

Коксуемость, отражающая склонность к образованию нагара и уровень очистки от асфальтосмолистых компонентов, может возрастать при наличии присадок [28].

Механические загрязнения, особенно частицы размером 15 – 40 мкм, вызывают износ оборудования, засоряют фильтры и нарушают работу систем смазки [29].

Чистота жидкости турбинных масел является ключевым фактором надежной работы и длительного срока службы турбоагрегатов и вспомогательных механизмов [31, 32].

Наличие воды в турбинном масле снижает его окислительную стабильность, повышает коррозионную активность, способствует

образованию устойчивых эмульсий с повышенной вязкостью (ухудшающих перекачку масла и вызывающих вибрацию валопровода), а также приводит к гидролизу и разрушению присадок, нарушая целостность масляной плёнки и ускоряя износ оборудования [30]. Регулярное техническое обслуживание, включающее своевременный ремонт и замену изношенных компонентов, позволяет существенно снизить уровень обводнения масла [31].

Турбинное масло ТП-22С (ТУ 38.101821-2013, марка 1), производимое из сернистых парафинистых нефтей с селективной очисткой и комплексом присадок (антиокислительные — 0,2–0,5 % масс., антикоррозионные — 0,01–0,03 % масс., деэмульгаторы — 0,001–0,005 % масс.), соответствует ГОСТ 9972-2020 и международным стандартам ISO 3448 (ISO VG-32) и ISO 6743-5 (группа ISO L-TSA). Его характеристики: кинематическая вязкость 28,8 – 35,2 мм²/с при 40 °С, индекс вязкости не менее 90, кислотное число $К_ч \leq 0,07$ мг КОН/г, температура вспышки в открытом тигле не ниже 186 °С, время деэмульсации не более 180 с. Эти свойства обеспечивают надёжное применение в паровых, газовых и гидротурбинах, турбокомпрессорах и турбогенераторах при рабочей температуре масла в системе до +60 °С.

Проблема отработанного турбинного масла обусловлена наличием загрязняющих веществ (в % по массе): жидких продуктов окисления (0,3 – 9%), топливных фракций (8 – 23%), воды (5 – 47 %), смол и асфальтенов (1,4 – 56 %), а также осадка с окалиной, углеродистыми частицами, фосфатами и карбонатами кальция (3 – 5 %) [33]. Состав загрязняющих примесей в отработанном масле различных двигателей приведён в таблице 1 [29, 36].

Таблица 1 – Средний состав примесей в отработанном масле, (%):

Загрязняющие примеси	Карбюраторные двигатели	Дизели	Газовые двигатели
Асфальтены	19	8	27
Карбены, карбоиды	70	85	24
Несгораемые	11	8	49

До 90% загрязнений в отработанном турбинном масле приходится на углеродистые примеси (карбены, карбоиды) [38]. Замена масла обычно проводится по графику планового технического обслуживания без учёта его фактического состояния.

1.3 Особенности изменений состава масел в процессе эксплуатации

По исследованиям Черножукова Н.И. и Крейна С.Э., окисление масел приводит к образованию перекисей, которые трансформируются в кислоты, оксикислоты и асфальтены. Оксикислоты и асфальтены (из-за низкой растворимости и высокой адгезии) формируют отложения на металлических поверхностях, вызывая закупорку каналов поршневых колец и их термическое повреждение (пригорание) [25–27, 46, 47].

В таблице 2 представлены основные источники загрязнения масла и состав продуктов загрязнения [39–41].

Таблица 2 – Источники и характеристики загрязнений смазочных масел

Источник загрязнения	Характеристики загрязнения (наименование)	Химический состав
Двигатель	Продукты износа	Fe, Al, Cu, Pb, Cr и др.
Топливо	Топливо и продукты неполного сгорания	Сажа (углерод), окислы серы, вода, топливо
Масло	Продукты окисления и полимеризации	Оксикислоты, смолы, асфальтены, карбены и карбоиды, мономеры и полимеры оксикарбоновых кислот и др.
	Продукты взаимодействия и разложения присадки	Ba, Ca, Zn, их соли и металлоорганические соединения
Окружающая среда	Пыль, песок, вода	Al_2O_3, SiO_2 и алюмосиликаты различного состава, вода

По исследованиям Семенидо Е.Г. [45], после запуска двигателя масло становится дисперсной системой с мелкодисперсными углеродными

частицами, размер которых растёт с увеличением тепловой нагрузки. Исследования Морозова Г.А. [50] указывают: если в отработанном масле преобладают частицы более 2–3 мкм, то требуется его замена, поскольку они ускоряют износ. Венцель С.В. [49] отмечает, что качественный состав нерастворимых примесей служит критерием противоизносного действия масла: снижение доли неорганических компонентов уменьшает скорость износа.

Вода в масле катализирует окисление (по данным в работах [34, 35]), что ускоряет износ оборудования в 2–3 раза, вызывает агломерацию углеродистых частиц и гидролиз моющих присадок. Для удаления воды применяют отстаивание и центрифугирование (фильтры неэффективны) [51–53]. Окисление углеводородов (по теориям Баха А.Н., Энглера О. и Семёнова Н.Н.) начинается с взаимодействия кислорода с веществом — образуются перекиси, далее — гидропероксиды (ROOH), а цепная реакция ускоряется свободными радикалами [58–61].

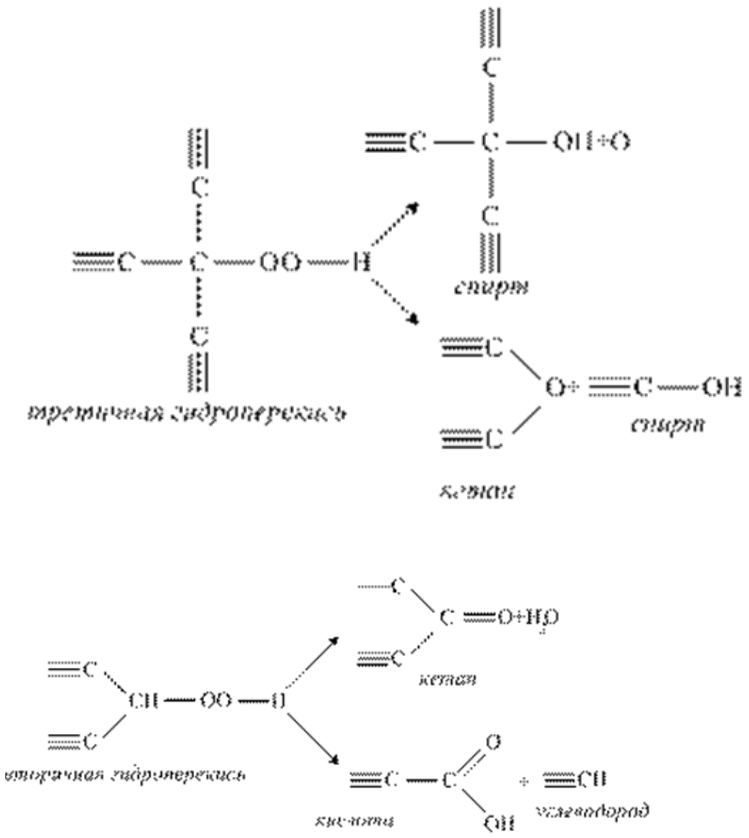
Первичные гидропероксиды легко распадаются, образуя свободные радикалы, которые ускоряют окислительные процессы. Реакция инициирования радикалов (зарождение цепей) описывается следующим уравнением:

$$RH + RH \rightarrow 2\dot{R} + H_2;$$
$$RH + O_2 + RH \rightarrow 2\dot{R} + H_2O_2$$

Механизм цепного окисления углеводородов описывается уравнениями:

$$(0)\quad RH \xrightarrow{Q} \dot{R}\ (\textit{зарождение цепи});$$
$$\begin{cases}(1)\ \dot{R} + O_2 \rightarrow R\dot{O}_2; \\ (2)\ R\dot{O}_2 + RH \rightarrow ROOH + \dot{R}\ (\textit{продолжение цепи});\end{cases}$$
$$(3)\ ROOH \rightarrow R\dot{O} + \dot{O}H\ (\textit{вырожденное разветвление});$$
$$(4)\ \dot{R} + \dot{R} \rightarrow R - R;$$
$$\left.\begin{array}{l}(5) R\dot{O} + R\dot{O} \rightarrow ROOR \\ (6)\ R\dot{O}_2 + R\dot{O}_2 \rightarrow ROH + R_1OCR_2 + O_2\end{array}\right\}(\textit{обрыв цепи});$$

Следующим шагом является распад гидропероксидов, приводящий к образованию конечных продуктов окисления:



Окисление турбинного масла протекает ступенчато: при низких температурах образуются гидропероксиды, при повышении — спирты и кислоты, при высоких — лаковые отложения и нагары [55, 57]. Согласно исследованиям Липштейна Р.А. [62], продукты окисления имеют разную растворимость: спирты, альдегиды, кетоны и другие растворяются в углеводородах, асфальтены — в смеси спирта и бензола, окси- и кетонокислоты — в водном растворе гидроксида натрия. При окислении образуются органические соли (мыла) меди и железа (до 0,002% и 0,001% соответственно) [63]. Продукты окисления (смолы, кислоты, асфальтены) увеличивают вязкость и кислотное число масла, провоцируют закоксовывание, образование нагара и шлама [54, 64]. Качество масла оценивают по предельным значениям ключевых показателей (таблица 3); замену выполняют по результатам экспресс-анализов в лабораториях, если хотя бы один браковочный параметр достиг критического уровня [65–67].

Таблица 3 – Предельные значения браковочных показателей работавших турбинных масел

Наименование показателей	Свежее масло	Эксплуатационное масло
Вязкость кинематическая при 50°С, $м^2/с$	Менее 20 – более 23	Более 28
Температура вспышки в открытом тигле (метод Кливленда)	Менее 186	Менее 186
Кислотное число, мг КОН/г	Менее 0,04 – более 0,07	Более 0,6
Содержание воды, %	Более 0,003	Более 0,003
Содержание ВКЩ, значение pH	Менее 5 – более 9	Менее 5 – более 9
Содержание механических примесей, %	Более 0,005	Более 0,0015

1.4 Методы регенерации турбинных масел

Регенерация отработанных турбинных масел проводится с целью полного или частичного восстановления эксплуатационных свойств. Для этого используют комбинацию физических, физико-химических и (или) химических методов, позволяющих селективно удалять из масла ещё продукты старения и другие нежелательные компоненты.

1.4.1 Физические методы

Физические методы очистки масел основаны на воздействии гравитационных и центробежных сил, а также включают фильтрацию, промывку водой, выпаривание и вакуумную дистилляцию, что позволяет удалить твёрдые частицы, воду, частично смолистые и коксообразные отложения, продукты окисления углеводородов и легкокипящие компоненты [68, 70].

Отстаивание — простейший метод предварительной очистки: в отстойниках под действием силы тяжести оседают крупные механические примеси и вода, однако его применение ограничено низкой производительностью из-за значительной продолжительности процесса (рисунок 2).

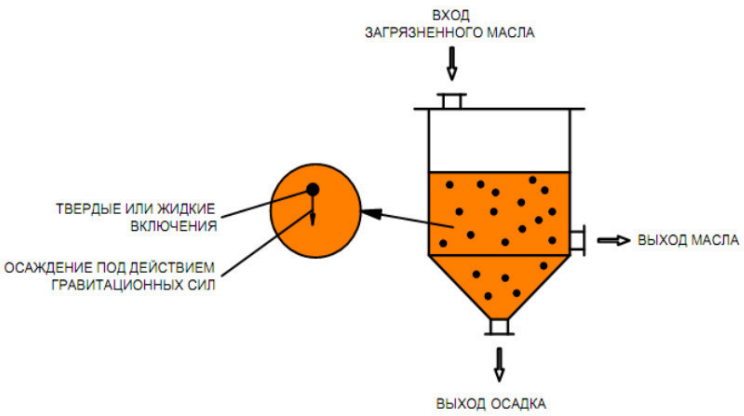


Рисунок 2 – Принципиальная схема отстаивания

Сепарация использует центрифугирование, создавая искусственное поле центробежных сил для более эффективного разделения (рисунок 3).

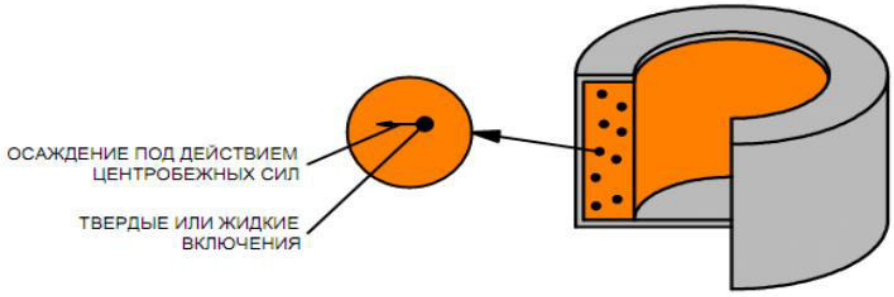


Рисунок 3 – Принципиальная схема сепарации

Центрифугирование эффективно, но требует затрат электроэнергии [71]; альтернативой служит фильтрация — пропуск масла через фильтр с размером пор, соответствующим размеру удаляемых частиц загрязнений (рисунок 4).

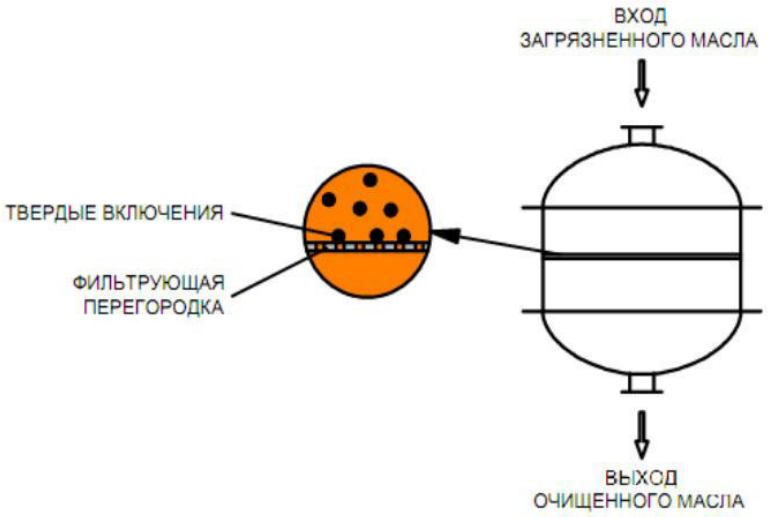


Рисунок 4 – Принципиальная схема фильтрации

Разнообразие фильтрующих материалов (от металлических сеток до сложных композитов) позволяет оптимизировать процесс фильтрации для достижения необходимой чистоты. Ключевым фактором является периодическая очистка фильтрующих элементов [72].

1.4.2 Физико-химические методы

Физико-химические методы очистки масла (например, коагуляция с применением электролитов и поверхностно-активных веществ (рисунок 5) обеспечивают более высокую степень очистки по сравнению с физическими методами: они удаляют широкий спектр загрязнений за счёт укрупнения коллоидных и мелкодисперсных частиц, но могут вызывать незначительные изменения в составе масла и отличаются большей сложностью и стоимостью реализации [73].

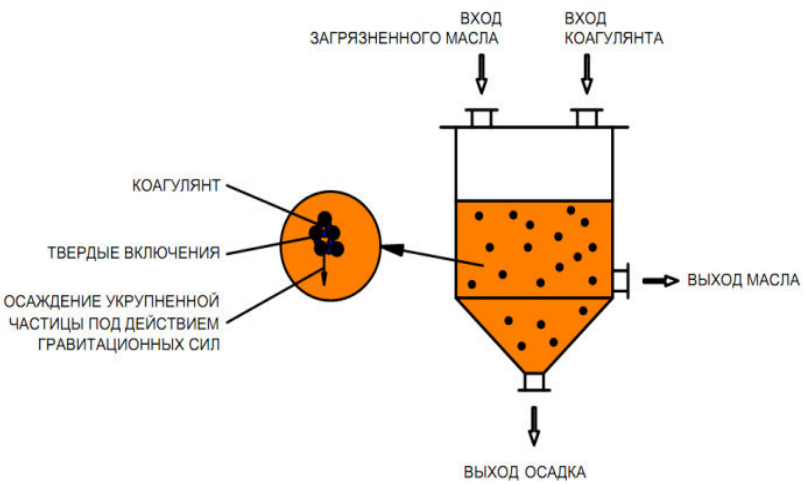


Рисунок 5 – Принципиальная схема коагуляции

Адсорбционная очистка отработанных масел осуществляется с помощью адсорбентов — высокопористых материалов с развитой внешней и внутренней (капиллярной) поверхностью, эффективно извлекающих и удерживающих загрязняющие вещества из масла (рисунок 6).

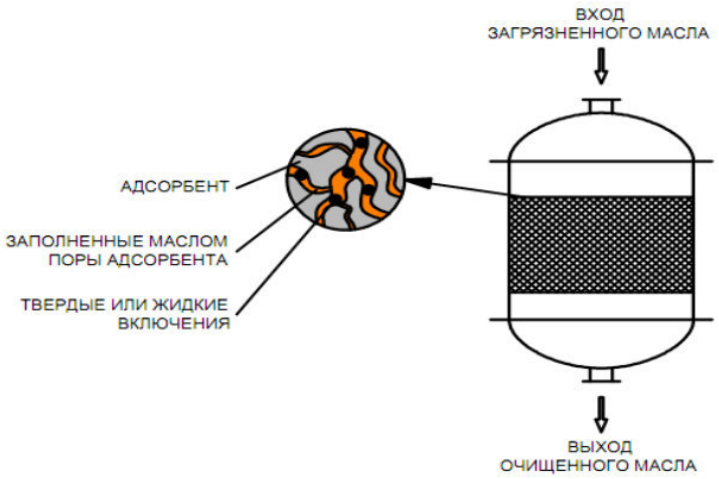


Рисунок 6 – Принципиальная схема адсорбции

Размер пор адсорбента играет ключевую роль в эффективности адсорбционной очистки. Для достижения высокой степени очистки необходимы специализированные адсорбенты, которые требуют регулярной регенерации. Природные адсорбенты, хотя и более экономичны, не обеспечивают сопоставимой эффективности очистки [74, 75].

Схема селективного растворения представлена на рисунке 7.

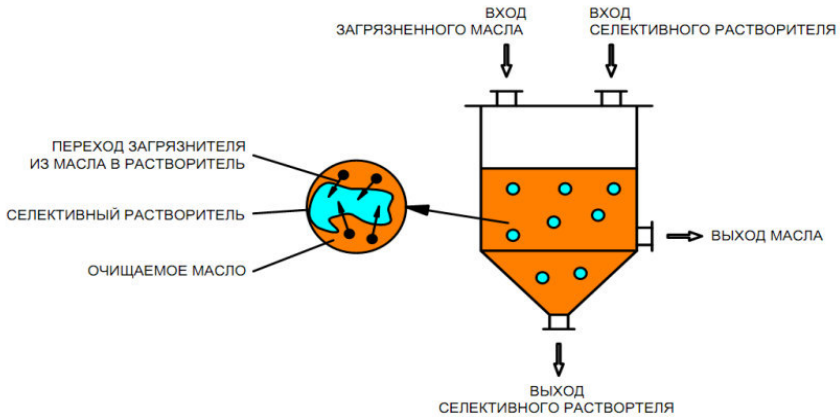


Рисунок 7 – Принципиальная схема селективного растворения

Экстракционная очистка масел с использованием селективных растворителей обеспечивает удаление нежелательных компонентов за счёт высокой межфазной поверхности; регенерация растворителя повышает экономическую эффективность процесса, однако метод применим только к маслам без присадок из-за риска соэкстракции полезных добавок и ухудшения эксплуатационных свойств масла [76, 77].

1.4.3 Химические методы

Химические методы очистки масел включают кислотную и щелочную обработку, гидрогенизацию и очистку соединениями металлов (оксидами, карбидами, гидридами) [77, 78]. Регенерация предполагает удаления продуктов старения и стабилизации базового масла присадками в соответствии с нормативно-технической документацией [17, 67].

Ключевыми факторами при восстановлении являются экологическая безопасность и экономическая целесообразность. Процесс регенерации должен одновременно отвечать критериям эффективности и рентабельности, а также обеспечивать образование минимально возможного количества отходов. В таблице 4 представлен сравнительный анализ эффективности технологий по очистке масел, соответствующий действующим нормативно-техническим документам [79].

Таблица 4 – Сравнительный анализ эффективности технологий по очистке масел от основных загрязнений

Наименование технологии очистки	Эффективность очистки масла от загрязнения				Наличие расходных материалов
	твёрдые частицы	вода (дисперсная и растворённая)	масляный шлам и продукты старения	газы (раство рённые в масле)	
1. Отстой	Удаляет частично	Удаляет частично	Не удаляет	Не удаляет	Отсутствуют
2.Фильтрация на сетках	Удаляет частично	Не удаляет	Не удаляет	Не удаляет	Отсутствуют
3.Центробежная сепарация	Удаляет частично	Удаляет частично	Не удаляет	Не удаляет	Отсутствуют
4. Вакуумное испарение	Не удаляет	Удаляет	Не удаляет	Удаляет	Отсутствуют
5.Электрофизич еская очистка	Удаляет	Не удаляет	Удаляет частично	Не удаляет	Отсутствуют
6. Объёмная фильтрация	Удаляет	Не удаляет	Удаляет частично	Не удаляет	Присутствуют
7.Адсорбционна я очистка	Не удаляет	Удаляет	Удаляет	Не удаляет	Присутствуют

Комбинированная технология очистки масел (предварительная механическая очистка, вакуумная осушка и фильтрация либо электрофизическая очистка), согласно таблице 4, экономически выгодна, эффективна и обеспечивает полное соответствие требованиям нормативной документации [80–82].

Регенерация турбинного масла ТП-22С с применением комбинированного метода позволяет получить базовое масло с характеристиками, соответствующими ТУ 38.101821-2013, с обязательным введением антиокислительной присадки Ангидол-1 [17, 83].

1.5 Экономические и экологические аспекты восстановления отработанных масел

Регенерация смазочных масел (в т.ч. турбинных) должна сочетать эффективность, рентабельность и минимальное образование отходов: оптимальный подход — раздельный сбор масел по сфере применения и их регенерация на специализированном оборудовании вблизи мест использования.

Для минимизации отходов перспективно применение современных синтетических адсорбентов с высокой прочностью и термостойкостью, которые обеспечивают избирательное извлечение загрязнений и допускают многократное использование за счёт восстановления адсорбционной способности методом высокотемпературного окисления [84]. Регенерация не устраняет экологические проблемы полностью, но существенно сокращает выбросы загрязняющих веществ, предотвращая загрязнение водных объектов, почв и атмосферного воздуха в процессе утилизации отработанных масел.

1.6 Выводы по главе 1

Турбинное масло ТП-22С (ТУ 38.101821-2013) с антиокислительными присадками используется в системах смазки и регулирования турбоагрегатов, старение которого характеризуется ростом ключевого показателя — кислотного числа $К_ч$ (норма — $К_ч \leq 0{,}1$ мг КОН/г, замена масла — $К_ч >$ 0,15 мг КОН/г), увеличением кинематической вязкости ≥ 26 м²/с, ухудшением времени деэмульсации (норма — $t_{деэм} \leq$ 400 с, замена — $t_{деэм} >$ 600 с), наличием механических примесей и др. Контроль за физико-химическими свойствами осуществляют по ГОСТ 981-75, ГОСТ 12068-66 и ГОСТ 19199/РД 34.43. [85–86].

Наиболее перспективным подходом при эксплуатации турбинных компрессионных установок является регенерация отработанного масла с последующим возвращением его в эксплуатацию по прямому назначению. Регенерацию рекомендуется проводить комбинированием физических

(отстаивание, центрифугирование, фильтрация, вакуумная осушка) и физико-химических методов (коагуляция, адсорбция). При глубокой деградации дополнительно применяют химические методы (кислотная/щелочная очистка, гидрогенизация). На выходе получают базовое масло согласно ТУ 38.101821-2013, добавляя присадку для нормализации индукционного периода окисления, что обеспечивает экономическую и экологическую целесообразность при соблюдении отраслевых стандартов и своевременном контроле качества.

Таким образом, общая постановка задачи диссертационного исследования заключается в совершенствовании способа регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С путем разработки научно обоснованных технологических решений, обеспечивающих повышение степени очистки масла от низкомолекулярных продуктов окисления при одновременном снижении затрат и экологической нагрузки.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование процессов деградации турбинных масел на производстве направлено на выявление ключевых факторов ухудшения его эксплуатационных свойств. К таким условиям относится высокая температура, значительные механические нагрузки, контакт с воздухом и влагой, а также воздействие продуктов износа оборудования [99].

2.1 Условия работы турбинной установки

Бесперебойная работа газовых турбин напрямую связана с качеством турбинного масла, которое должно сохранять свои эксплуатационные характеристики на протяжении всего срока службы. Деградация масла вследствие окисления и загрязнения, способствующая коррозионному износу деталей, является одной из основных причин выхода турбин из строя. Поддержание чистоты и свойств масла – приоритетная задача. Однако в то время, как небольшие предприятия могут проводить регенерацию масла без остановки оборудования, крупные установки требуют полной остановки для этой процедуры, что создает значительные трудности в поддержании оптимального состояния масла между плановыми обслуживаниями. Особую опасность представляет загрязнение масла водой и твердыми частицами, которые ухудшают его смазывающие свойства, вызывают коррозию и ускоряют абразивный износ деталей турбины [75].

2.2 Методы очистки масла на действующей КС-28 Моршанское ЛПУМГ (Первомайский ПУ)

Моршанское ЛПУМГ (Первомайский ПУ) ООО «Газпром трансгаз Москва» предназначен для поддержания заданного расхода транспортируемого газа путем повышения его давления. Технологическая схема компрессорной

станции предусматривает компримирование газа до давления, обеспечивающего технологический процесс подготовки газа к дальнему транспорту на последующую компрессорную станцию. Компримирование газа осуществляется одним или двумя параллельно включенными газоперекачивающими агрегатами. Газоперекачивающий агрегат представляет собой газотурбинную установку типа ГТК-25ИР с центробежным нагнетателем природного газа PCL-804/2-36 [67].

Система маслоснабжения компрессорного цеха (КЦ) включает в себя:

- общецеховую маслосистему;

- агрегатную маслосистему.

Общецеховая система маслоснабжения компрессорной станции предназначена для приема, хранения, передачи, контроля расхода турбинного масла, очистки отработанного масла, подачи турбинного масла к газоперекачивающим агрегатам, аварийного слива и перелива масла из маслобаков газоперекачивающего оборудования. Система маслоснабжения предназначена для хранения, очистки и подачи масла к подшипникам ГПА, а также передачи регулирующих импульсов на исполнительные механизмы в узлах регулирования и защиты. Одновременно система предназначена для обеспечения уплотнения и смазки центробежных нагнетателей. Маслосистема двигателя обеспечивает надежную смазку и отвод тепла от трущихся поверхностей подшипников и передач.

Маслосистема выполняет следующие функции:

- подвод масла из маслобака двигателя к узлам опор, коробкам приводов и к агрегатам системы регулирования;

- откачку масла из масляных полостей опор;

- отсос масловоздушной смеси из маслобака ГПА.

Система смазки включает в себя три насоса, обеспечивающих подачу масла в различных режимах работы турбины. Главный шестеренчатый насос приводится в действие валом вспомогательного редуктора. Вспомогательный насос с электроприводом переменного тока предназначен для работы при пуске

и остановке турбины, когда производительность главного насоса недостаточна. Аварийный насос с электроприводом постоянного тока обеспечивает подачу масла в коллектор подшипников при аварийной остановке или отказе вспомогательного насоса. Охлаждение масла после насосов осуществляется в воздушном охладителе масла (АВО), состоящем из двух параллельных секций, каждая из которых оснащена двумя электроприводными вентиляторами. Далее масло проходит через блок фильтров, включающий рабочий и резервный фильтры.

Масло распределяется по системам, имеющим свой расход и давление:

- система смазки подшипников ГПА;

- система смазки промежуточных валов;

- система валоповорота ротора ТВД;

- система гидравлического масла питания, снабжённую двумя насосами (вспомогательным и главным), предназначенную для производства и регулирования масла высокого давления для нужд ГПА;

- система гидравлического управления масла, отвечающая за регулирование частоты оборотов роторов ГПА и аварийную остановку ГПА;

- система смазки подшипников центробежного нагнетателя;

- система уплотнения центробежного нагнетателя.

Масло, выполнившее свою функцию, сливается самотёком в маслобак. Маслобак служит для возмещения расхода масла из циркуляционного контура.

Система маслоснабжения КЦ. В состав общецеховой системы маслоснабжения входят:

- емкости чистого и отработанного масла склада ГСМ;

- система маслопроводов чистого и отработанного масла насосной,

- трубопроводы приема и отпуска масла на сторону, систему трубопроводов от склада масел до агрегатной системы маслоснабжения;

- насосная система масел, включающая в себя центробежную установку для очистки масел, насосы для подачи масла к потребителям, расходные ёмкости, цеховой блок регенерации масел.

Эксплуатация турбинных масел со временем приводит к его загрязнению и деградации, так как маслам приходится работать в достаточно тяжелых условиях.

Температуру турбинного масла замеряют в сливной линии. Местные перегревы приводят к ускоренному старению турбинных масел, что является следствием резкого возрастания окисляемости из-за увеличения температуры выше 75–80 ºС.

Разбрызгивание масла обусловлено наличием в составе газовых турбин таких составных частей, как зубчатые колеса, муфты, уступы, гребни на валу. В результате происходит смешивание масла с кислородом и последующее окисление нефтепродукта. Воздух может присутствовать в турбинном масле в виде пузырьков различного размера, а также в растворенном состоянии. Попадание воздуха происходит за счет захвата в местах наиболее интенсивного перемешивания масла с воздухом, а также в сливных маслопроводах, где не наблюдается заполнение маслом всего сечения трубы.

Наличие воды в масле, особенно при контакте с высокотемпературным паром, является критическим фактором, ускоряющим его деградацию. Влага, поглощаемая маслом, в сочетании с повышенной температурой, катализирует процессы окисления, приводящие к образованию шлама. Попадание шлама в систему смазки подшипников может вызвать закупорку дозирующих отверстий, что нарушает нормальную подачу смазки и приводит к перегреву и возможному разрушению подшипника.

В процессе циркуляции турбинного масла по системе смазки, его контакт с различными металлами, такими как бронза, сталь и чугун, ускоряет процесс окисления. Некоторые из этих металлов выступают в роли катализаторов, дополнительно стимулируя окисление масла [100].

2.3 Зависимость кислотного числа и кинематической вязкости от времени эксплуатации масла

Исследована взаимосвязь между временем эксплуатации турбинного масла ТП-22С в турбоагрегатах ГПА 12 (рисунок 8 и 9) и ГПА 13 (рисунок 10 и 11) и изменением его кислотного числа и кинематической вязкости.

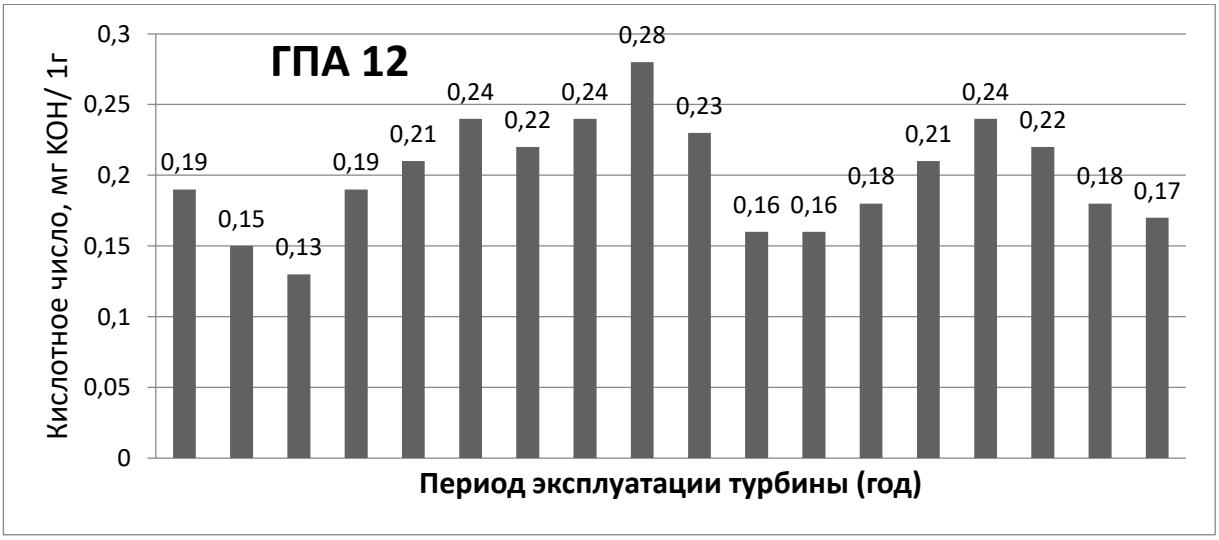


Рисунок 8 – Зависимость кислотного числа от наработки газоперекачивающего агрегата ГПА 12

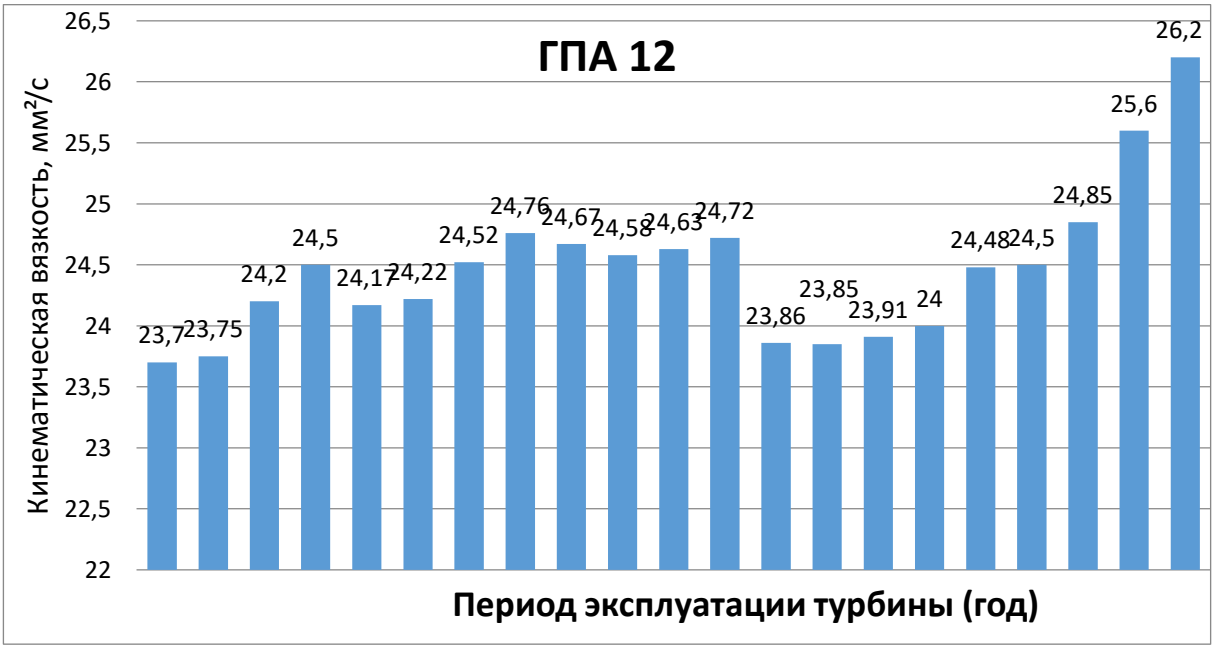


Рисунок 9 – Зависимость кинематической вязкости от наработки газоперекачивающего агрегата ГПА 12



Рисунок 10 – Зависимость кислотного числа от наработки газоперекачивающего агрегата ГПА 13

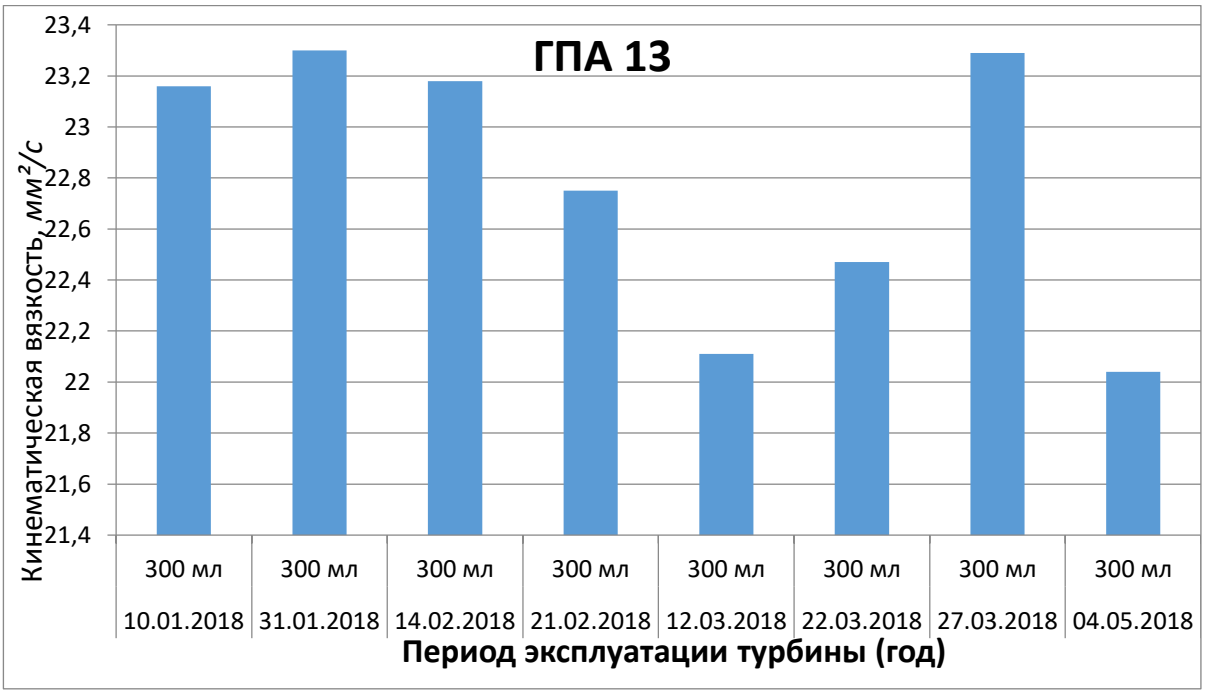


Рисунок 11 – Зависимость кинематической вязкости от наработки газоперекачивающего агрегата ГПА 13

При увеличении наработки турбины наблюдается рост кислотного числа $K_ч$ (максимальное значения $K_ч = 0{,}28$ мг КОН/г) и кинематической вязкости ν (максимальное значения $\nu = 26{,}2$ мм^2/с) турбинного масла, обусловленный

окислительной деградацией углеводородов, накоплением органических кислот, смолистых соединений и продуктов износа.

Очистка осуществляется исключительно с применением методов физической сепарации — центрифугированием (по принципу разделения фаз в поле центробежных сил) либо фильтрацией через фильтры с заданной тонкостью отсева (обычно 3 – 25 мкм), без применения химических присадок и адсорбционной технологии — в соответствии с локальной нормативной документацией.

Данные графиков (рисунок 8 – 11) показывают, что применяемые методы регенерации на основе механической очистки (сепарации) не дают желаемых результатов. Требуется разработка новых подходов к регенерации отработанного масла адсорбционно-щелочным методом.

Анализ журнала повреждений оборудования компрессорной станции КС-28 «Моршанское ЛПУМГ» показал, что загрязнённое масло с повышенным кислотным числом и вязкостью, превышающей нормативные значения [17], является основной причиной инцидентов за отчетный год (рисунок 12).

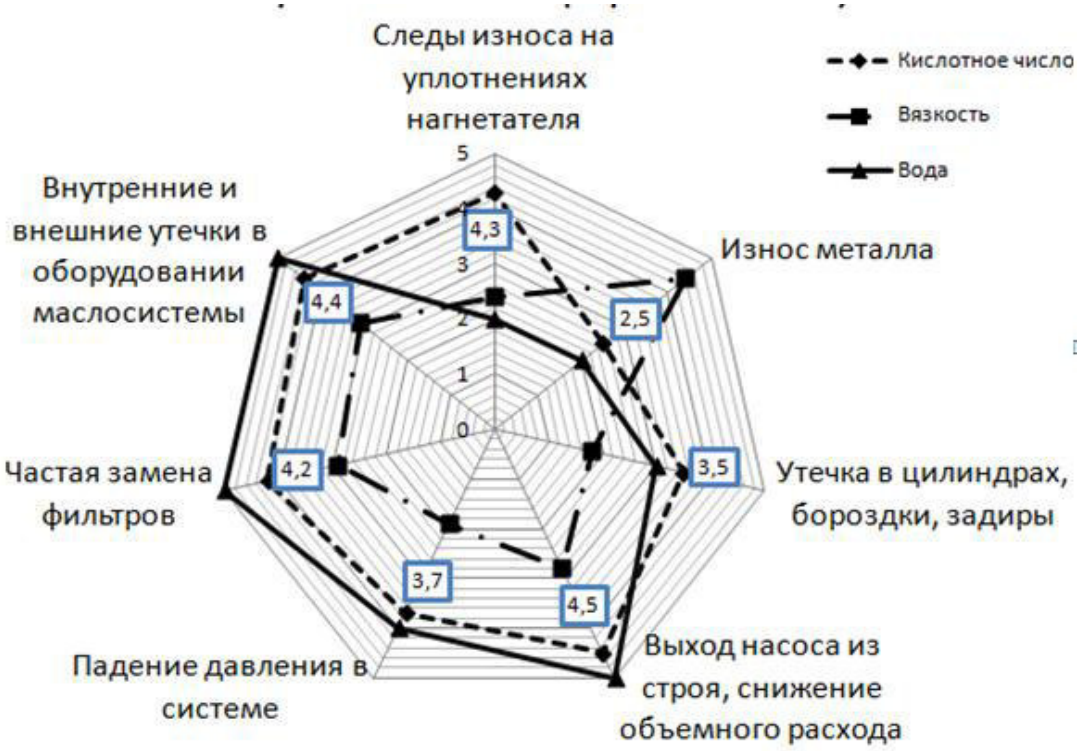


Рисунок 12 – Повреждения оборудования, вызванные загрязненным маслом

Турбинное масло ТП-22С находится в контакте с воздухом и металлическими деталями, что инициирует процесс его окисления. Кислород воздуха вызывает деградацию функциональных присадок, а вода, попадающая в масло из атмосферы или образующаяся как побочный продукт химической реакции, дополнительно ускоряет процессы старения масла.

2.4 Контроль содержания металлических примесей в смазочном масле действующих турбинных установок

В процессе циркуляции турбинного масла в маслосистеме обвязки газоперекачивающего агрегата нефтепродукт взаимодействует с различными металлами, такими как сталь, чугун, алюминий, что может привести к окислению и последующему старению масла. Кроме того, многие из этих металлов могут оказывать каталитическое действие, ускоряя процессы окислительной полимеризации.

Определение ионов железа и меди в турбинных маслах позволяет оценить степень износа оборудования и качество масла. Эти металлы являются индикаторами износа конкретных узлов: железо (Fe) указывает на износ подшипников, валов, корпусов, а медь (Cu) — на разрушение втулок, подшипников скольжения и теплообменников [101].

Анализ результатов для газоперекачивающих агрегатов ГПА 12 и ГПА 13:

– ГПА 12: появление слабо-розовой окраски при добавлении раданида калия (KSCN) свидетельствует о наличии ионов железа. Раданид калия образует с ионами железа (III) (Fe^{3+}) комплексное соединение — тиоцианат железа (III).

– ГПА 13**:** ярко-розовая окраска подтверждает более высокое содержание ионов железа по сравнению с ГПА 12. Отсутствие голубой окраски при добавлении гидроксида натрия указывает на отсутствие ионов меди. Гидроксид натрия мог бы вызвать осаждение гидроксида меди

($Cu(OH)_2$), который имеет голубой цвет, но в данном случае такой реакции не произошло.

Увеличение концентрации ионов железа (Fe^{3+}) и меди (Cu^{2+}) указывает на износ оборудования и возможное ухудшение качества масла (повышение вязкости, кислотного числа, образование шлама).

2.5 Методики и оборудование контроля физико-химических показателей турбинного масла

Цель экспериментального исследования — изучить закономерности старения отработанного турбинного масла ТП-22С под воздействием эксплуатационных факторов и определить предельные значения показателей согласно ТУ 38.101821-2013 [17], сигнализирующие о необходимости регенерации масла либо его замены.

Основными задачами являются подготовка образцов масла, подбор методик определения физико-химических параметров, выбор и калибровка лабораторного оборудования, обеспечение воспроизводимости условий.

Контроль характеристик турбинного масла включает комплекс физико-химических и инструментальных методов анализа, направленных на оценку его состояния, степени деградации и пригодности к дальнейшей эксплуатации. Для этого используются специализированные приборы и лабораторные методики, соответствующие ГОСТ и отраслевым стандартам.

Ключевые критерии, по которым осуществляется проверка качества масла ТП-22С, включают следующие показатели:

Кислотное число. Этот ключевой показатель свидетельствует о степени деградации антиокислительных присадок в масле и наличии низкомолекулярных продуктов окисления. Для газовых турбин допустимое кислотное число $К_ч$ варьируется в диапазоне 0,04 – 0,07 мг КОН на 1 грамм масла (ГОСТ 5985-2022) [89].

Вязкость. Этот параметр отражает способность масла выполнять смазывающую функцию. В эксплуатации допускается изменение кинематической вязкости масла в пределах от 28,8 до 35,2 мм²/с (ГОСТ 33-2016) относительно значения для свежего масла. Превышение значения более чем на 10 % от исходного считается браковочным критерием [87].

Вода. Наличие влаги способствует внутренней коррозии, ускоренному окислению и деградации масла. Для газовых турбин содержание воды в масле недопустимо (ГОСТ 2477-2014) [88].

Механические примеси. Контроль концентрации этих частиц и определение класса чистоты масла позволяют проводить анализ нагруженности турбины, идентифицировать механизмы износа и прогнозировать возникновение аварийных ситуаций. Согласно ГОСТ 6370-2018 массовая доля механических примесей в турбинном масле ТП-22С должна составлять не более 0,005 % [90].

Класс чистоты ГОСТ 17216. отражает количество частиц определённого размера, содержащихся в единице объёма масла, и тем самым показывает степень его загрязнения. Классификация по классу промышленной чистоты применяется для масел, эксплуатируемых в системах газовых турбин [91].

Температура вспышки. В совокупности с понижением вязкости этот параметр может указывать на разбавление масла топливом, что служит признаком возможных неисправностей в системах зажигания или подачи топлива (ГОСТ 4333-2014). Согласно ТУ 38.101821-2013 температура вспышки в открытом тигле должна быть не менее 186 °С [92].

Обязательными к контролю являются показатели, касающиеся пожарной безопасности веществ и материалов в соответствии с требованиями Федерального закона от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»: температура вспышки в открытом тигле должна быть не ниже 186 °С; температура воспламенения — 218 °С; температура самовоспламенения — 400 °С; температурные пределы распространения пламени: нижний — 148 °С, верхний — 182 °С [17].

Водорастворимые кислоты и щелочи согласно ГОСТ 6307-75 должны отсутствовать в масле вышеуказанной марки. Их наличие приводит к коррозионному износу деталей [93].

Для контроля параметров качества турбинного масла применяются приборы и оборудование, включая автоматические счётчики частиц ПКЖ-904 (прибор контроля жидкости), лабораторные термостаты ЛТН-03 (лабораторный термостат низкотемпературный - 03), устройства для измерения температуры вспышки в открытом тигле ТВО-ЛАБ-01 (температура вспышки в открытом тигле) и другие специализированные инструменты и оборудование [42].

Объем и перечень испытаний рабочей жидкости определяется согласно требованиям Руководства по эксплуатации оборудования, отраслевым нормативам и локальными документам предприятия (технологическими картами) [94, 97–98, 100].

2.6 Методики и оборудование для исследования адсорбционной очистки турбинного масла ТП-22С

2.6.1. Подготовка адсорбента

Для получения комплексного поглотителя на основе цеолита использовали следующее сырье:

– цеолит марки NaX по ТУ 2163-077-05766575-99, представляющий собой гидратированные алюмосиликаты щелочных элементов;

– вода дистиллированная по ГОСТ Р 58144-2018;

– калия гидроксид по ГОСТ 24363-80.

Сорбент, содержащий гидроксид калия, готовили по следующей методике: исходный сорбент цеолит марки NaX, с размером сферических гранул от 1,6 до 2,5 мм, средним размером пор 0,9 – 1,0 нм, средней удельной поверхностью по методу БЭТ 1030 $м^2/г$ прокаливался при температуре 450 °С в течение 4 ч, после чего охлаждался до комнатной температуры в эксикаторе. На

следующем этапе по 50 г цеолита засыпалось в галтовочную машину барабанного типа КТ- 6808 с добавлением 2,5; 0,5; 0,25; 0,05 г гидроксида калия для получения модифицированного сорбента, содержащих 5; 1; 0,5; 0,1% масс. щелочи. Барабан призматический с диаметром 150 мм. Время обработки 10 мин с реверсом каждые 30 с. Полученный сорбент хранили в плотно закрывающихся полиэтиленовых контейнерах (рисунок 13) [95].

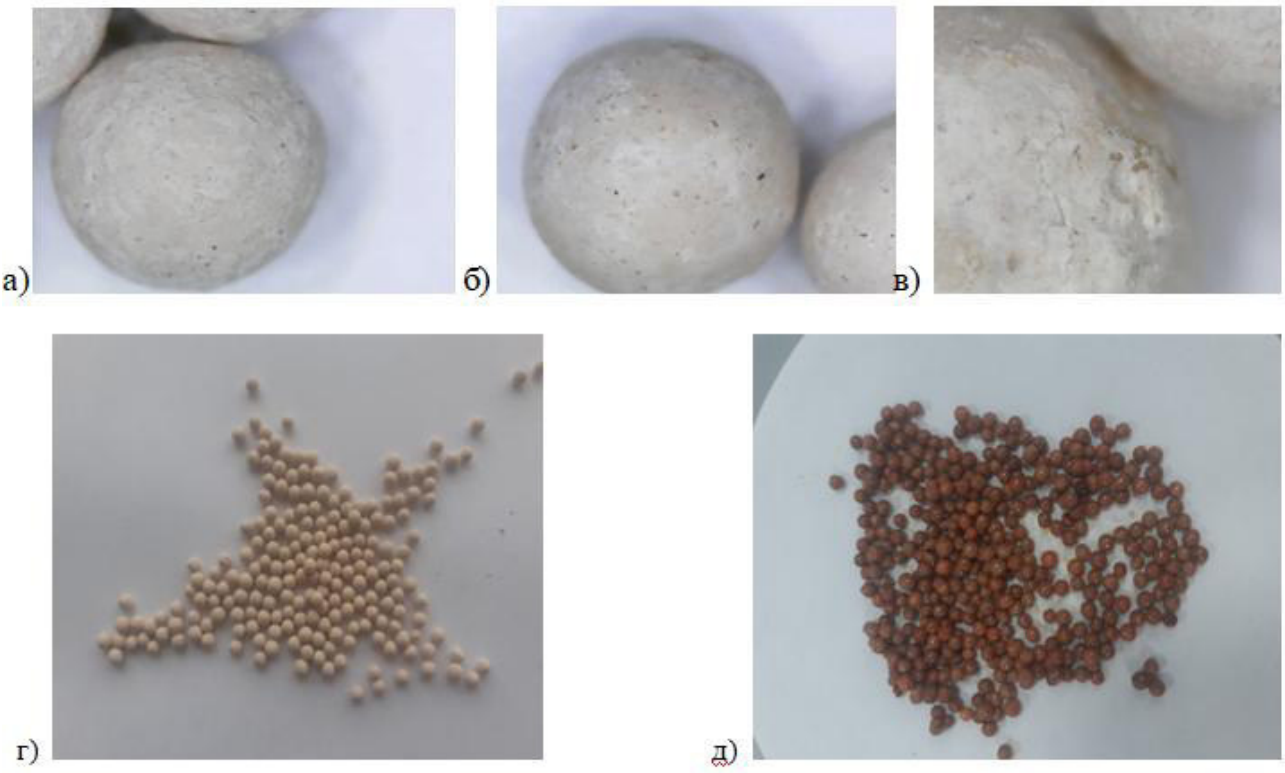
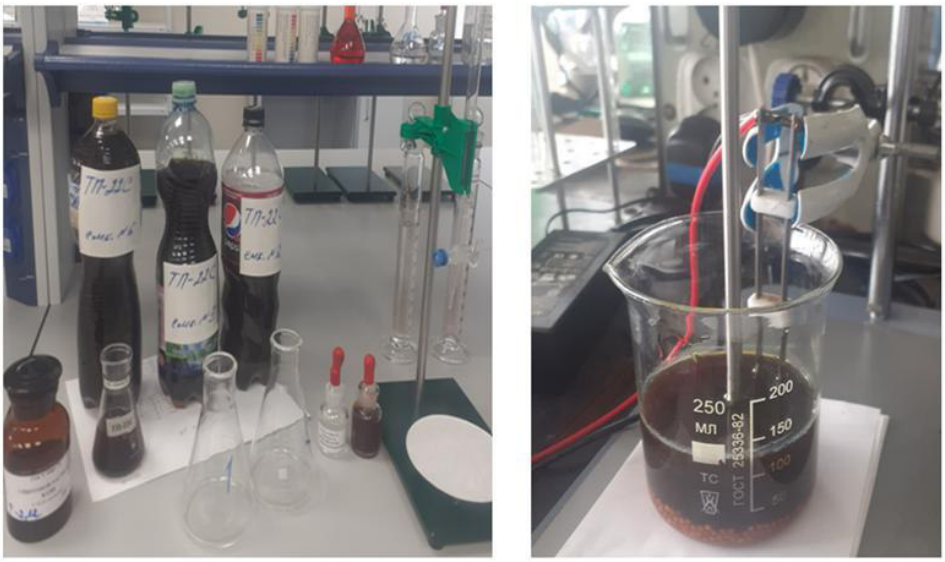


Рисунок 13 – Общий вид комплексного поглотителя цеолита NaX:
а) и б) содержание гидроксида калия 0,1%; в) содержание гидроксида калия 1%; г) комплексный поглотитель до контакта с маслом; д) комплексный поглотитель после контакта с маслом.

Для воспроизведения процесса регенерации турбинного масла в лабораторных условиях использовали следующую методику: пробы отработанного масла (рисунок14, а) погружали в химический стакан, после чего добавляли комбинированный поглотитель из расчёта 10 % от массы масла. Контакт между фазами обеспечивали путём механического перемешивания с применением перемешивающего устройства, имеющего верхний привод (двухлопастная мешалка — рисунок 14, б). Конструктивное исполнение мешалки и режим перемешивания создавали вынужденные конвективные

потоки, гарантирующие равномерное распределение поглотителя и интенсификацию адсорбционных процессов [96].



а) б)

Рисунок 14 – Вид механического перемешивающего устройства:
а) Образцы отработанного масла ТП-22С
б) Общий вид перемешивающего устройства

Кислотное число масла определяли согласно ГОСТ 5985-2022 (рисунок 15) [89]. Полученное максимальное значение составило $К_ч$ = 0,36 мг КОН/г, что превышает допустимые нормативные значения для газовых турбин (рекомендованный диапазон 0,04 – 0,07мг КОН/1 г) [17].



Рисунок 15 – Определение кислотного числа отработанного турбинного масла ТП-22С согласно ГОСТ 5985-2022:
а) Определение поправочного коэффициента титранта – спиртового раствора гидроксида калия 0,05%;
б) Определение кислотного числа

При определении температуры вспышки по методике ГОСТ 4333-2014 получено значение 215 °С, что соответствует нормативным требованиям для данного типа масла [92].

2.6.2. Методика определения реакции среды (pH) водной вытяжки

Для анализа водной экстракции отработанного турбинного масла в мерную колбу объёмом 250 см³ помещали 25 см³ масла, 25 см³ дистиллированной воды (свободной от CO_2) и 5 см³ 2-пропанола, затем перемешивали 10 мин до гомогенности. Полученный раствор переносили в делительную воронку для фазового разделения (рисунок 16), после чего водную фазу выделяли и переносили в химический стакан для измерения pH-среды с помощью предварительно откалиброванного pH-метра [93].

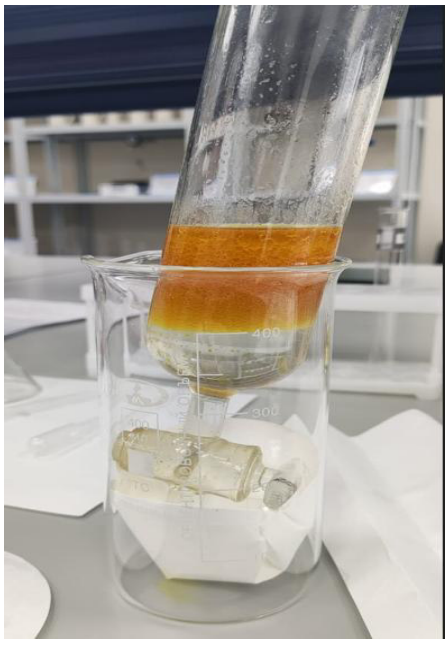


Рисунок 16 – Делительная воронка для получения водной вытяжки масла

Исходные показатели: pH дистиллированной воды составлял 6,5; pH водной вытяжки масла — 3,9; снижение pH водной фазы относительно исходного значения дистиллированной воды (6,5) указывает на переход кислых соединений (низкомолекулярных продуктов окисления) из масла в экстракт, а

чем ниже итоговое значение pH, тем выше степень окисления и деградации масла.

Анализ проводили при температуре 25 °C с выполнением 2 – 3 параллельных измерений сразу после разделения фаз с применением калиброванной мерной посуды. Подготовили три образца сорбента: образец № 1 — цеолит с нанесённым на поверхность гидроксидом калия (5% масс.); образец № 2 — цеолит без гидроксида калия (0% масс.); образец № 3 — силикагель без гидроксида калия (0% масс).

В ходе эксперимента оценивали эффективность трёх образцов сорбента по динамике снижения кислотного числа. Все образцы показали снижение значений кислотного числа, что свидетельствует об удалении низкомолекулярных продуктов окисления. Наиболее эффективный результат продемонстрировал образец № 1.

2.6.3. Методика определения окислительной стабильности масла

Стабильность масла против окисления характеризуется кислотным числом, количеством летучих низкомолекулярных кислот и осадка, образующихся при окислении. Согласно ГОСТ-981 [86] масло окисляли в приборе ВТИ под воздействием кислорода при повышенной температуре в присутствии катализатора (стальная и медная пластинки). В реакционный сосуд прибора помещали (30 г $\pm$ 0,1 г) испытуемого турбинного масла и добавляли образцы медных и стальных катализаторов. Затем систему герметично закрывали. Прибор погружали в масляную баню и устанавливали рабочую температуру 120 °C (с точностью ± 0,5 °C). Кислород подавали непрерывно со скоростью 200 мл/мин, расход контролировали с помощью ротаметра. Газообразные продукты окисления направляли в склянку Дрекселя, заполненную бидистиллированной водой с индикатором нитрозинового жёлтого.

Процесс окисления проводился в течение 6 часов. О ходе реакции судили по изменению цвета индикатора: переход с оранжевого на красный сигнализировал о накоплении кислых продуктов окисления. Длительность индукционного периода фиксировали по времени от начала подачи кислорода до появления красного оттенка.



а) – **б)**

Рисунок 17– Конструкция прибора для определения
окислительной стабильности масла согласно ГОСТ 981-75:
а) с применением склянки Дрекселя и индикатора (нитрозинового желтого);
б) модификация методики за счет применения калиброванного pH – метра.

Чтобы повысить точность и объективность контроля, методику усовершенствовали: склянку Дрекселя заменили на трёхгорлую колбу объёмом 250 $см^3$, а индикатор — на лабораторный pH-метр с комбинированным стеклянным электродом (погрешность ± 0,01 ед. pH). Непрерывная регистрация данных даёт полную картину динамики окисления — это помогает оценить интенсивность накопления низкомолекулярных продуктов окисления.

Полученные экспериментальные данные представили в виде зависимости pH-среды водной вытяжки от времени с применением трех образцов сорбента:

образец № 1 — цеолит с нанесённым на поверхность гидроксидом калия (5% масс.); образец № 2 — цеолит без гидроксида калия (0% масс.); образец № 3 — силикагель без гидроксида калия (0% масс.) (рисунок 18).

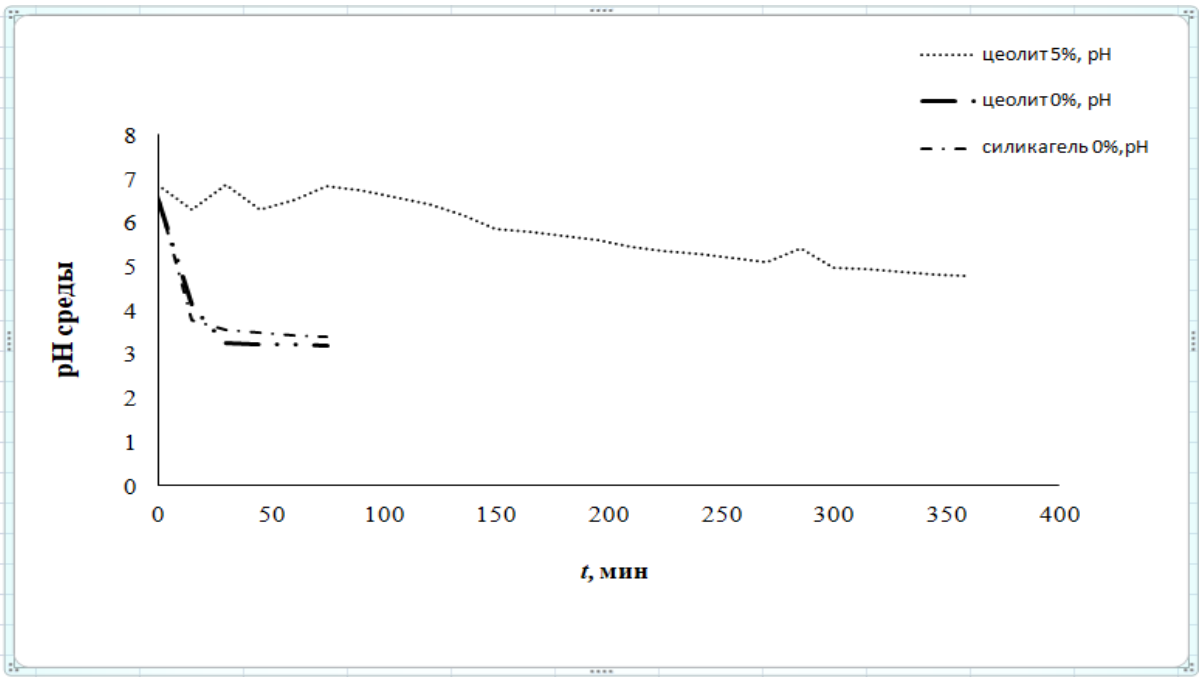


Рисунок 18 – Зависимость реакции среды водной вытяжки (pH) от времени при определении стабильности против окисления

Результаты эксперимента показали, что применение образца № 1 — комплексного поглотителя цеолита с содержанием гидроксида калия 5% масс. на поверхности, обеспечивает окислительную стабильность масла в течение 360 мин (6 ч), тогда как при использовании образцов № 2 и № 3 окисление наступает уже через 60 мин. Повышение времени стабильности при применении образца № 1 служит объективным подтверждением эффективности предложенной методики.

2.6.4 Определение содержания летучих низкомолекулярных кислот

1) По завершении окислительной стадии (согласно ГОСТ 981-75 [86]) ловушку отключали от аппарата, её содержимое переносили в коническую колбу вместимостью 50 $см^3$ (тип КН, ГОСТ 25336-82 [98]), затем ловушку дважды ополаскивали дистиллированной водой (ГОСТ Р 58144-2018 [97])

порциями по 5,0 $см^3$, а промывные воды количественно переносили в ту же колбу. Визуально проверяли отсутствие осадка или масляных следов на стенках ловушки. Полученный раствор использовали для последующих анализов (измерения кислотного числа по ГОСТ 5985-2022 [89] и др.)

2) Раствор в колбе титровали раствором гидроксида калия (KOH) с концентрацией c (KOH) = 0,05 моль/$дм^3$ потенциометрически либо титриметрически с индикатором фенолфталеином. Конечную точку титрования фиксировали по устойчивому слабо-розовому окрашиванию, сохраняющемуся в течение 30 с при перемешивании.

Для учёта систематической погрешности, обусловленной влиянием примесей в реактивах и индикатора, выполняли контрольный опыт: 120 $см^3$ дистиллированной воды (ГОСТ Р 58144-2018) титровали раствором KOH с концентрацией c (KOH) = 0,025 моль/$дм^3$ в тех же условиях до достижения идентичной слаборозовой окраски. Объём титранта, израсходованный в контрольном опыте, вычитали из объёма, затраченного на титрование основной пробы, при последующих расчётах.

Объём титранта фиксировали с точностью до 0,01 $см^3$ по градуировке бюретки (класс точности А, ГОСТ 29251-91 [98]). Титрование проводили при комнатной температуре (20 ± 2 °C) с медленной подачей титранта (по каплям).

3) Содержание летучих низкомолекулярных кислот (K, мг KOH/г масла) вычисляли по формуле ГОСТ 981-75. Титр рассчитывали по результатам не менее трёх параллельных определений (расхождение ≤ 0,03 мг KOH/г). Полученное содержание летучих низкомолекулярных кислот 0,22 – 0,23 % значительно превышает нормативные показатели для турбинных масел ТП-22С марка 1 — не более 0,07 мг KOH/г [17], что свидетельствует об интенсивном окислении масла и ухудшении его эксплуатационных свойств.

2.6.5. Определение содержания осадка

1) После завершения окисления аппарат ВТИ охлаждали до 60 °С. Для достижения однородности масло перемешивали путём кратковременной подачи воздуха (10 –15 сек), затем отмеряли точный объём окисленного масла (25,0 ± 0,1 см^3) и переносили его в мерный цилиндр вместимостью 100 см^3 с притёртой пробкой.

Масло растворяли в бензине «Галоша» непосредственно после окончания окисления, доводя общий объём раствора до 100 см^3. Полученный раствор оставляли на 12 ч в темноте при комнатной температуре для осаждения твёрдых частиц; далее проводили анализ на содержание осадка и определение кислотного числа.

2) После 12-часового выдерживания раствор фильтровали через бумажный фильтр. Фильтрат переносили в мерный цилиндр объёмом 250 см^3 с притёртой пробкой, осадок на фильтре промывали бензином. Объём фильтрата доводили до 200 см^3 добавлением бензина, перемешивали и использовали для определения кислотного числа.

Осадок на фильтре обрабатывали горячей смесью спирта и бензола, собирали раствор в коническую колбу объёмом 50 см^3, доведённую до постоянной массы. Спиртобензольную смесь удаляли отгонкой на водяной бане, затем осадок сушили в сушильном шкафу при (105 ± 3) °С: сначала 30 мин, потом – после двукратной промывки петролейным эфиром (по 5 см^3) — ещё 1,5 ч при той же температуре. Колбу охлаждали в эксикаторе 30 мин и взвешивали с точностью до 0,0002 г.

3) Массовую долю осадка в окисленном масле (X, %) вычисляли по формуле согласно ГОСТ 981-75. Образец № 1 продемонстрировал наилучшие показатели по осадкообразованию: содержание осадка составило 0,22 %, что ниже, чем у образца № 2 (0,27 %) и образца № 3 (0,50 %).

2.7 Выводы по главе 2

1. В условиях непрерывной эксплуатации газоперекачивающего агрегата ГТК-25ИР масло подвергается периодическому глубокому окислению, что приводит к ухудшению его эксплуатационных свойств. Данная тенденция чётко прослеживается по кинетическим зависимостям качественных показателей масла, в том числе ключевого показателя – кислотного числа масла до 0,28 мг KOH/г.

2. Анализ эффективности применяемых методов регенерации турбинного масла показал, что методы механической сепарации (центрифугирование, фильтрация) не обеспечивают требуемого уровня очистки отработанного масла от продуктов деградации. В результате физико-химические показатели масла (кислотное число, кинематическая вязкость, содержание ионов металлов) остаются за пределами допустимых норм согласно ТУ 38.101821-2013, что снижает эксплуатационные свойства масла и ускоряет износ оборудования.

3. Для высокой степени очистки масла целесообразно внедрить адсорбционно-щелочной метод, который сочетает химическое воздействие щелочи и адсорбционную очистку. Такой подход позволит повысить эффективность регенерации масла, продлить ресурс турбинного оборудования и снизить эксплуатационные затраты.

4. Результаты проведенных экспериментов по регенерации турбинного масла ТП-22С позволили сформулировать следующие выводы:

1) Подтверждено, что метод адсорбционно-щелочной регенерации турбинного масла марки ТП-22С с применением цеолита NaX в качестве комплексного поглотителя позволяет восстановить эксплуатационные свойства за счёт оптимального сочетания адсорбции и щелочной модификации.

2) Цеолит с нанесенным на поверхность KOH 5% масс. (образец № 1) продемонстрировал более высокую адсорбционную способность по сравнению с образцами № 2 и № 3. Это подтверждает эффективность модификации

цеолита гидроксидом калия для очистки турбинных масел от низкомолекулярных продуктов окисления.

3) Исследование индукционного периода окисления турбинного масла согласно ГОСТ 981-75 с применением прибора ВТИ подтвердило результативность усовершенствованной методики и эффективность комплексного поглотителя (замена склянки Дрекселя на трёхгорлую колбу и индикатора — на pH-метр с погрешностью ± 0,01 ед. pH), позволившей точно определить индукционный период и оценить динамику накопления низкомолекулярных продуктов окисления.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С

3.1 Постановка задачи экспериментального исследования процесса регенерации с применением адсорбционно-щелочной очистки

Целью экспериментального исследования процесса регенерации с применением адсорбционно-щелочной очистки является определение условий регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С с применением синтетического модифицированного сорбента. Основная задача — экспериментально обосновать возможность восстановления эксплуатационных характеристик масла методом адсорбционно-щелочной регенерации с применением цеолита NaX, содержащего гидроксид калия, а также установить совокупность параметров процесса, обеспечивающих соответствие качества регенерированного масла действующим нормативным требованиям [114].

Методика экспериментального исследования процесса регенерации турбинного масла предусматривала контроль динамики кислотного числа (в мг КОН/г) как ключевого показателя эффективности очистки в зависимости от времени обработки. В качестве сорбента для регенерации применяли комплексный поглотитель – синтетический цеолит марки NaX, содержащий на поверхности гидроксид калия, что позволило оценить влияние щелочи на эффективность процесса. Проведены исследования влияния концентрации гидроксида калия в комплексном поглотителе, температуры, времени реализации процесса и гидродинамических параметров на кинетику процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С.

Для выявления лимитирующей стадии процесса регенерации отработанного масла реализован поэтапный подход к изучению ключевых факторов. На первом этапе оценивали влияние температуры на эффективность очистки при фиксированных значениях концентрации гидроксида калия и частоты вращения мешалки. На втором этапе анализировали роль

гидродинамических параметров, а именно, частоты вращения перемешивающего устройства — при постоянной температуре и составе сорбента. Далее исследовали кинетику процесса с учётом варьирования концентрации щёлочи в комплексном поглотителе и интенсивности перемешивания, что позволило оценить действие гидродинамического фактора.

Получение комплексного поглотителя на основе цеолита достигалось путем обработки синтетического сорбента цеолита марки NaX щелочью, а именно, нанесением слоя гидроксида калия на поверхность сорбента. Сорбент готовился по методике, указанной в главе 2 (п.2.6.1). Диаметр зерна адсорбента приняли равным $d_{ср}$ = 2,05 мм. С учётом литературных данных [37, 102], при размере зёрен менее 3 мм процесс может лимитироваться внешней диффузией, поэтому в эксперименте варьировали частотой вращения мешалки.

Данные для определения пористости и порозности сорбента цеолита марки NaX представлены ниже:

Диаметр частиц $d_{ср}$, мм..... 2,05

Объем цеолита насыпной $V_{нас}$, м^3 ..... $2{,}496 \cdot 10^{-5}$

Объем пор $V_{пор}$, м^3..... $4{,}511 \cdot 10^{-6}$

Объем цеолита $V_{ц}$, м^3 ..... $8{,}181 \cdot 10^{-6}$

Рассчитанные коэффициенты пористости ξ и порозности ε равны соответственно:

$\xi = V_{пор} / V_{ц} = 0{,}551$ (55,1%);

$\varepsilon = V_{пор} / V_{нас} = 0{,}181$ (18,1%).

Полученное значение коэффициента пористости ξ для цеолитов указывает, что 55 % объёма твёрдой фазы занимают поры; коэффициент порозности ε означает, что 18 % насыпного объёма занимают поры между зёрнами. Это свидетельствуют о развитой внутренней поверхности и достаточной межзерновой пористости, что обеспечивает эффективный массоперенос и доступность адсорбционных центров при выбранных гидродинамических условиях.

Методики контроля, описанные в разделе 2.5, использованы для оценки эффективности регенерации в Главе 3.

3.1.1 Кинетика изменения кислотного числа при адсорбционно-щелочной регенерации

Для лабораторного моделирования процесса адсорбционно-щелочной регенерации масла использовали лабораторный химический стакан вместимостью 500 $см^3$ (ГОСТ 25336-82), в который помещали 300 $см^3$ отработанного турбинного масла. В масло вводили комплексный поглотитель — цеолит NaX, содержащий на поверхности KOH в концентрациях 0, 0.1, 0.5, 1.0 и 5.0 % масс. (от массы цеолита) в количестве 10 % от массы масла. Перемешивание реакционной смеси осуществляли лабораторной механической мешалкой с верхним приводом (двухлопастная мешалка) при фиксированной частоте вращения 50 об/мин, температуре 24 °C и атмосферном давлении. Исходное значение кислотного числа составляло 0,36 мг KOH/г.

Для изучения кинетики процесса пробы объёмом 2 $см^3$ отбирали через фиксированные промежутки времени (15, 30, 60, 90 и 120 мин). Анализ кислотного числа проводили по ГОСТ 5985-2022. Каждый эксперимент выполняли в трёх параллельных опытах; рассчитывая среднее арифметическое значение и стандартное отклонение**.** Анализ кинетических кривых, полученных при различных концентрациях щёлочи, позволил определить рациональные параметры процесса (концентрацию щёлочи и продолжительность контакта фаз) (рисунок 19).

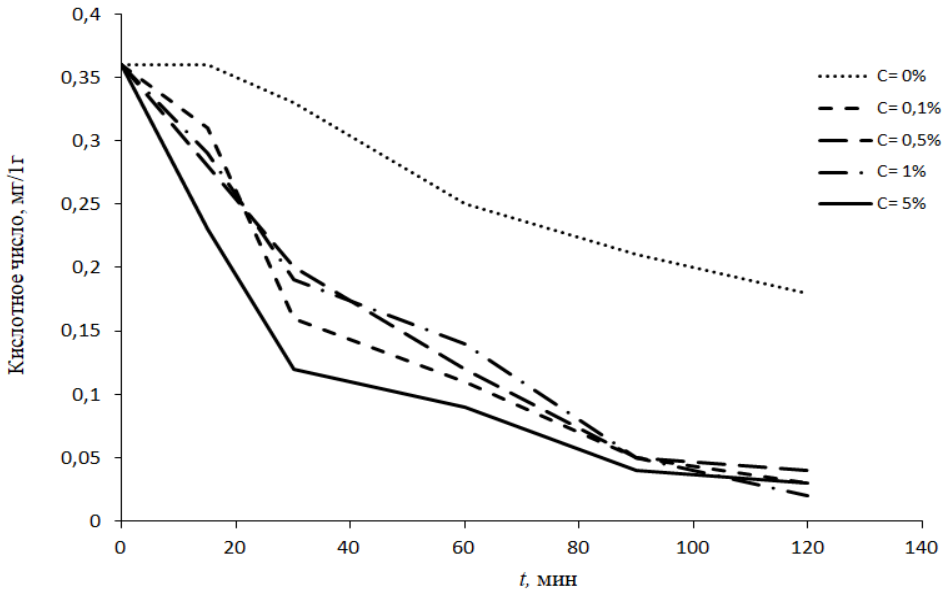


Рисунок 19 – Кинетика процесса регенерации отработанного турбинного масла. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин

Рисунки 19 а)–д) представляют графики регрессионного анализа процесса регенерации при частоте вращения привода мешалки 50 об/мин.

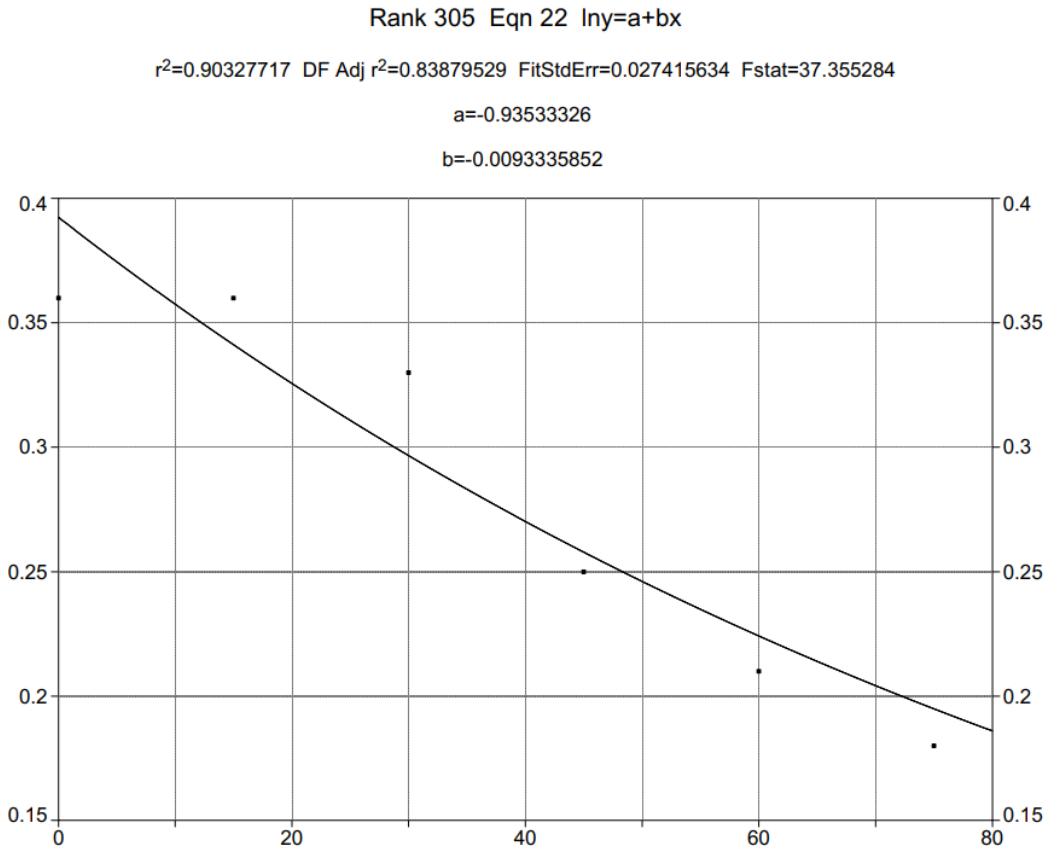


Рисунок 19 а) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин - концентрация комплексного поглотителя 0%масс.

Модель логарифмической регрессии ln(y)=–0,9353–0,0093x с высоким коэффициентом детерминации (R^2=0,9033), низкой стандартной ошибкой (0,0274) и значимой F-статистикой (37,3553) подтверждает надёжную обратную зависимость между x и y.

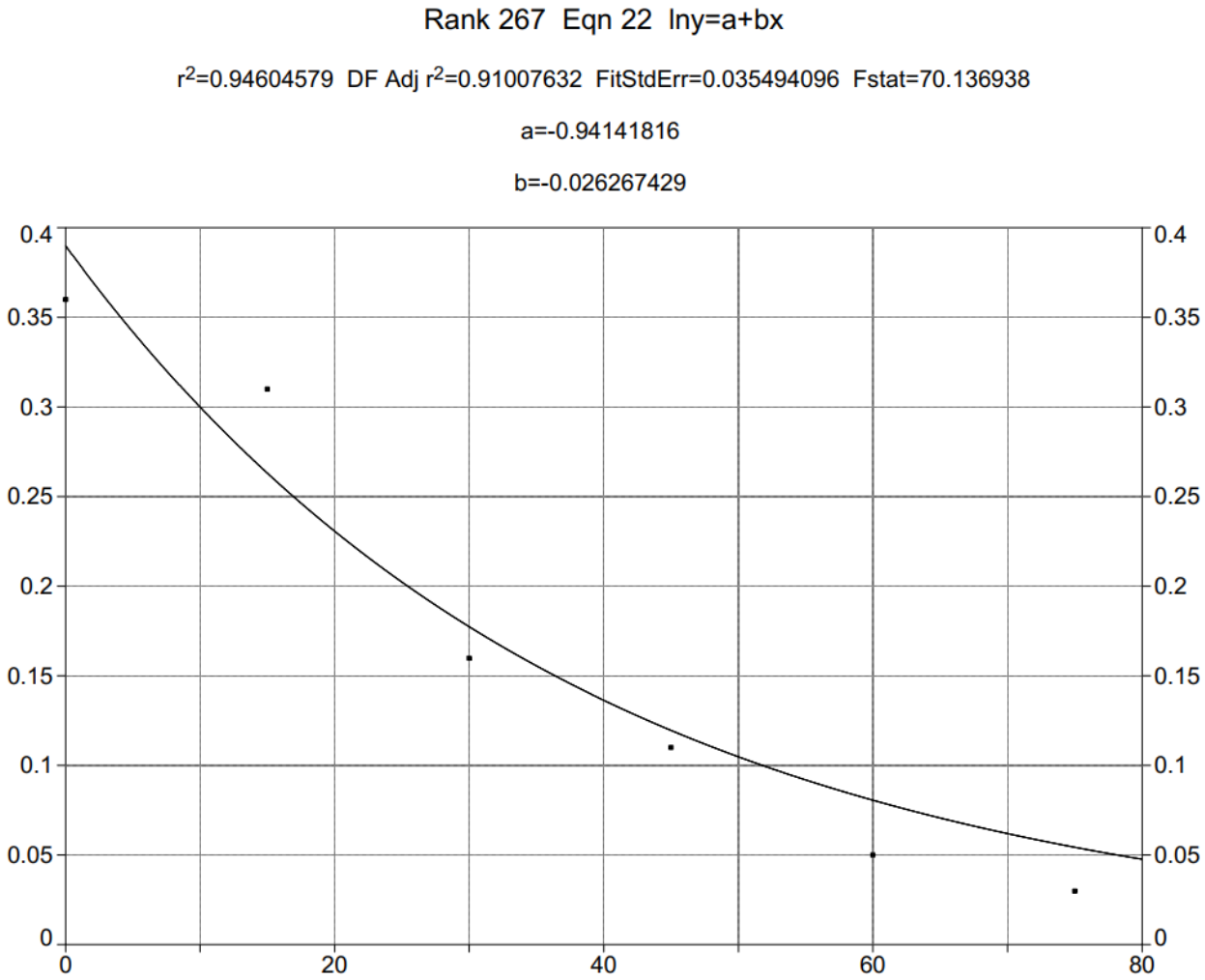


Рисунок 19 б) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,1% масс.

Логарифмическая регрессионная модель ln(y) = a + bx (с коэффициентами a = –0,94141816 и b = –0,026267429) демонстрирует сильную обратную зависимость между переменными (R^2 = 0,94604579), низкую стандартную ошибку аппроксимации (FitStdErr = 0,035494096) и высокую статистическую значимость (Fstat = 70,1369938), что отражено на графике убывающей кривой с разбросом точек вдоль тренда.

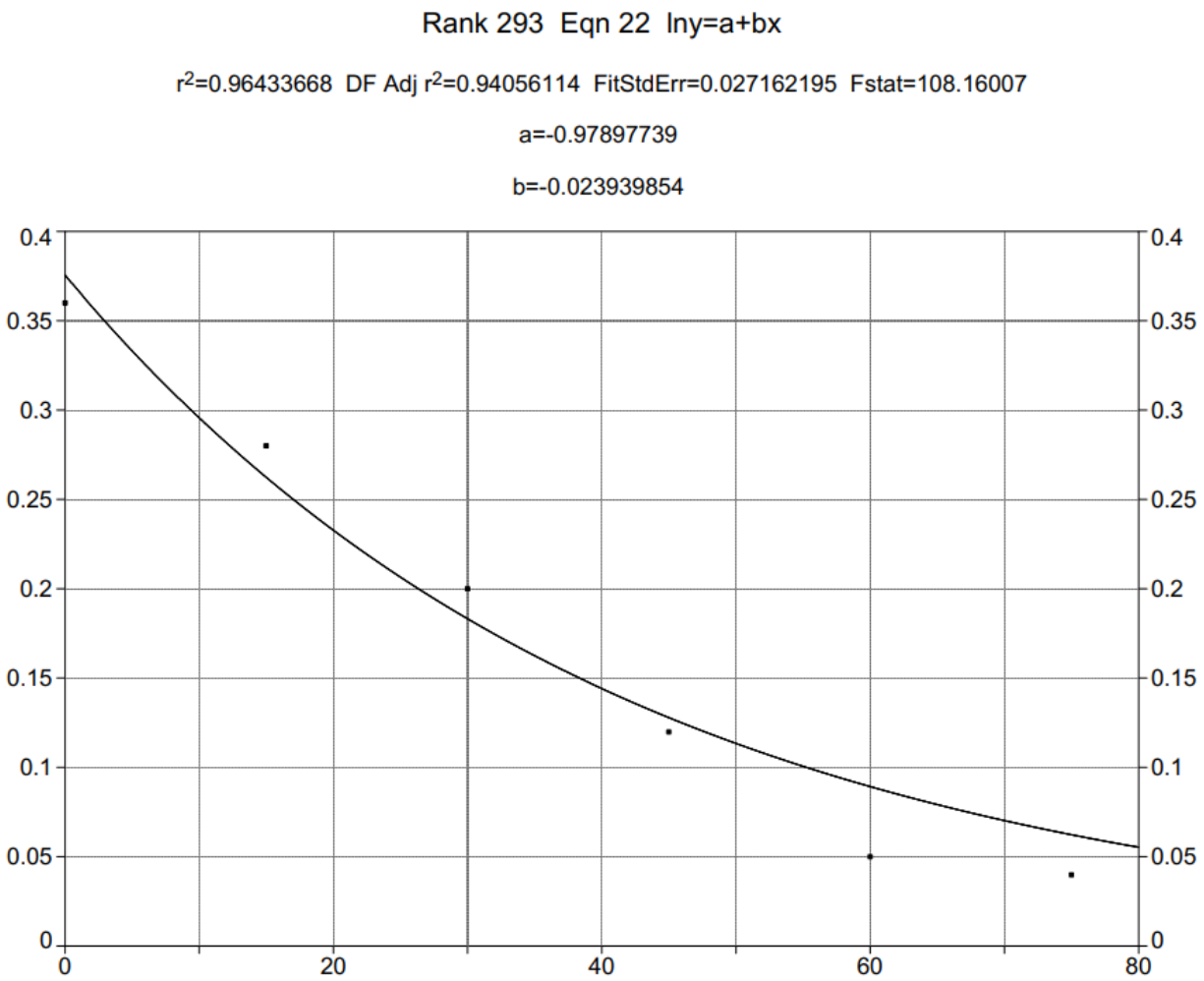


Рисунок 19 в) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,5 % масс.

Логарифмическая регрессионная модель lny = a + bx (a = 0.97897739, b = 0.023939854) демонстрирует высокую степень соответствия данных (r^2 = 0.96433668), низкую стандартную ошибку аппроксимации (FitStdErr = 0.027162195) и статистическую значимость (Fstat = 108.16007), отображая убывающую зависимость между переменными на графике.

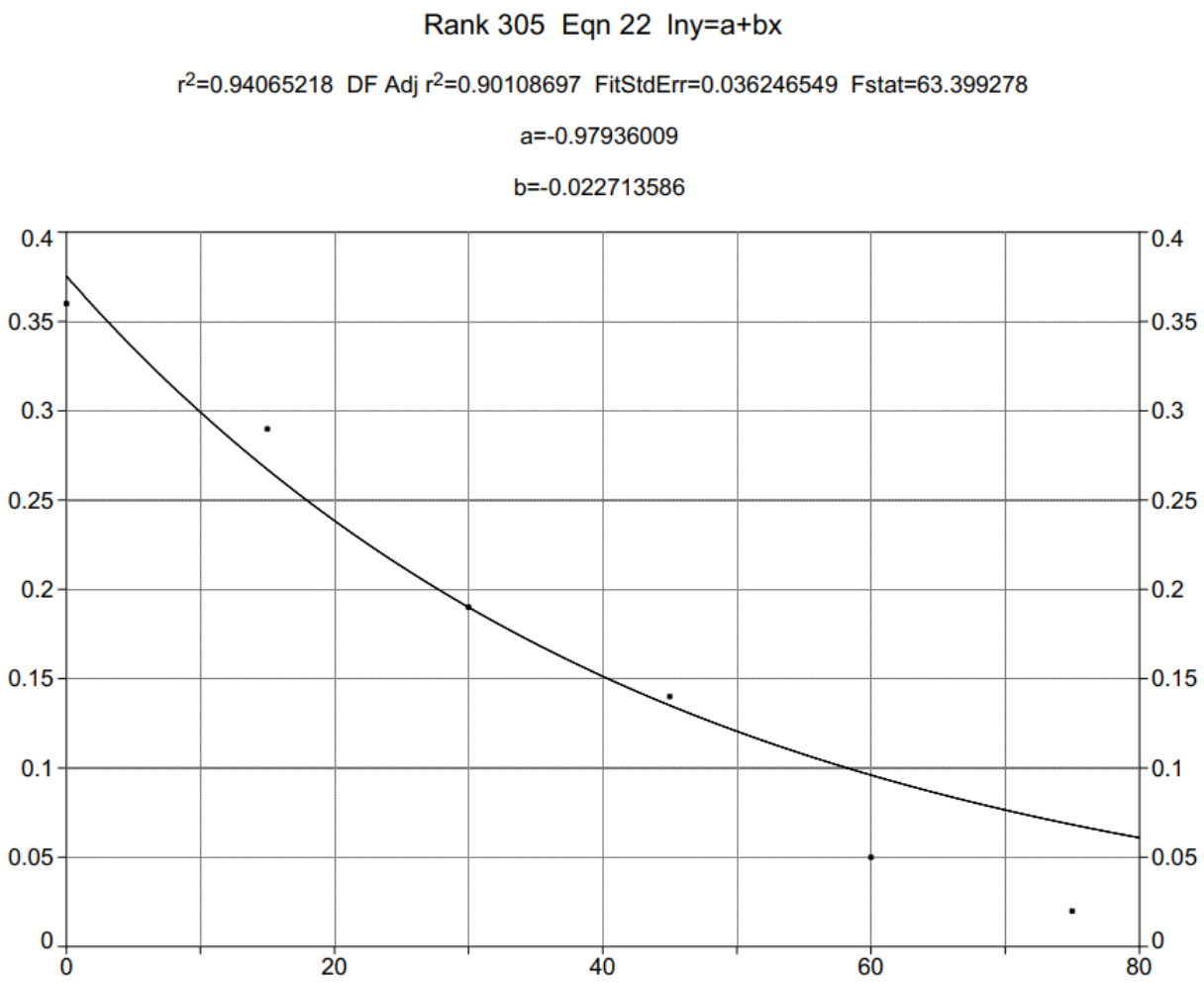


Рисунок 19 г) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 1% масс.

График показывает убывающую зависимость между переменными по модели ln(y) = a + bx (a = –0,9794, b = –0,0227), с высоким соответствием данных (r^2 = 0,9407) и статистической значимостью (Fstat = 63,399).

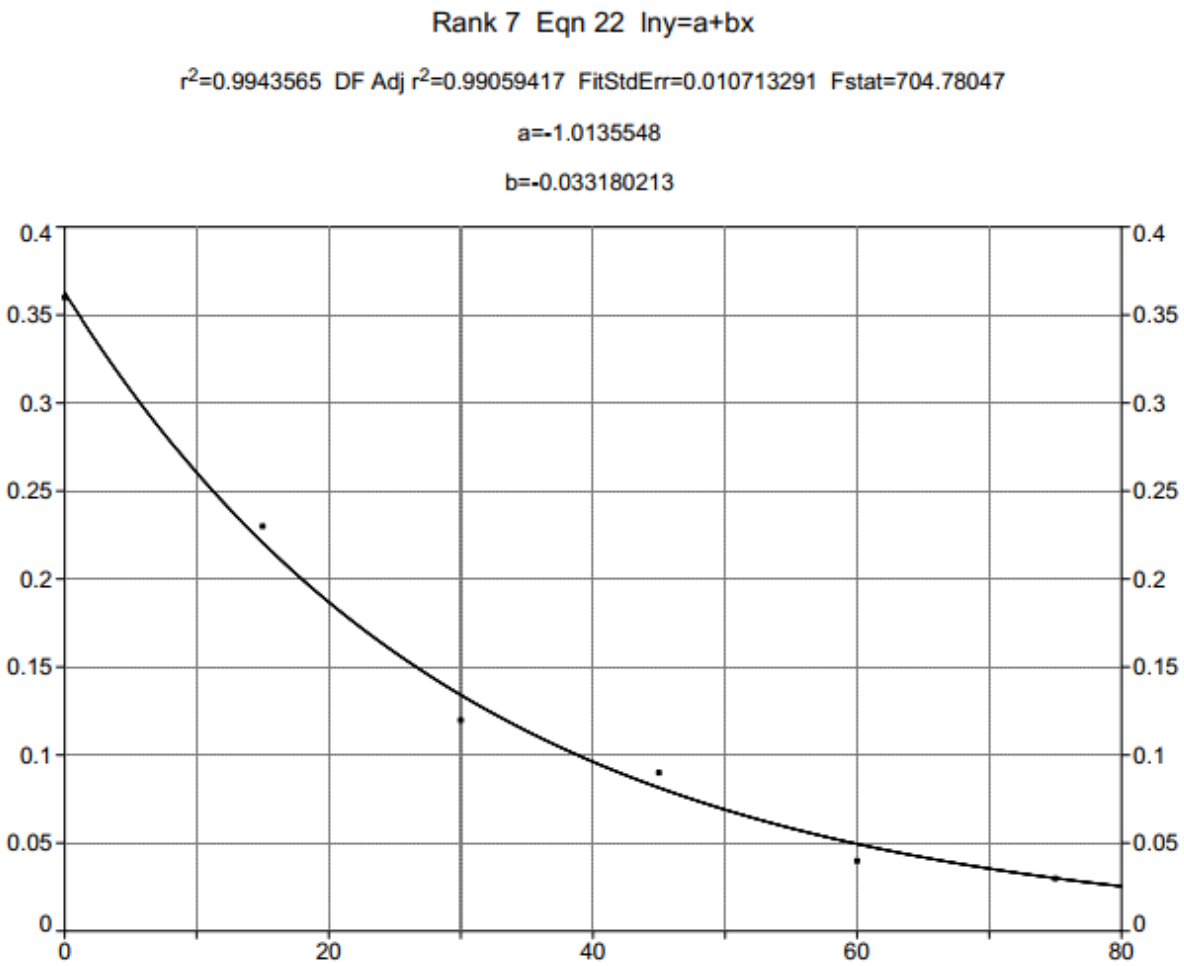


Рисунок 19 д) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 5% масс.

График демонстрирует статистически значимую убывающую зависимость между переменными ($\ln(y) = a + bx$, где $a = -1{,}0135548$, $b = -0{,}033180213$) с высоким коэффициентом детерминации ($r^2 = 0{,}9943565$), низкой стандартной ошибкой аппроксимации (FitStdErr = 0,010713291) и значимым F-критерием (Fstat = 704,78047), отражая надёжную логарифмическую связь в диапазоне x от 0 до 80.

Экспериментально установлено, что использование комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия, приводит к существенной интенсификации процесса регенерации турбинного масла ТП-22С. Перемешивание при 50 об/мин позволило определить рациональные параметры процесса (концентрацию щёлочи и

продолжительность контакта фаз) и достигнуть нормативного значения кислотного числа (не более 0,07 мг KOH/г) через 60 мин, что в 2 раза быстрее, чем в контрольном опыте без поглотителя (120 мин).

3.1.2 Определение механических примесей и зольности турбинного масла

В процессе лабораторных исследований с отработанным турбинным маслом определили содержание воды с помощью прибора АКОВ согласно ГОСТ 2477-2014 «Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды» (рисунок20). Исследованию подлежали два образца турбинного масла марки ТП-22С: образец № 1, взятый из маслобака рабочей турбины, и образец № 2 — после регенерации цеолитом. После количественного определения содержания воды получили результаты: в 1 и 2 образцах – массовая доля (*W*) менее 0,001 %. Уровень воды остался на следовых значениях и не свидетельствует о значимом образовании воды в ходе регенерации [84].



Рисунок 20 – Определение содержания воды в масле с помощью прибора АКОВ

Определили механические примеси экспериментальных проб турбинного масла согласно ГОСТ 6370-2018 [90].По полученным экспериментальным

данным содержание механических примесей в образце № 1 составило 0,001 %, в образце № 2 – 0,01 %, что превышает установленную норму 0,005 % согласно ТУ 38.101821-2013. Данный факт свидетельствует об образовании намола адсорбента после истирания его частиц во время контактной регенерации с применением перемешивающего устройства.

Дополнительно определена зольность нефтепродуктов в соответствии с требованиями ГОСТ 1461-75. Результаты показали содержание золы 0,01 % в образце № 1 и 0,08 % в образце № 2. Повышенная зольность в регенерированном масле указывает на присутствие минеральных примесей, источником которых могут быть как эксплуатационные загрязнения, так и продукты износа конструкционных материалов, а также фрагменты адсорбента.

Сравнительные характеристики исходного и регенерированного масла (образцы № 1 и № 2 соответственно) приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнительные характеристики образцов масла № 1 и № 2

№ п/п	Свойство масла	Образец № 1	Образец № 2	Норма по ТУ 38.101821-2013
1	Содержание воды	менее 0,001 %	менее 0,001 %.	Не допускается (следы)
2	Механические примеси	0,001 %	0,01 %	≤ 0,005
3	Зольность	0,01 %	0,08 %	-

Результаты исследования, полученные с применением прибора ПКЖ-904А согласно ГОСТ 17216, указывают на то, что наиболее опасными для оборудования являются частицы размером от 50 до 100 мкм, присутствующие в масле. Рост содержания механических примесей в образце № 2 коррелирует с увеличением доли частиц размером 50 – 100 мкм (рисунок 21), что подтверждает вторичное загрязнение масла продуктами истирания адсорбента в процессе контактной регенерации.

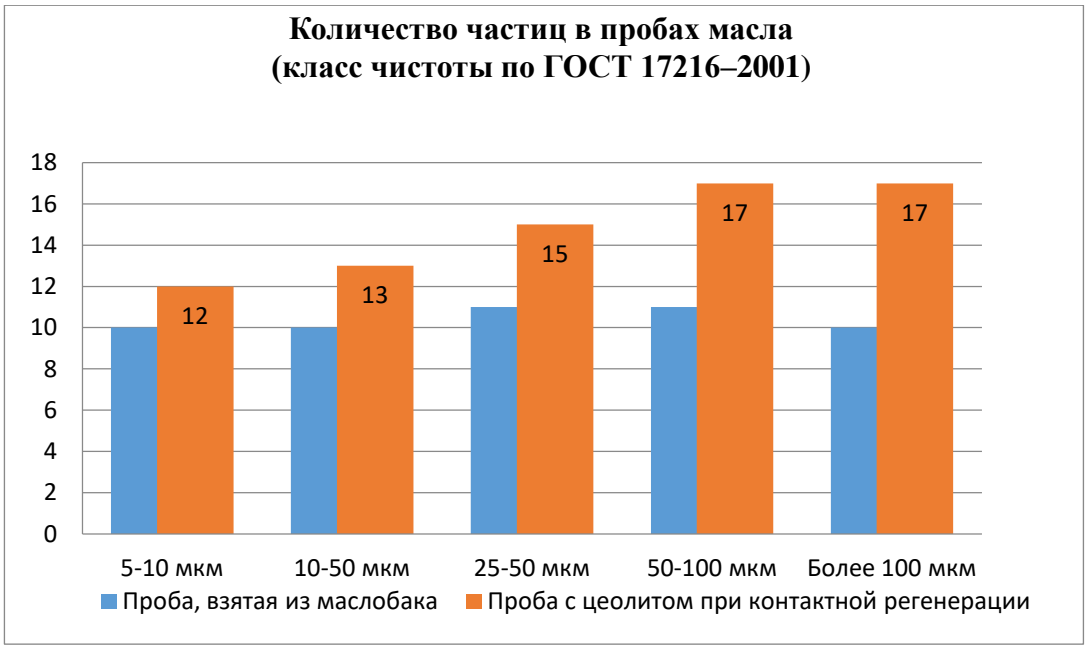


Рисунок 21 – Распределение механических примесей по размерам в турбинном масле ТП-22С

Проведённое исследование показало, что намол адсорбента вносит существенный вклад в увеличение содержания механических примесей и зольных компонентов в масле, что потенциально может негативно сказаться на эксплуатационной надёжности оборудования. В связи с этим рекомендуется проводить дополнительную очистку регенерированного масла с применением фильтрации для удаления мелкодисперсных частиц намола, а также рассмотреть возможность улучшения процесса подготовки цеолита к регенерации масла.

3.1.3 Исследование влияния температуры на процесс регенерации турбинного масла

Изучено влияние температуры на изменение кислотного числа в процессе регенерации отработанного масла, поскольку рост этого показателя отражает накопление низкомолекулярных продуктов окисления (органических кислот) и является основным фактором риска деградации эксплуатационных свойств масла и провоцирует износ компрессорного оборудования.

Исследования проведены в температурном диапазоне 25 – 35 °С с

фиксацией экспериментальных данных в дискретных точках: 25, 28, 32 и 35 °С. Выбранный интервал температур обеспечивает достаточную вариативность для построения кинетических кривых изменения ключевых показателей качества масла (в том числе кислотного числа) и последующего расчёта энергии активации процесса по уравнению Аррениуса. Полученные данные (рисунок 22) позволяют оценить влияние температуры на скорость регенерации, выявить лимитирующие стадии процесса и определить энергию активации – параметр, характеризующий энергетический барьер химических и массообменных превращений при очистке масла.

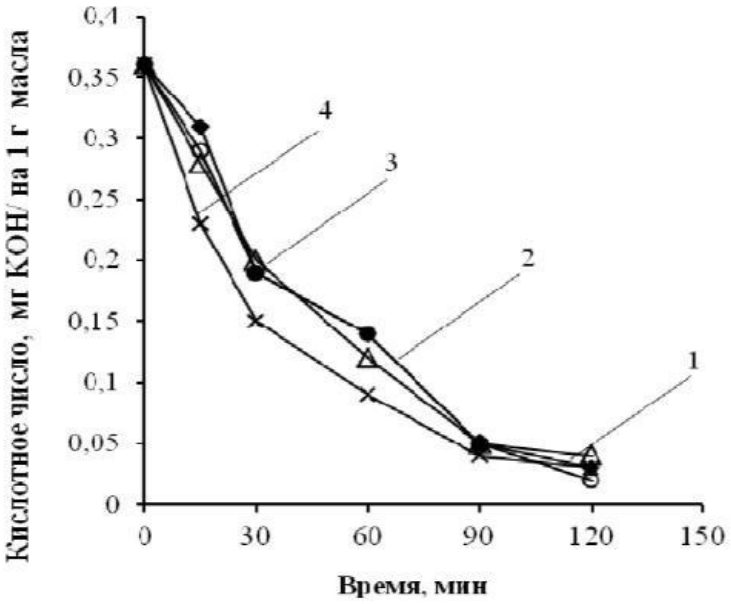


Рисунок 22 – Кинетика процесса регенерации отработанного масла при температуре процесса, ℃: 1- 25℃, 2- 28℃, 3- 32℃, 4- 35 ℃ (*C* = 1% масс.)

Установлено, что изменение температуры в диапазоне 25–35 °С не приводит к резкому увеличению скорости регенерации.

3.1.4 Кинетические характеристики реакции: определение энергии активации и температурного коэффициента

Температурные зависимости позволили оценить значение кажущейся энергии активации процесса регенерации турбинного масла ТП-22С. Энергия активации процесса регенерации определена графическим методом по

уравнению Аррениуса. Для этого построена зависимость константы скорости реакции от абсолютной температуры $\ln K = f(1/T)$ (рисунок 23). Экспериментальные данные получены в температурном диапазоне 25–35°С. Коэффициент корреляции линейной аппроксимации – $R^2 \geq 0{,}99$. Среднее значение энергии активации составило $E_{a\,ср} = 6{,}68$ кДж/моль.

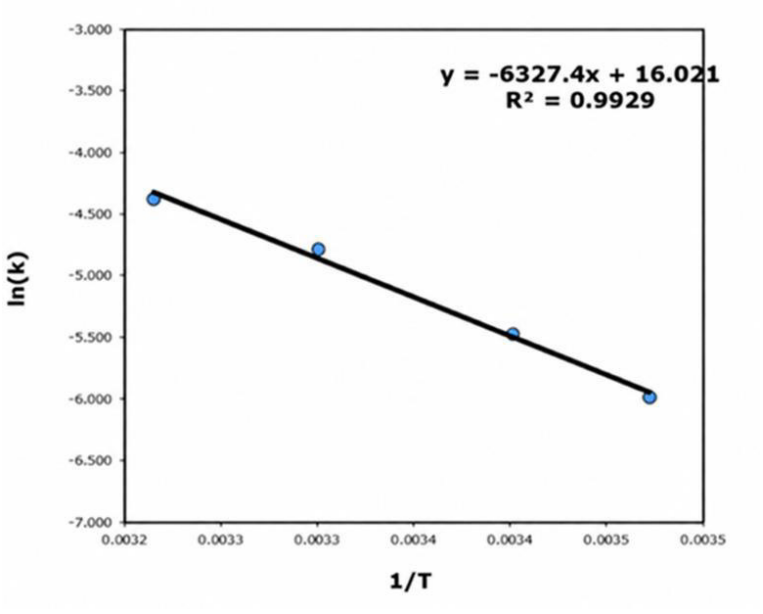


Рисунок 23 – Энергия активации процесса регенерации

Согласно данным, приведённым на рисунке 24, температурный коэффициент скорости процесса составил $k_t \leq 1{,}2$. Значение k_t, близкое к единице, характерно для процессов, лимитируемых стадией массопереноса (диффузией), и согласуется с низкой энергией активации. Данный факт подтверждает, что процесс регенерации находится в диффузионной области и определяется стадией массообмена [26, 103].

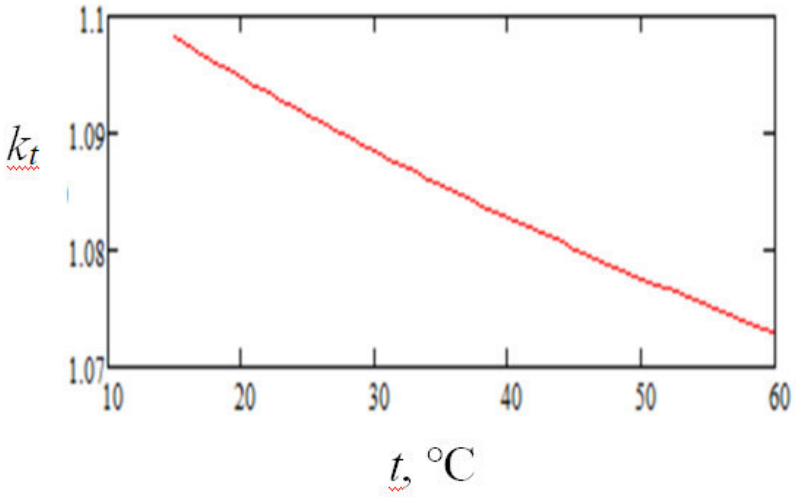


Рисунок 24 – Зависимость коэффициента скорости реакции от температуры процесса t (°C)

На основании установленного коэффициента ($k_t \leq 1{,}2$) и среднего значения энергии активации ($E_{a\,ср} = 6{,}68$кДж/моль) процесс регенерации отнесён к диффузионной области. В связи с этим возникла необходимость определить тип диффузионного контроля — внешняя либо внутренняя диффузия. Дальнейшие исследования были направлены на оценку влияния гидродинамических параметров, в частности, частоты вращения перемешивающего устройства на эффективность регенерации турбинного масла.

3.1.5 Исследование влияния гидродинамических параметров перемешивания на кинетику процесса регенерации

Цель — идентифицировать тип диффузии (внешняя/внутренняя), лимитирующей скорость регенерации масла ТП-22С, и обосновать способы её интенсификации.

Для установления лимитирующей стадии диффузионного процесса изучено влияние частоты перемешивания (n = 50–400 об/мин) на кинетику адсорбционно-щелочной регенерации. Согласно литературным данным [103], интенсивное перемешивание снижает сопротивление внешнего массопереноса

за счёт уменьшения толщины диффузионного пограничного слоя у поверхности сорбента.

Процесс перемешивания масла с комплексным поглотителем *1* проводили в емкости (рисунок 25), представляющую собой лабораторную установку, состоящую из герметичного стеклянного сосуда объёмом 500 см^3 (рабочая ёмкость *4*), лопастной мешалки *5* из нержавеющей стали (двухлопастная мешалка) диаметром d = 64,8 мм, закреплённой на приводном валу *2* электродвигателя постоянного тока с регулируемой частотой вращения, и монтажного штатива *3*, обеспечивающего жёсткую фиксацию элементов конструкции [104].

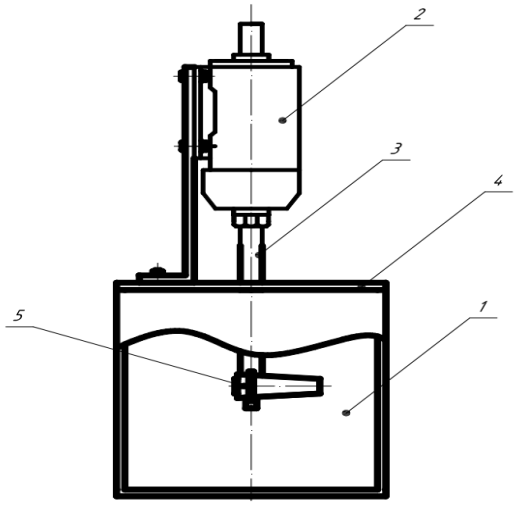


Рисунок 25 – Вид лабораторного перемешивающего устройства

Для выявления характера лимитирующей стадии был выбран диапазон 50 – 400 об/мин с неравномерным шагом: низкие частоты (50 – 150 об/мин) позволяют оценить базовый уровень массопереноса, а резкий скачок до 400 об/мин — проверить, наступает ли переход в режим турбулентности. Оценивали кислотное число через 15, 30, 60, 90, 120 мин титриметрическим методом согласно ГОСТ 5985-2022 (индикатор — нитразиновый жёлтый, титрант — 0,05 моль/дм³ спиртовой раствор гидроксида калия). Значение

исходного кислотного числа отработанного турбинного масла ТП-22С составило 0,36 мг КОН/г (среднее по трём параллельным определениям).

Согласно данным, представленным на графике (рисунок 26), интенсификация перемешивания способствует существенному снижению кислотного числа $К_ч$ со значений 0,36 до 0,07 мг КОН/г. Установлено, что кинетика регенерации турбинного масла существенно зависит от гидродинамических параметров (частоты вращения перемешивающего устройства).

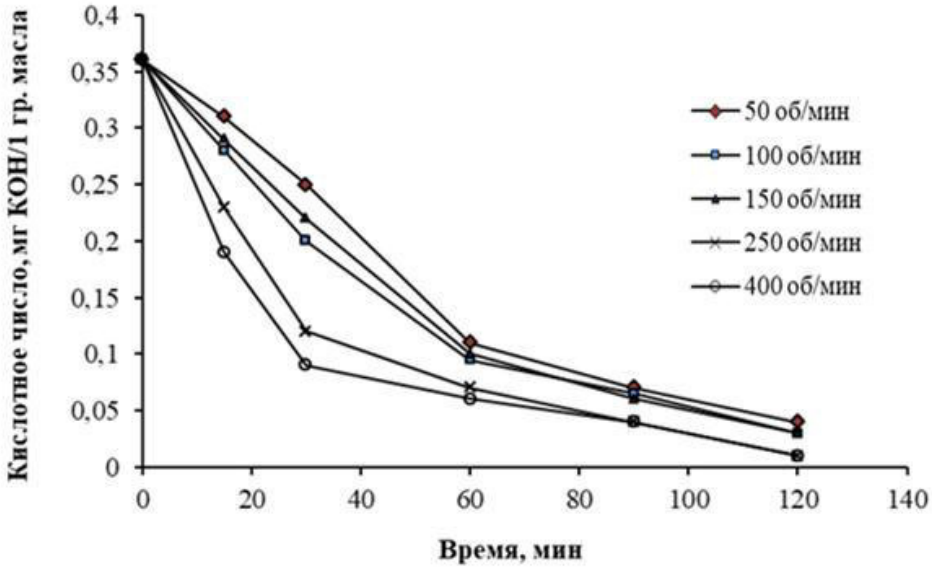


Рисунок 26 – Влияние частоты вращения на изменение кислотного числа с применением комплексного поглотителя, концентрацией $С$ = 1% масс.

Полученные данные позволили выдвинуть гипотезу о внешнедиффузионном характере контроля процесса: интенсификация перемешивания сокращает толщину диффузионного пограничного слоя у поверхности сорбента, что напрямую ускоряет массоперенос [105]. Результаты регрессионного анализа кинетики регенерации с комплексным поглотителем приведены на рисунок 27 а)–д).

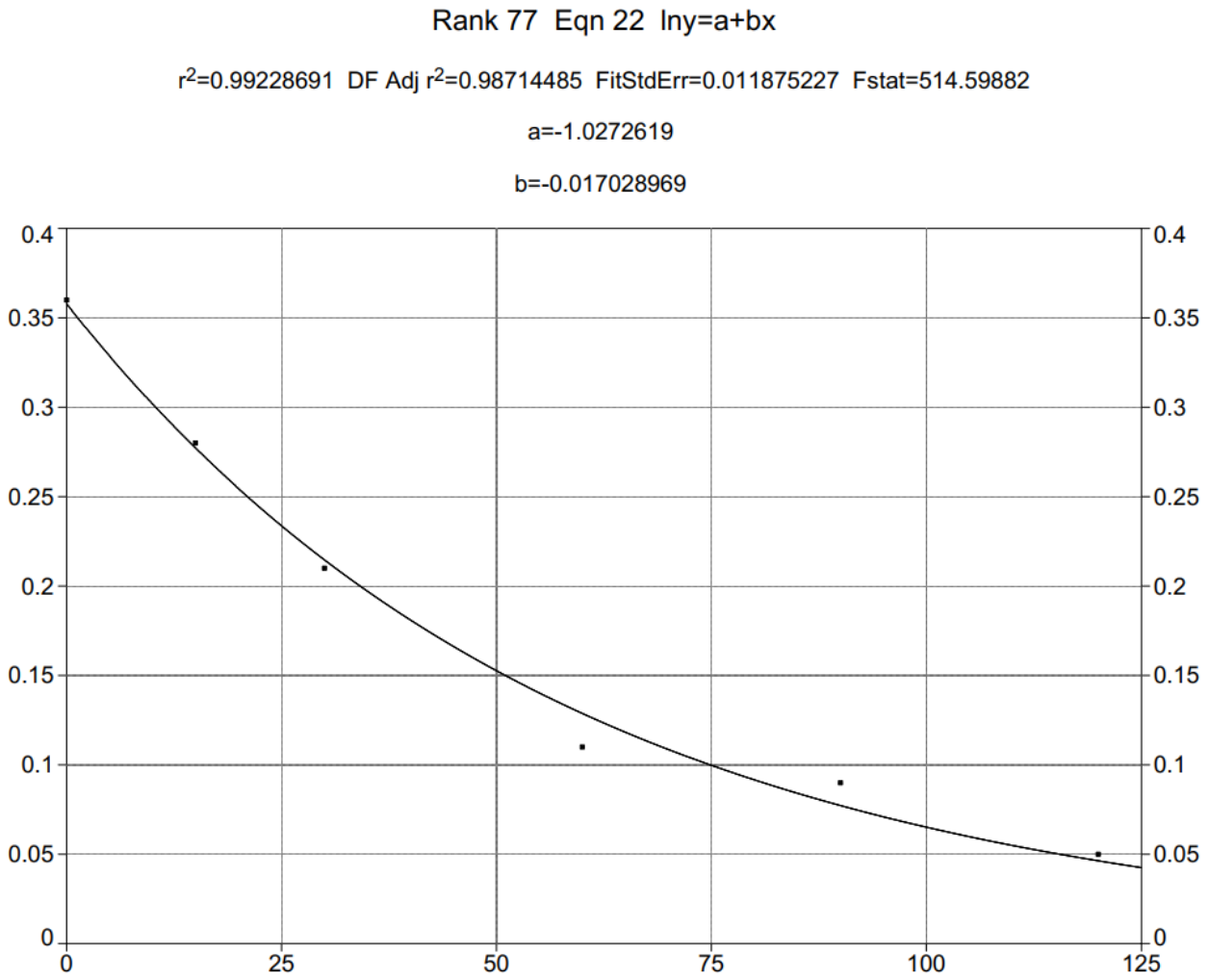


Рисунок 27 а) – Влияние частоты вращения на изменение кислотного числа с применением комплексного поглотителя, концентрацией *C* = 1% масс. – частота вращения 50 об/мин

На графике представлена статистически значимая убывающая линейная зависимость в логарифмическом масштабе (ln(y) = a + bx; a = –1,0272619, b = –0,017028969) с высоким коэффициентом детерминации (r^2 = 0,99228691), скорректированным коэффициентом (Adj r^2 = 0,98714485), низкой стандартной ошибкой аппроксимации (FitStdErr = 0,01187527) и значимым F-критерием (Fstat = 514,59882), отражающая надёжную корреляцию между переменными в диапазоне значений X от 0 до 125 и Y (ln(y)) от 0 до 0,4.

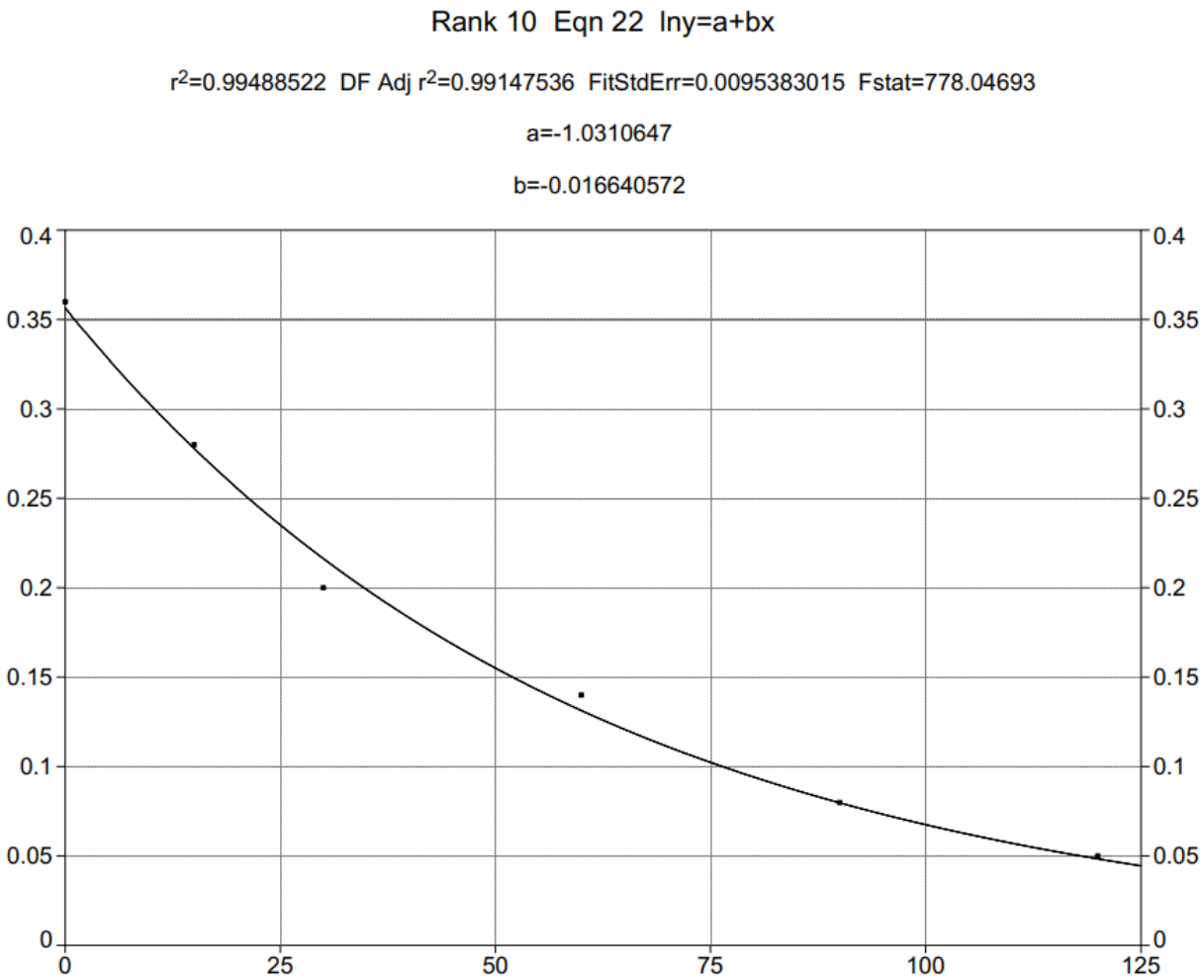


Рисунок 27 б) – Влияние частоты вращения на изменение кислотного числа с применением комплексного поглотителя, концентрацией *C* = 1% масс. – частота вращения 100 об/мин

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (уравнение: ln(y) = –1.0310647 – 0.016640572·x) в диапазоне X от 0 до 125, с высокой точностью аппроксимации (r^2 = 0.9949), низкой стандартной ошибкой (0.0095) и статистически значимой F-статистикой (778.05), где Y (ln(y)) изменяется от ~0.05 до 0.35.

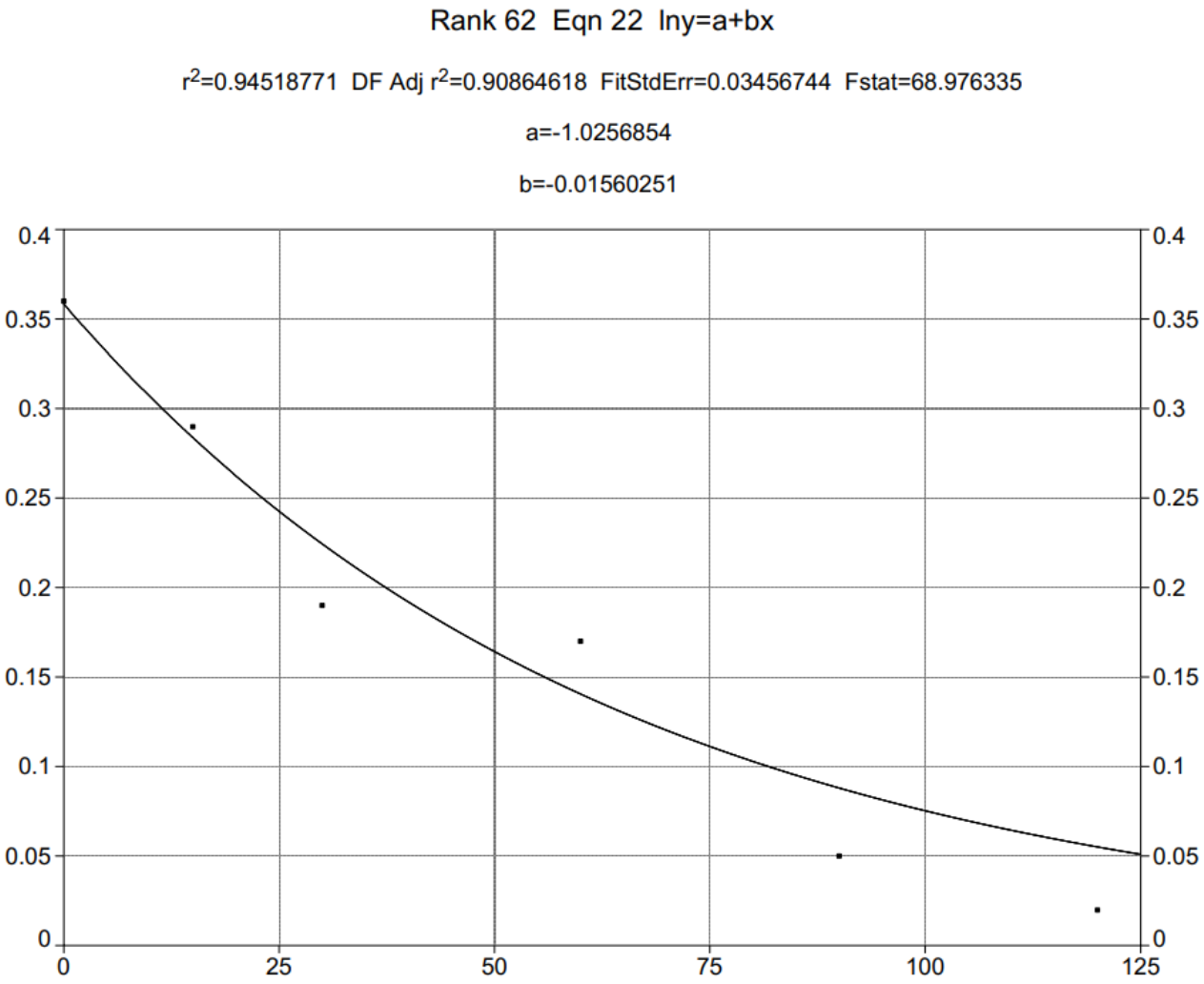


Рисунок 27 в) – Влияние частоты вращения на изменение кислотного числа с применением комплексного поглотителя, концентрацией *C* = 1% масс.
– частота вращения 150 об/мин

График показывает убывающую линейную зависимость ln(y) от x (уравнение: ln(y) = –1.0256854 – 0.01560251·x) в диапазоне X от 0 до 125; модель объясняет 94.52% вариации данных (r^2 = 0.94518771), имеет низкую стандартную ошибку (0.03456744) и статистически значимую F-статистику (68.976335); значения ln(y) изменяются от ~0.05 до 0.35.

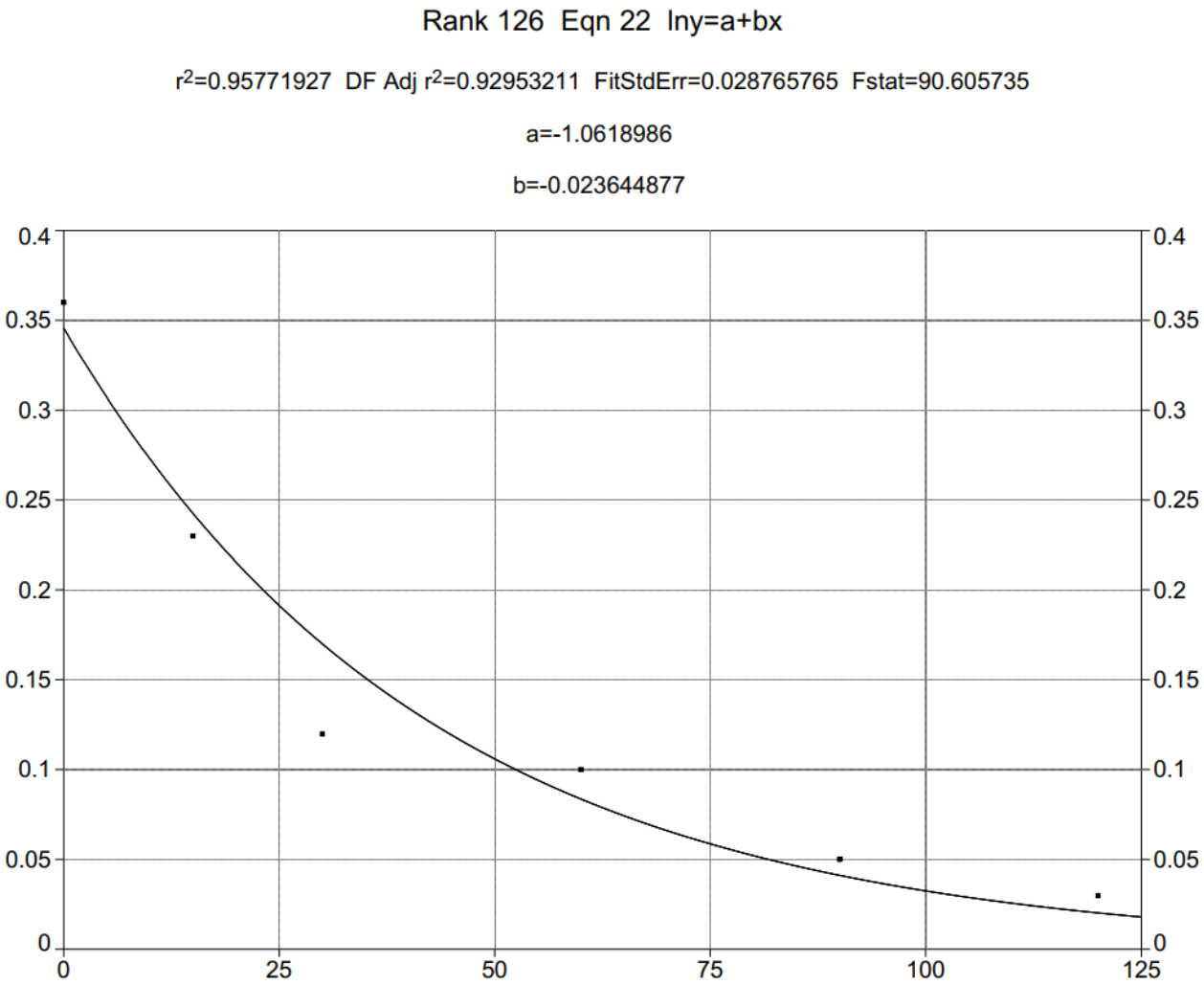


Рисунок 27 г) – Влияние частоты вращения на изменение кислотного числа с применением комплексного поглотителя, концентрацией *C* = 1% масс. – частота вращения 250 об/мин

График показывает убывающую линейную зависимость ln(y) от x (уравнение: ln(y) = –1.0618986 – 0.023644877·x) в диапазоне X от 0 до 125; модель объясняет 95.77% вариации данных (r^2 = 0.95771927), имеет низкую стандартную ошибку (0.028765765) и статистически значимую F-статистику (90.605735); значения ln(y) изменяются от ~0 до 0.4.

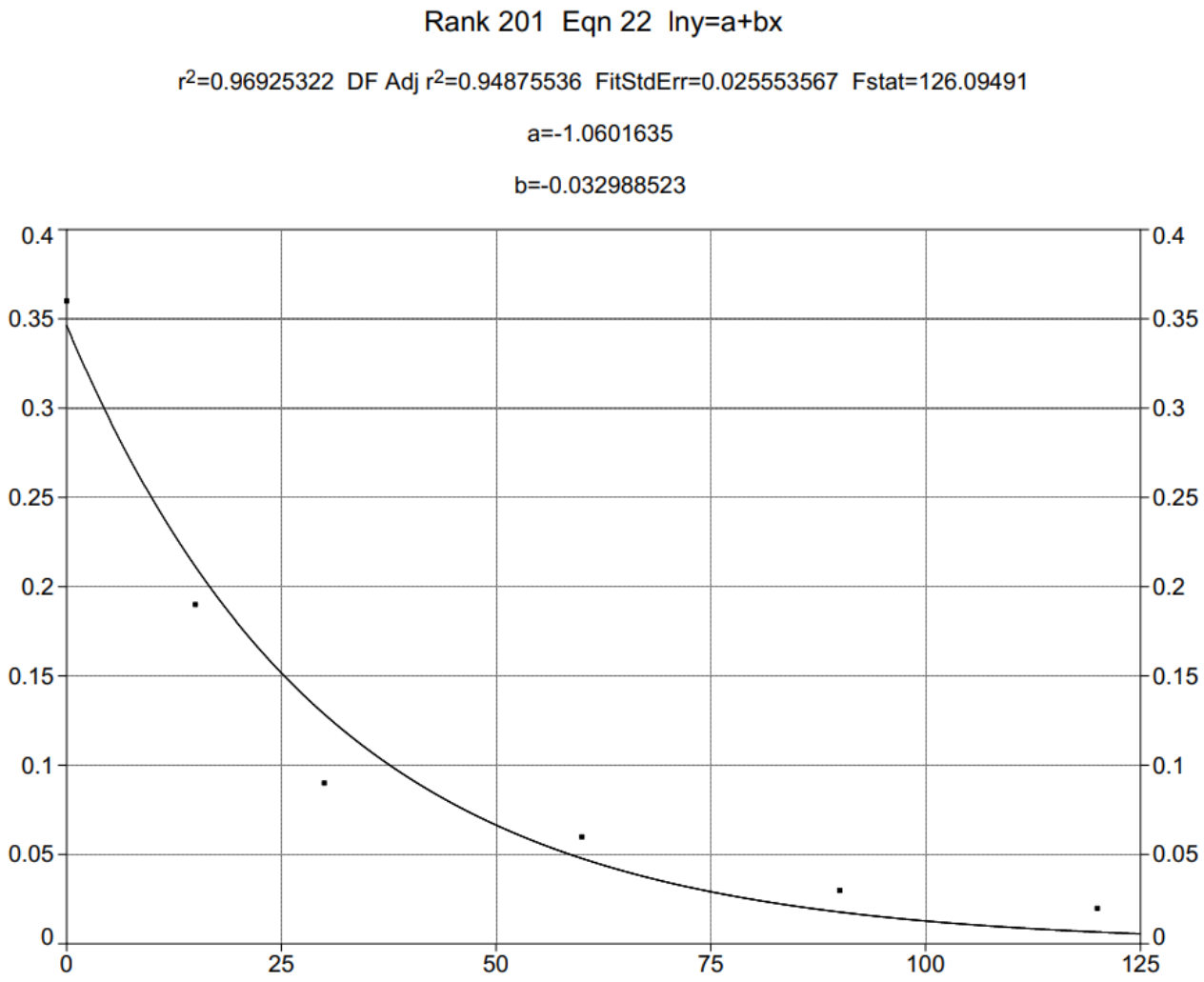


Рисунок 27 д) – Влияние частоты вращения на изменение кислотного числа с применением комплексного поглотителя, концентрацией *C* = 1% масс. – частота вращения 400 об/мин

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (уравнение: ln(y) = –1.0601635 – 0.032988523·x) в диапазоне X от 0 до 125; модель объясняет 96.93% вариации данных (r^2 = 0.96925322), имеет низкую стандартную ошибку (0.025553567) и статистически значимую F-статистику (126.09491); значения ln(y) изменяются от ~0 до 0.4.

Соответственно, для оптимизации процесса регенерации отработанного турбинного масла с применением комплексного поглотителя исследовали кинетику массообменного процесса при варьировании ключевых параметров: частоты вращения механической мешалки *n* (об/мин) и концентрации гидроксида калия в поглотителе *C* (% масс.). Кинетические зависимости представлены на рисунок 28 а)–д).

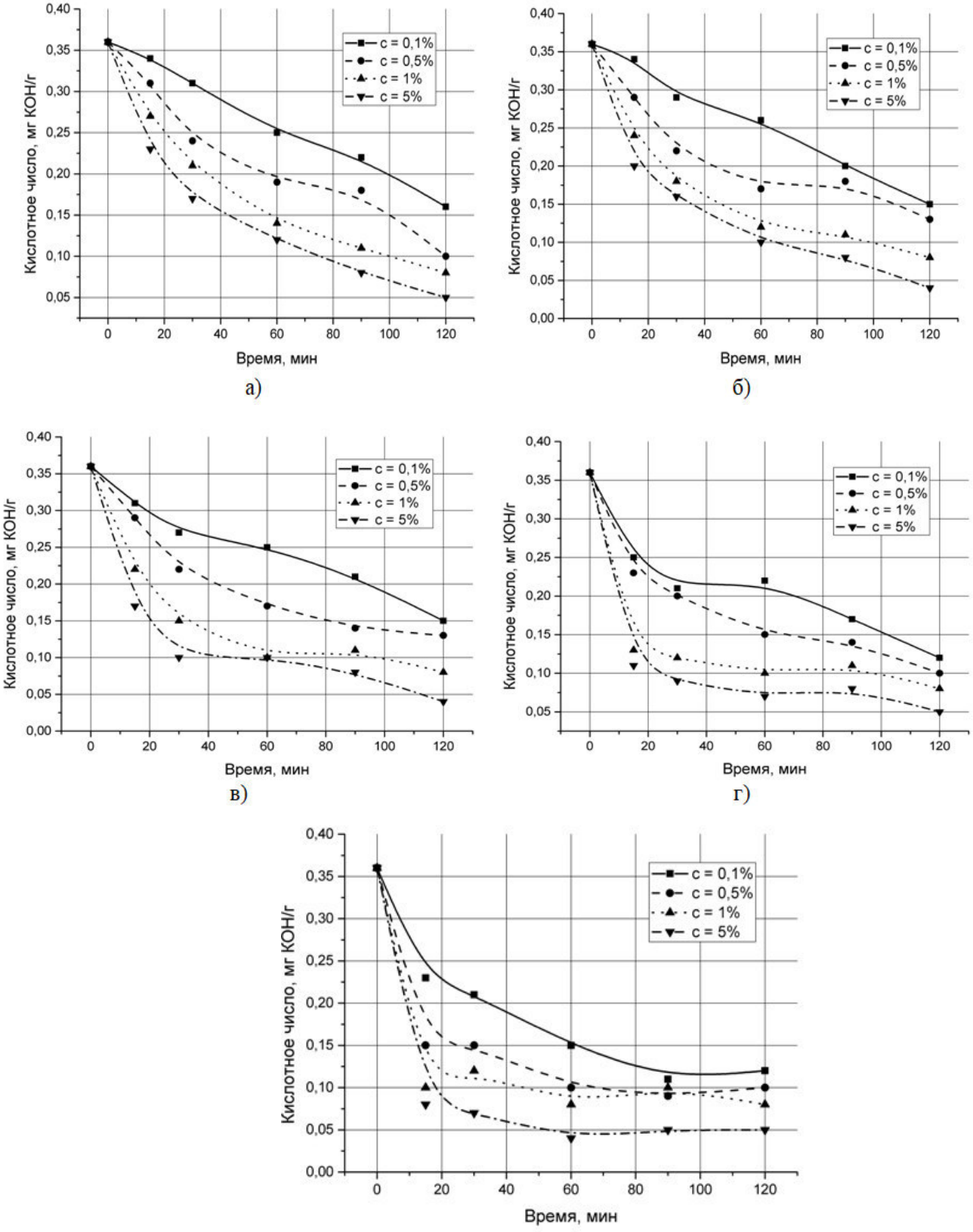


Рисунок 28 – Кинетика процесса регенерации отработанного турбинного масла. Частота вращения привода мешалки: а) 50 об/мин; б) 100 об/мин; в) 150 об/мин; г) 250 об/мин; д) 400 об/мин.

Регрессионные зависимости, построенные по результатам экспериментального исследования кинетики массообменного процесса (рисунок 29 – 33), демонстрируют корреляцию между скоростью регенерации отработанного турбинного масла с применением комплексного поглотителя и управляющими параметрами — частотой вращения мешалки *n* (об/мин) и концентрацией KOH в поглотителе *C* (% масс.).

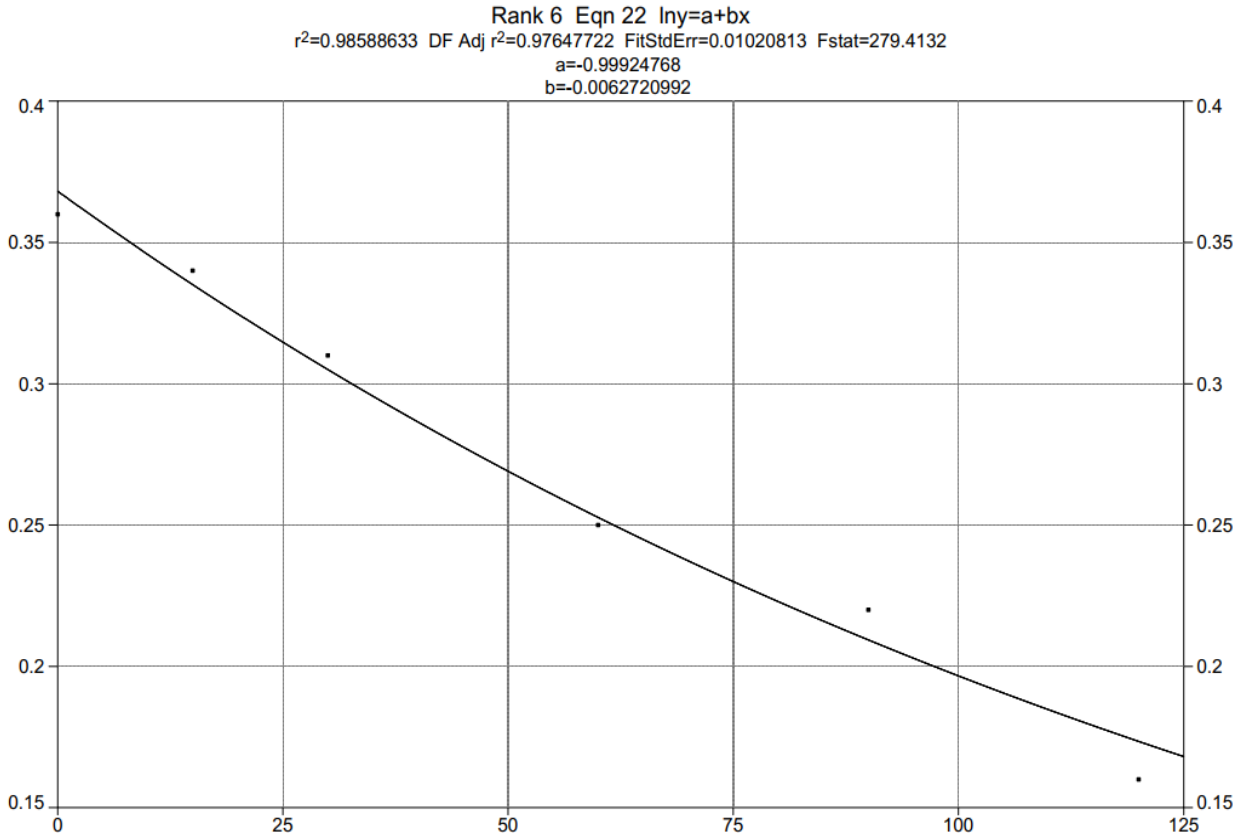


Рисунок 29 а) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,1% масс.

График демонстрирует линейную зависимость ln(y) от x ($0 \le x \le 125$) по уравнению $\ln(y) = -0.99924768 + 0.0062720992 \cdot x$ с высокой точностью аппроксимации ($r^2 = 0.98588633$), низкой стандартной ошибкой (FitStdErr = 0.01020813) и статистически значимой F-статистикой (279.4132), охватывая диапазон значений ln(y) от ~0.15 до 0.4.

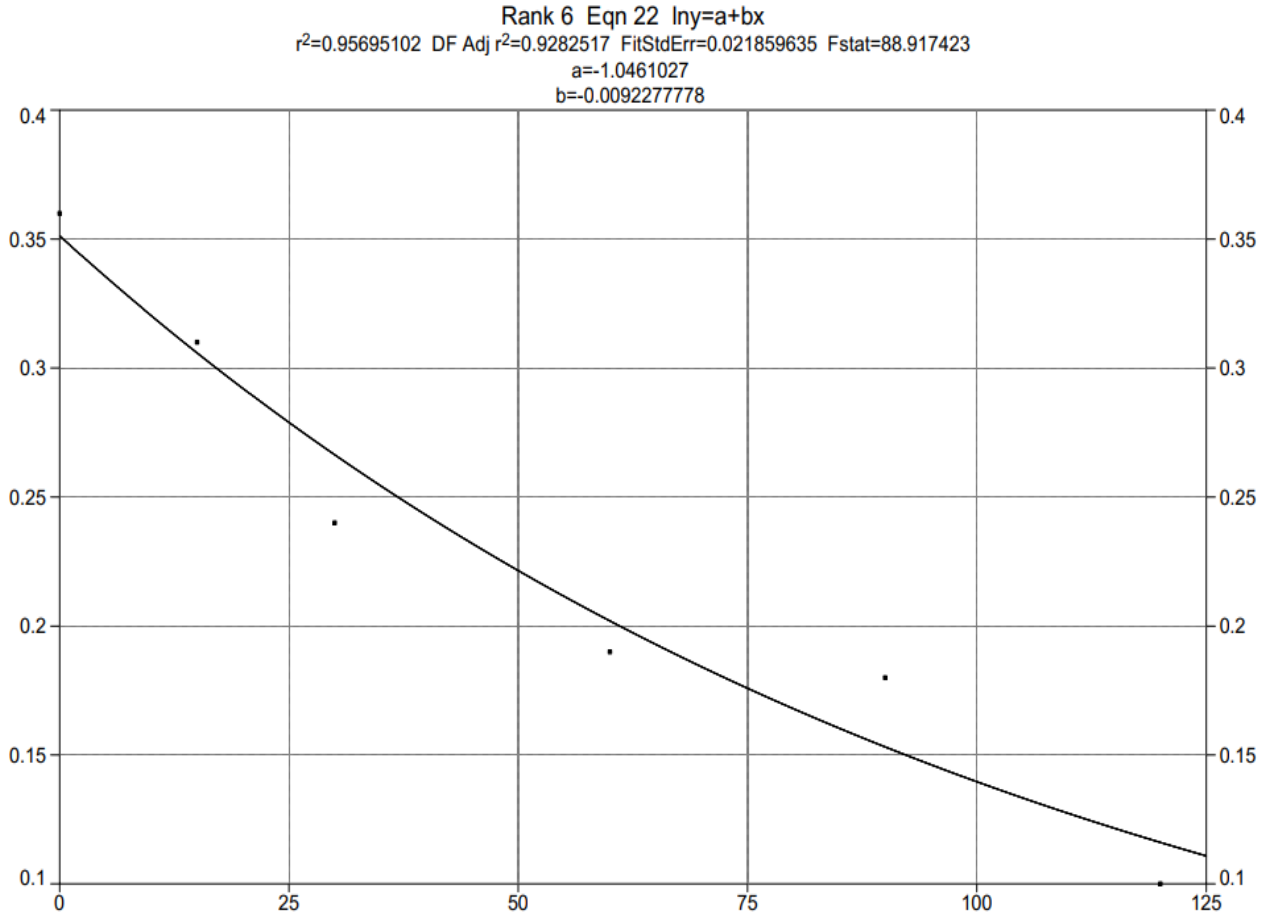


Рисунок 29 б) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,5% масс.

График отображает линейную зависимость ln(y) от x (уравнение: ln(y) = a + bx, где a = –1.0461027, b = –0.0092277778) в диапазоне x от 0 до 125. Зависимость убывающая: с ростом x значение ln(y) снижается. Качество модели: r^2 = 0.95695102 (95.7%), Adj r^2 = 0.9282517, низкая стандартная ошибка (FitStdErr = 0.021859635), статистически значимая F-статистика (Fstat = 88.917423).

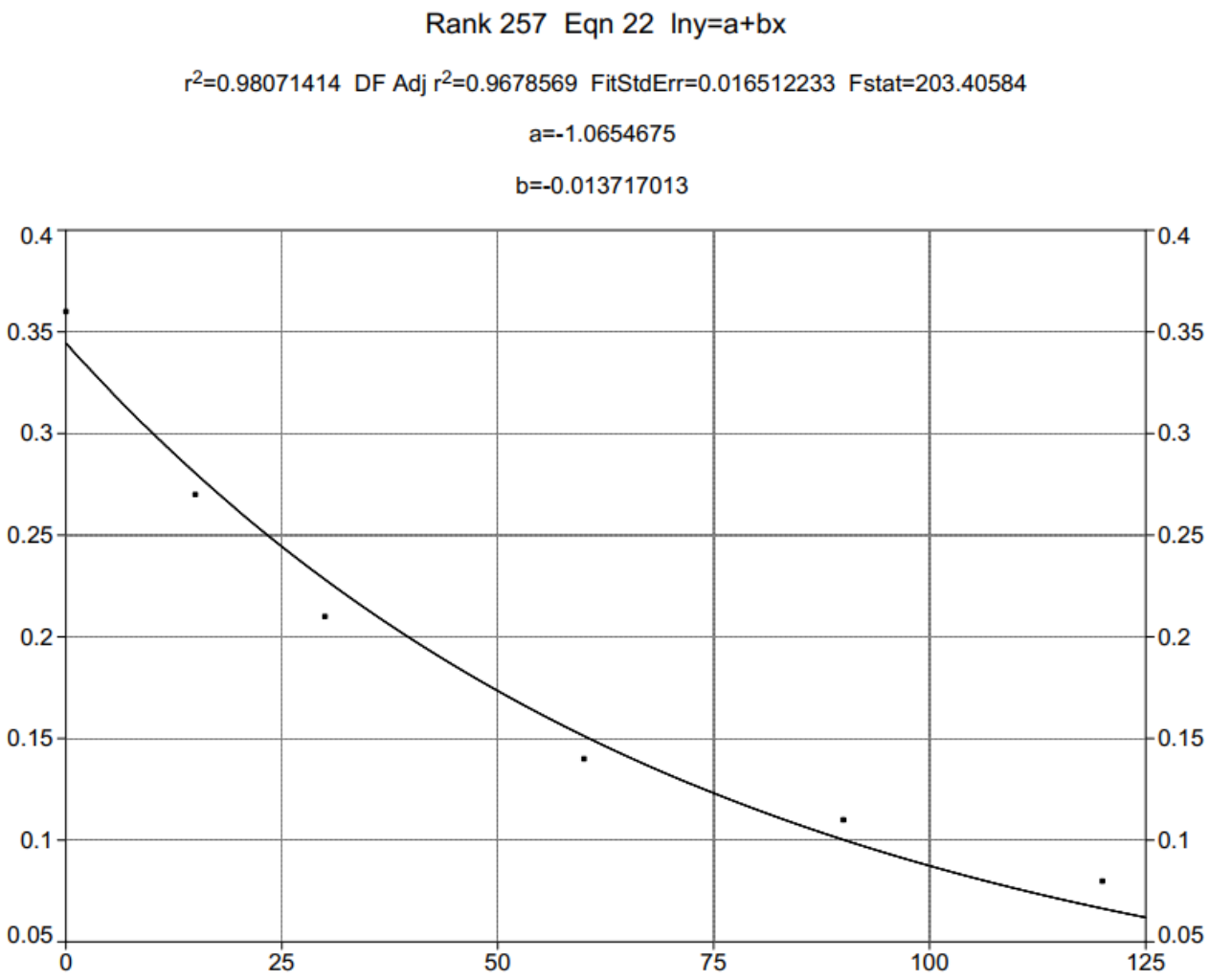


Рисунок 29 в) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 1% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (0–125) по уравнению ln(y) = –1.0654675 – 0.013717013·x с высокой точностью аппроксимации (r^2 = 0.9807144), низкой стандартной ошибкой (FitSidErr = 0.016512233) и статистически значимой F-статистикой (203.40584), охватывая диапазон значений ln(y) от ~0.05 до 0.35.

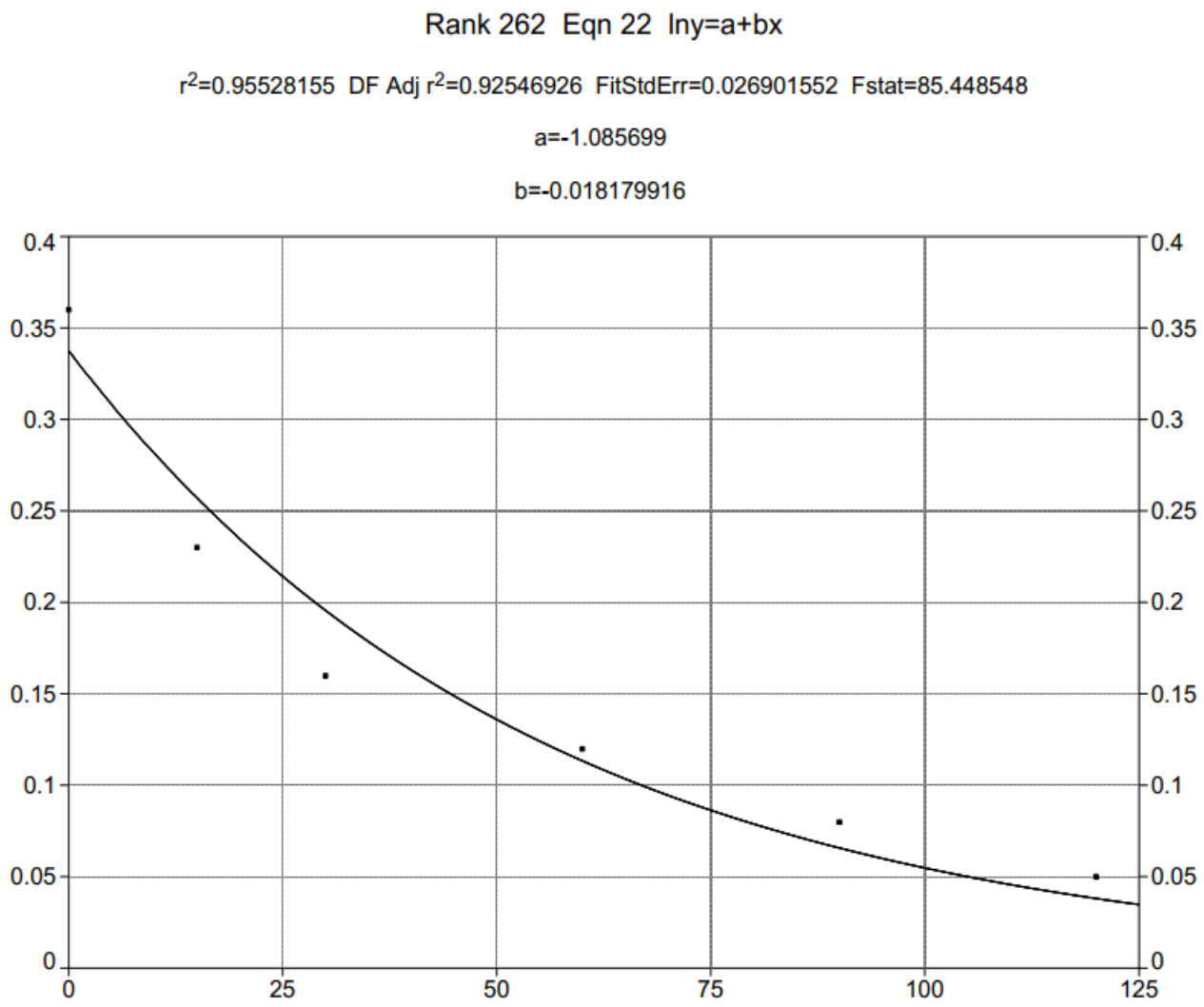


Рисунок 29 г) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 50 об/мин - концентрация комплексного поглотителя 5% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (0–125) по уравнению ln(y) = –1.085699 – 0.018179916·x, с высокой точностью аппроксимации (r^2 = 0.95528155), низкой стандартной ошибкой (FitStdErr = 0.026901552) и статистически значимой F-статистикой (85.448548), охватывая диапазон значений ln(y) от ~0.05 до 0.35.

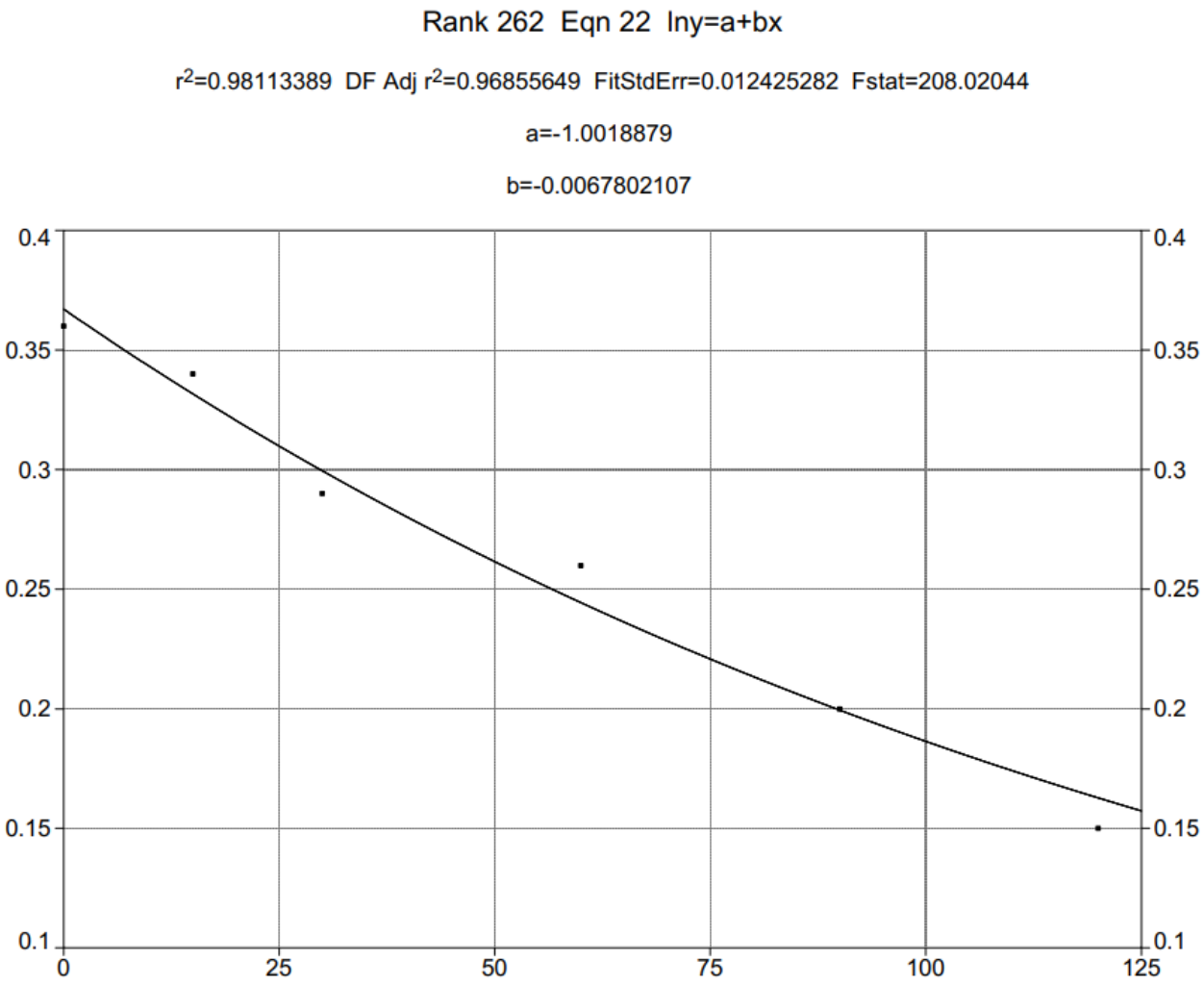


Рисунок 30 а) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 100 об/мин - концентрация комплексного поглотителя 0,1% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (0–125) по уравнению ln(y) = –1.0018879 – 0.0067802107·x, с высокой точностью аппроксимации (r^2 = 0.98113389), низкой стандартной ошибкой (FitStdErr = 0.012425282) и статистически значимой F-статистикой (208.02044), охватывая диапазон значений ln(y) от ~0.15 до 0.35.

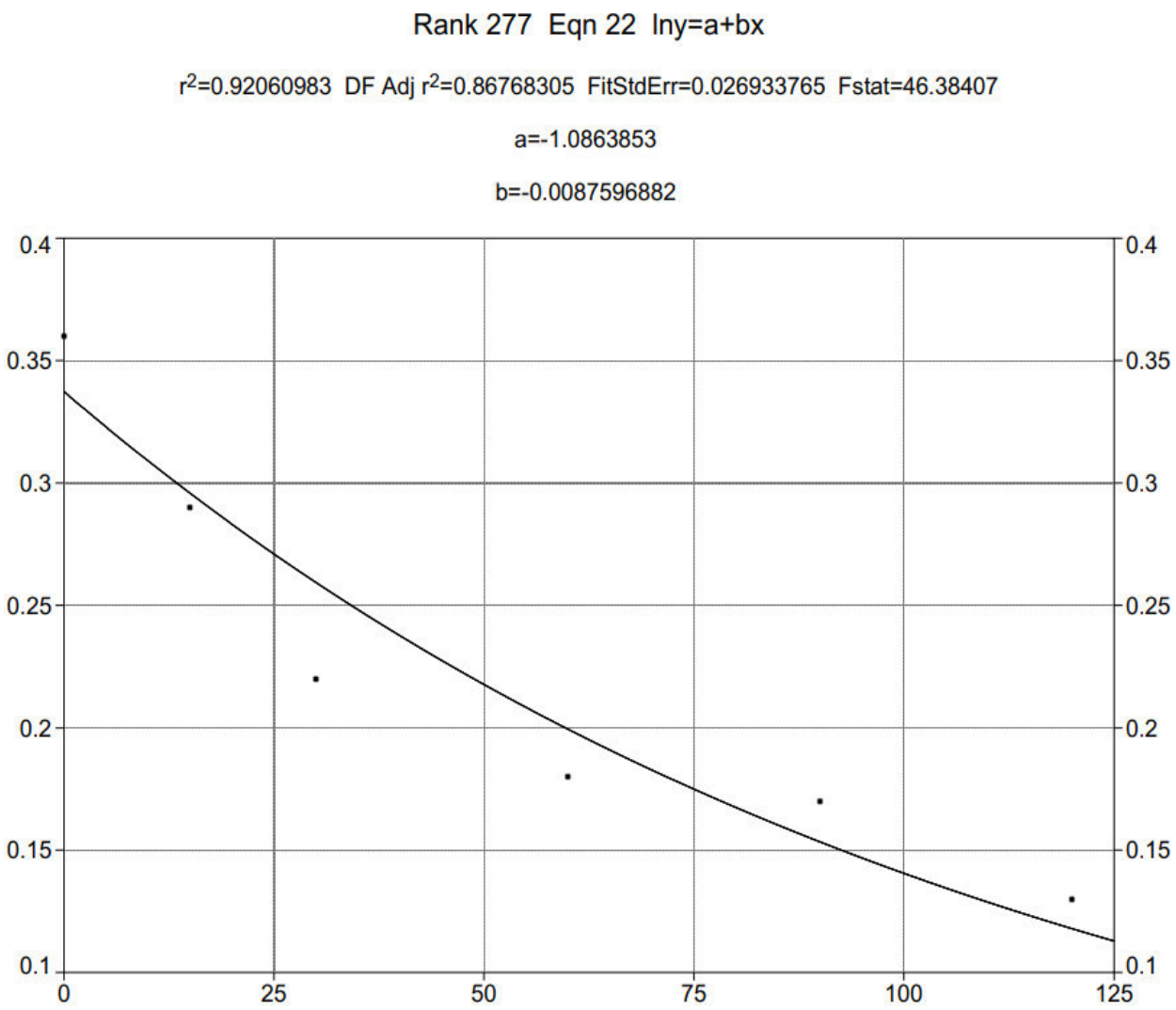


Рисунок 30 б) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 100 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,5% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (диапазон x: 0–125) по уравнению $\ln(y) = -1.0863853 - 0.0087596882 \cdot x$ при частоте вращения мешалки 100 об/мин и концентрации поглотителя 0,5%, с высокой точностью аппроксимации ($r^2 = 0.92060983$), скорректированным $r^2 = 0.86768305$, стандартной ошибкой FitStdErr = 0.026933765 и статистически значимой F-статистикой (Fstat = 46.38407).

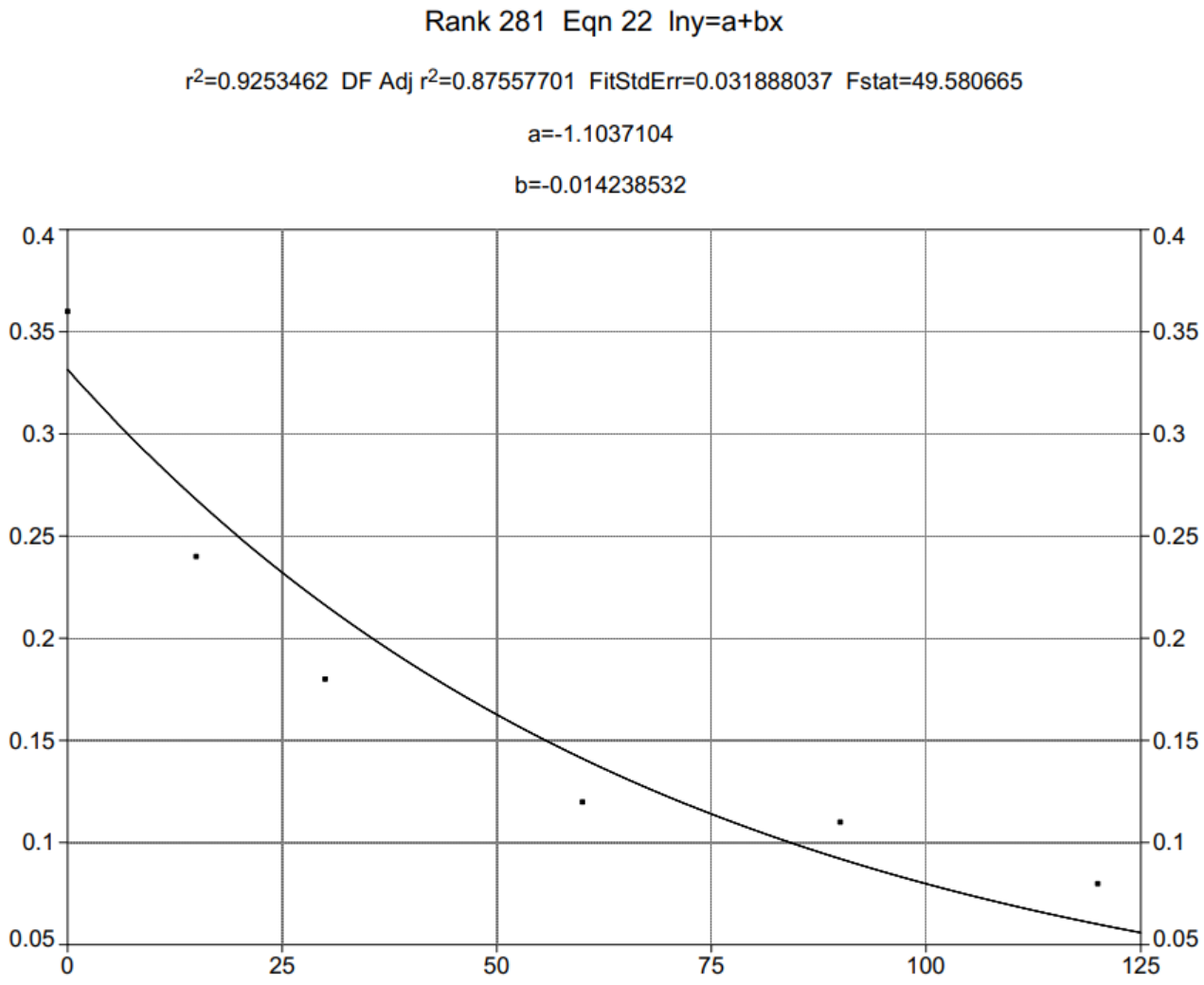


Рисунок 30 в) – Графики регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 100 об/мин–концентрация комплексного поглотителя 1% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (в диапазоне 0–125) по уравнению ln(y) = –1.1037104 – 0.014238532·x, с коэффициентом детерминации r^2 = 0.9253462, скорректированным r^2 = 0.87557701, стандартной ошибкой FitStdErr = 0.031888037 и статистически значимой F-статистикой (Fstat = 49.580665), отображая рассеянные данные точек вдоль трендовой линии.

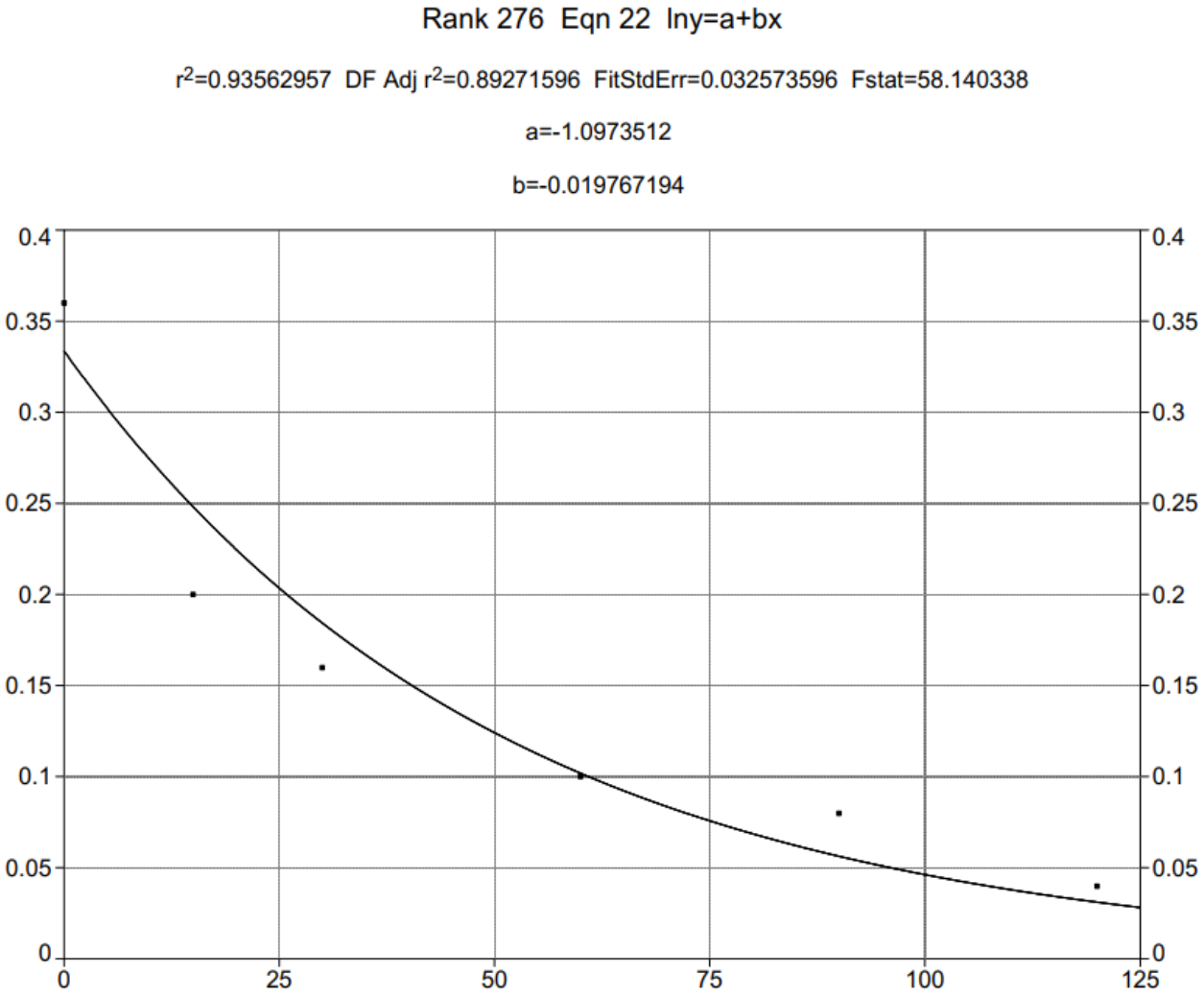


Рисунок 30 г) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 100 об/мин–концентрация комплексного поглотителя 5% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (в диапазоне 0–125) по уравнению ln(y) = –1.0973512 – 0.019767194·x с высокой точностью аппроксимации (r^2 = 0.93562957), скорректированным коэффициентом детерминации Adj r^2 = 0.89271596, стандартной ошибкой FitStdErr = 0.032573596 и статистически значимой F-статистикой (Fstat = 58.140338), отображая рассеянные данные точек вдоль трендовой линии.

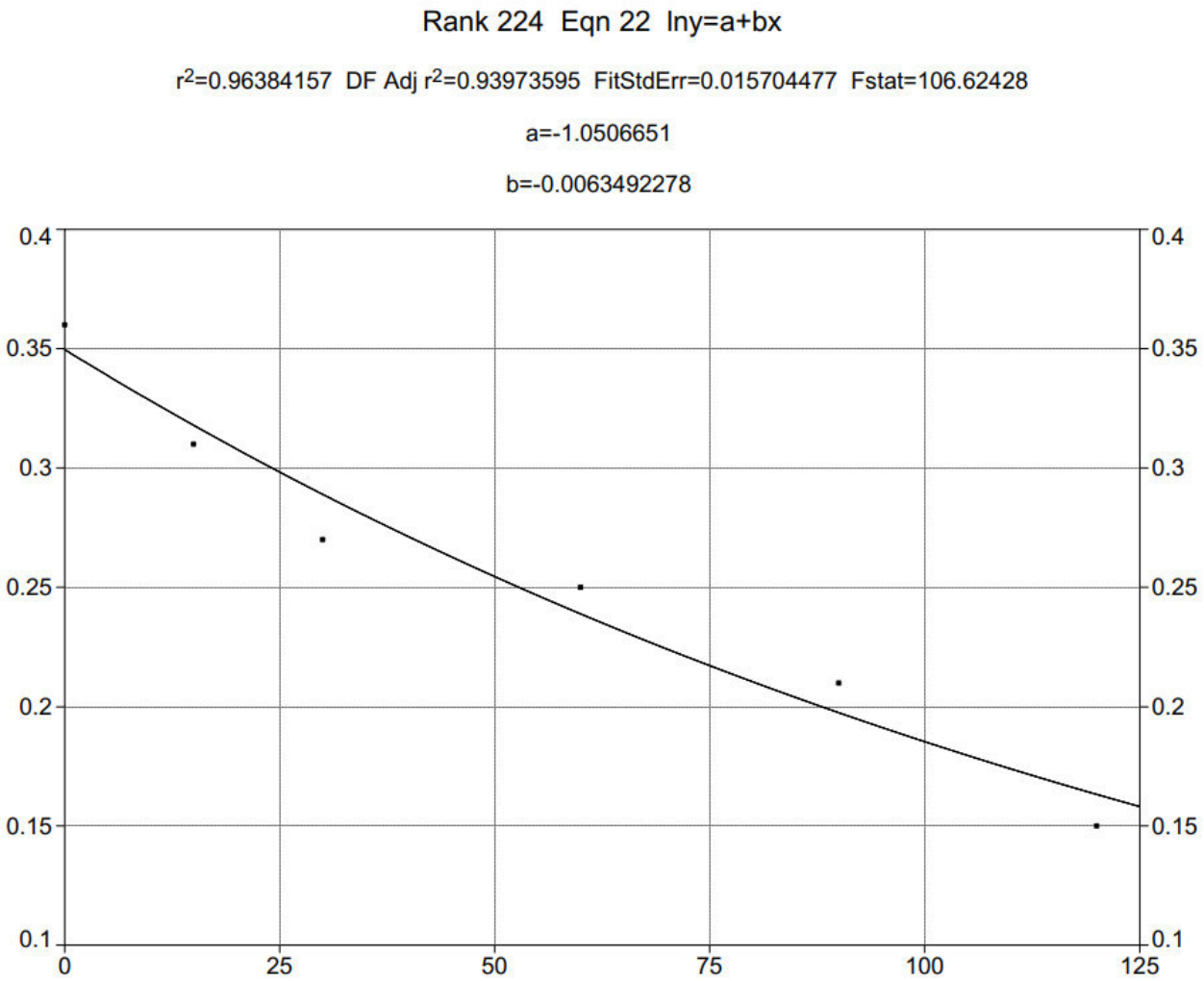


Рисунок 31 а) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 150 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,1% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (в диапазоне 0–125) по уравнению ln(y) = –1.0506651 – 0.0063492278·x, с высоким коэффициентом детерминации r^2 = 0.96384157, скорректированным Adj r^2 = 0.93973595, стандартной ошибкой FitStdErr = 0.015704477 и статистически значимой F-статистикой (Fstat = 106.62428), отображая рассеянные данные точек, следующих за трендовой линией.

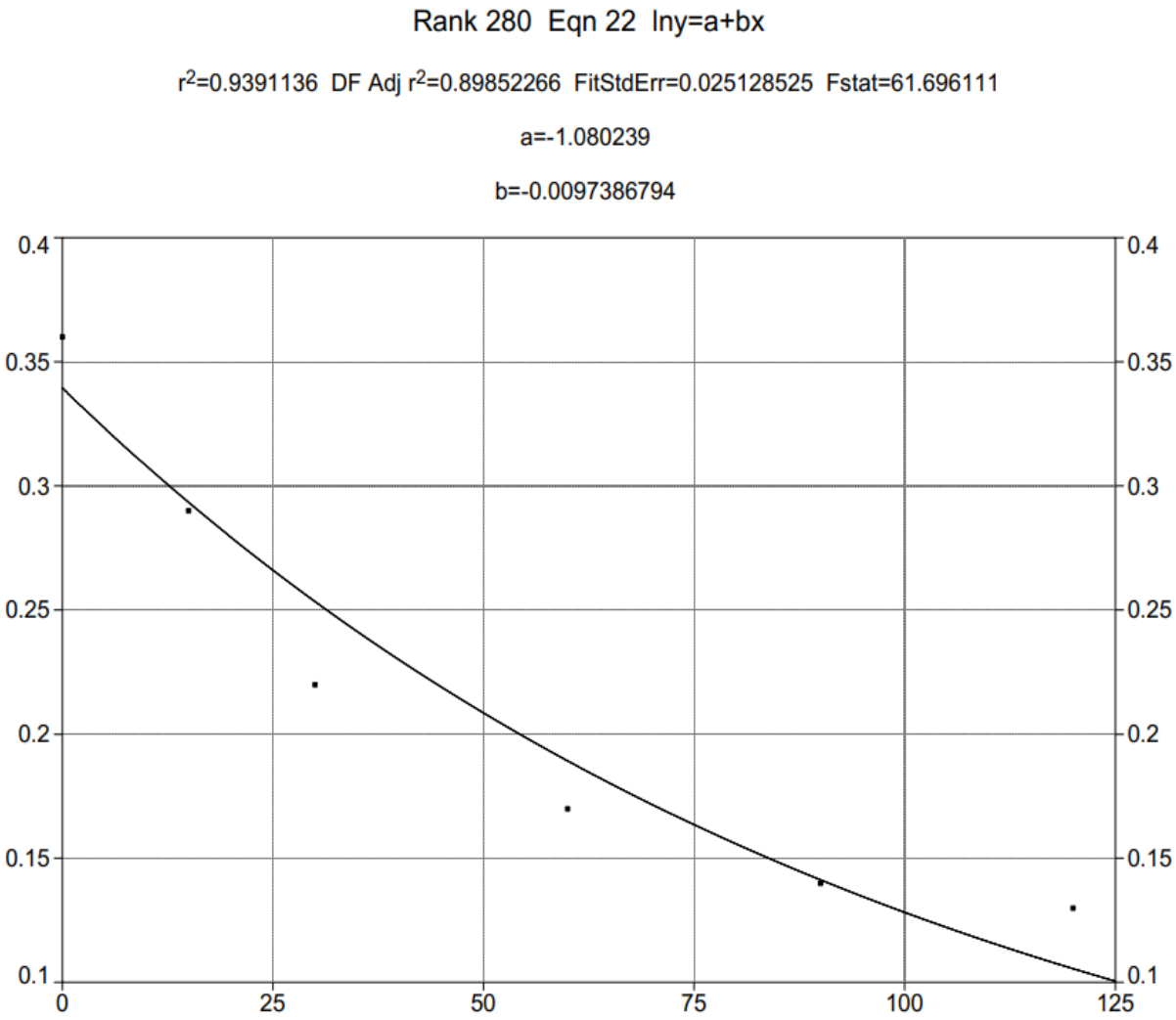


Рисунок 31 б) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 150 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,5% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (в диапазоне 0–125) по уравнению ln(y) = –1.080239 – 0.0097386794·x, с коэффициентом детерминации r^2 = 0.9391136, скорректированным Adj r^2 = 0.89852266, стандартной ошибкой FitStdErr = 0.025128525 и статистически значимой F-статистикой (Fstat = 61.696111), отображая рассеянные данные точек, следующих за трендовой линией.

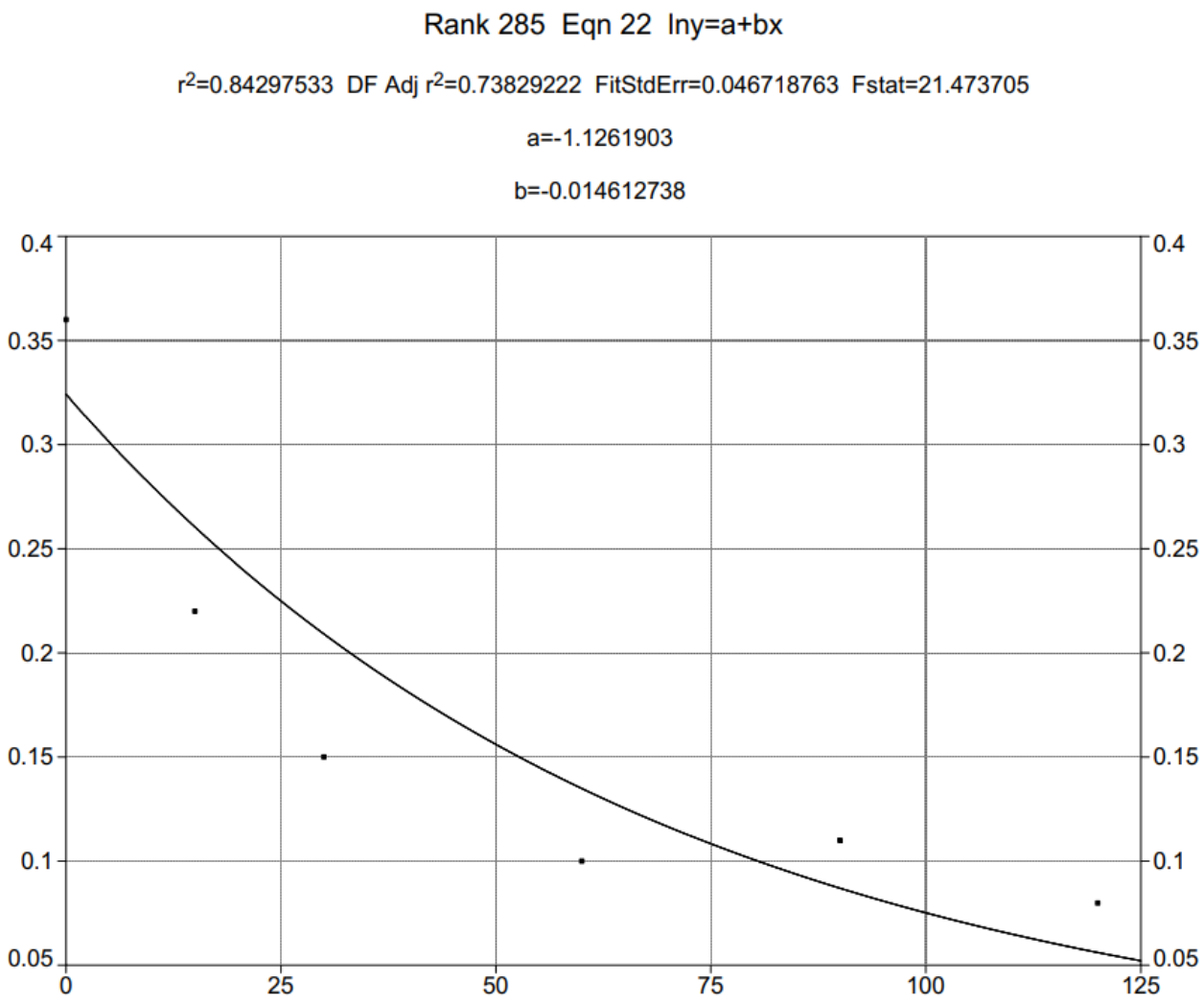


Рисунок 31 в) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 150 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 1% масс.

На графике регрессионного анализа (Rank 285, Eqn 22) представлена линейная зависимость переменной ln(y) от x (в диапазоне 0–125) по уравнению ln(y) = a + bx, где a = –1.1261903 (свободный член), b = –0.014612738 (коэффициент наклона). Уравнение демонстрирует убывающую тенденцию: с ростом x значение ln(y) уменьшается.

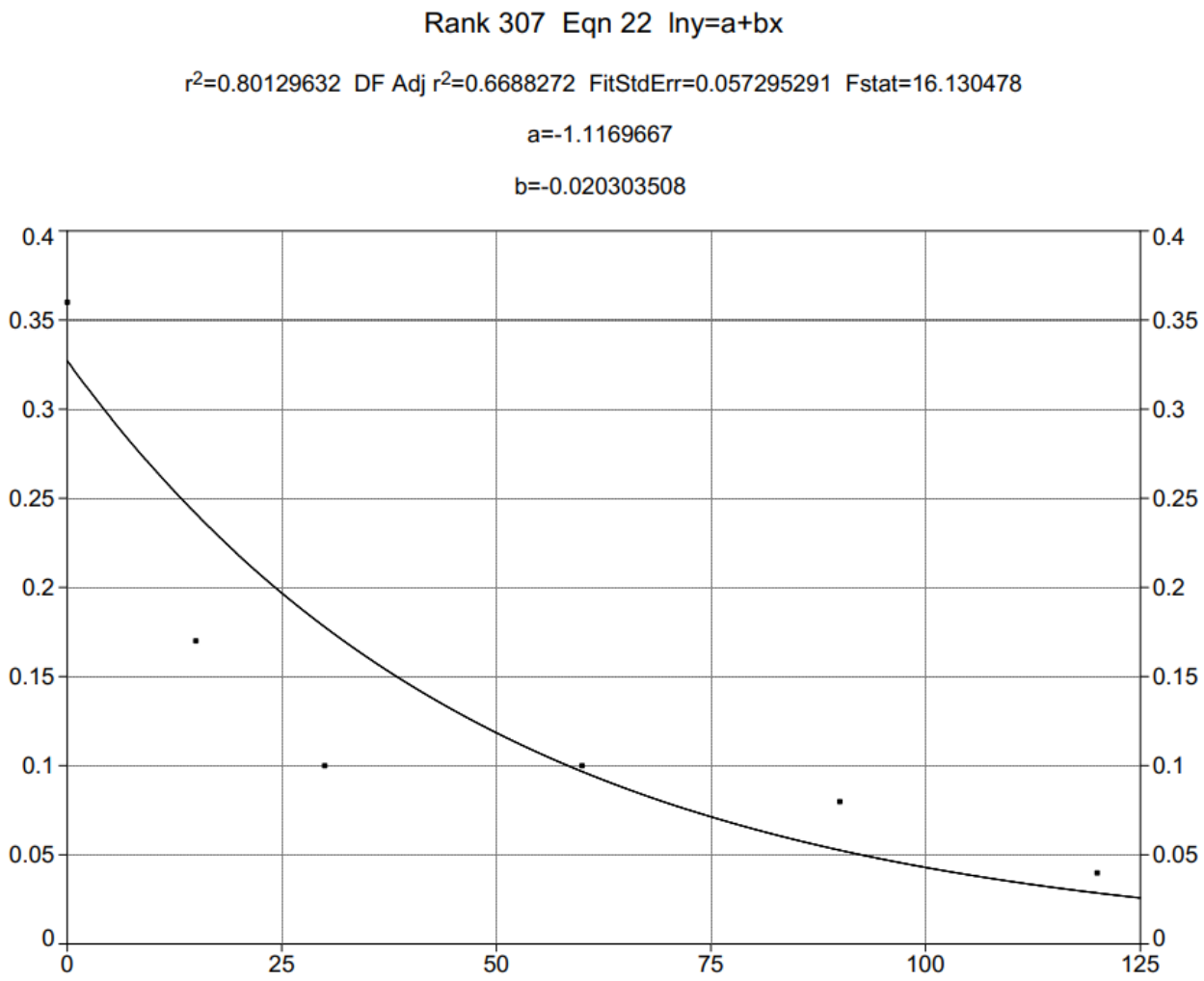


Рисунок 31 г) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 150 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 5% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (диапазон 0–125) по уравнению ln(y) = –1.1169667 – 0.020303508·x с коэффициентом детерминации r^2 = 0.80129632, скорректированным Adj r^2 = 0.6688272, стандартной ошибкой FitStdErr = 0.057295291 и статистически значимой F-статистикой (Fstat = 16.130478), отображая рассеянные данные точек вдоль нисходящей трендовой линии.

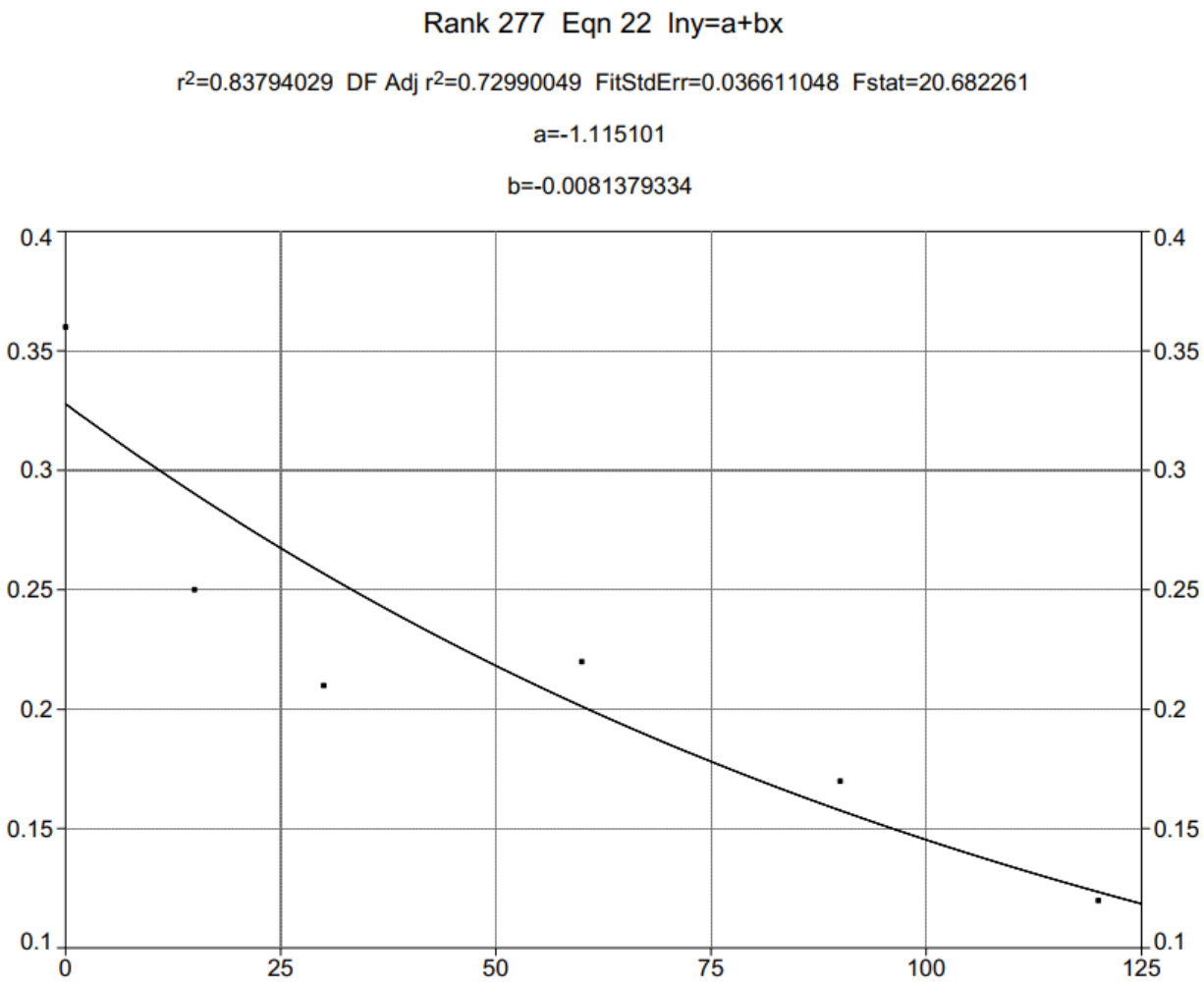


Рисунок 32 а) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 250 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,1% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (в диапазоне 0–125) по уравнению ln(y) = –1.115101 – 0.0081379334·x, с коэффициентом детерминации r^2 = 0.83794029, скорректированным Adj r^2 = 0.72990049, стандартной ошибкой FitStdErr = 0.036611048 и статистически значимой F-статистикой (Fstat = 20.682261), отображая рассеянные точки данных вдоль нисходящей трендовой линии.

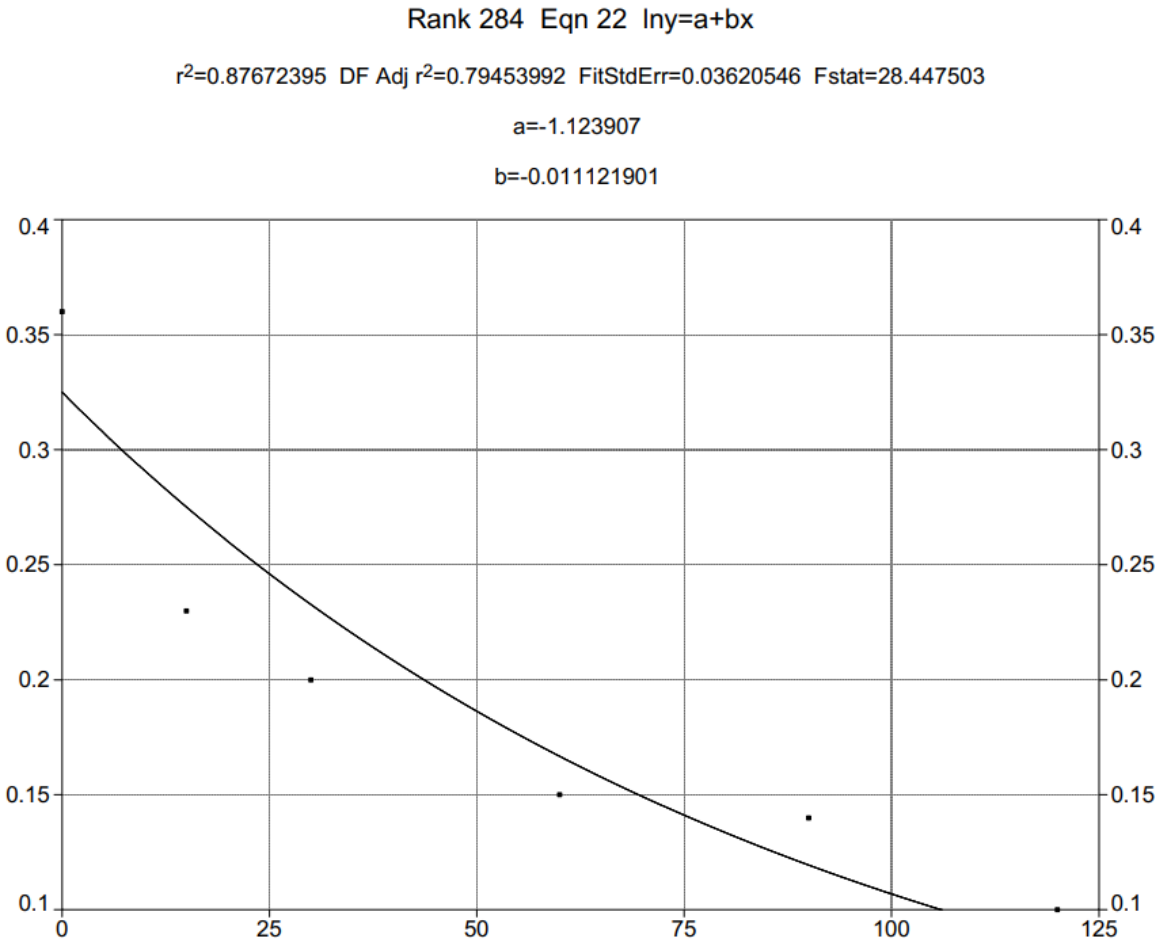


Рисунок 32 б) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 250 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,5% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (в диапазоне 0–125) по уравнению ln(y) = –1.123907 – 0.011121901·x, с коэффициентом детерминации r^2 = 0.87672335, скорректированным Adj r^2 = 0.79453392, стандартной ошибкой FitStdErr = 0.03620546 и статистически значимой F-статистикой (Fstat = 28.447503), отображая рассеянные точки данных вдоль нисходящей трендовой линии.

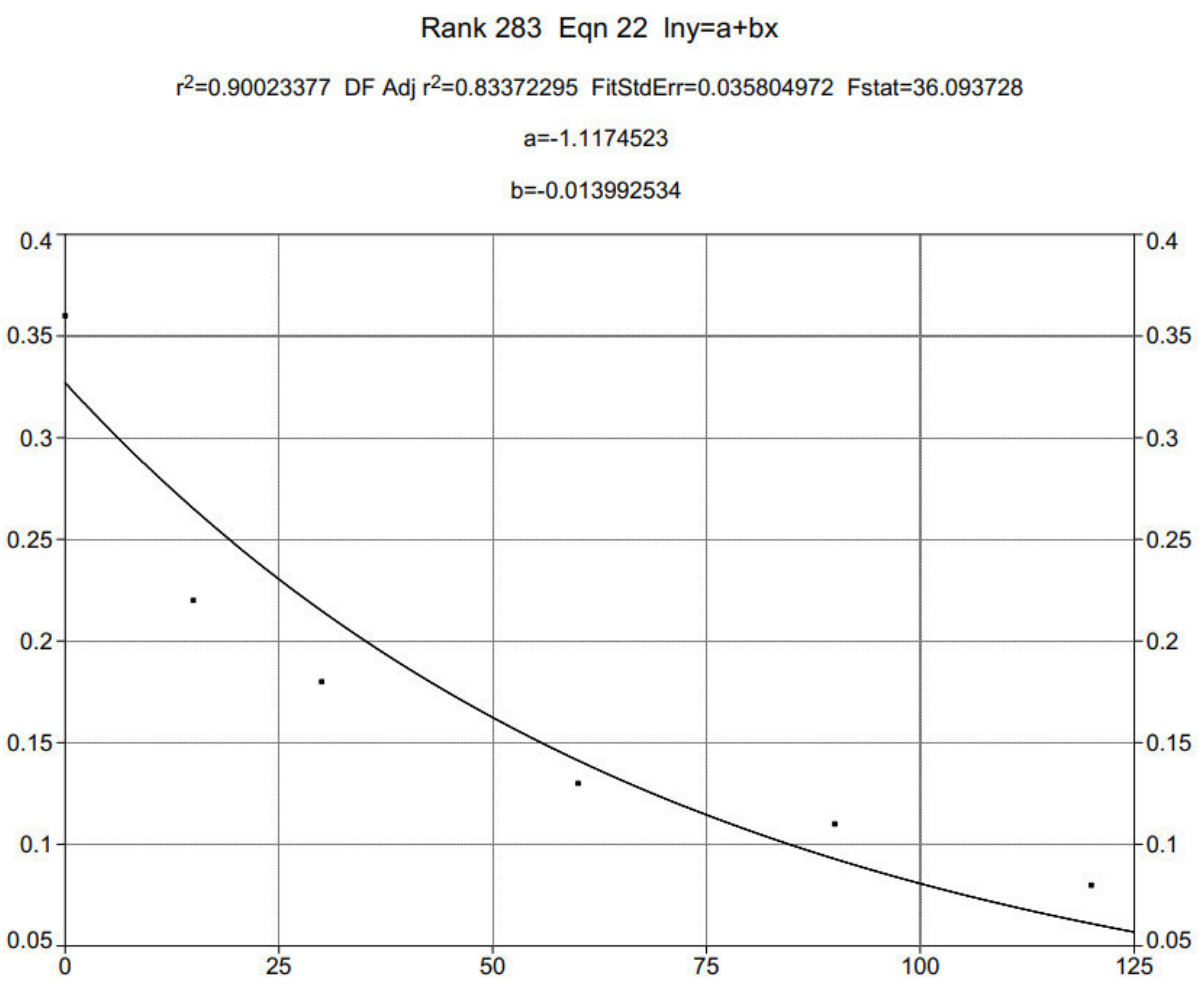


Рисунок 32 в) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 250 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 1% масс.

График показывает убывающую линейную зависимость ln(y) от x (0–125) по уравнению $\ln(y) = -1.1174523 - 0.013992534 \cdot x$; $r^2 = 0.9002$, Adj $r^2 = 0.8372$, FitStdErr = 0.0358, Fstat = 36.09 — модель статистически значима.

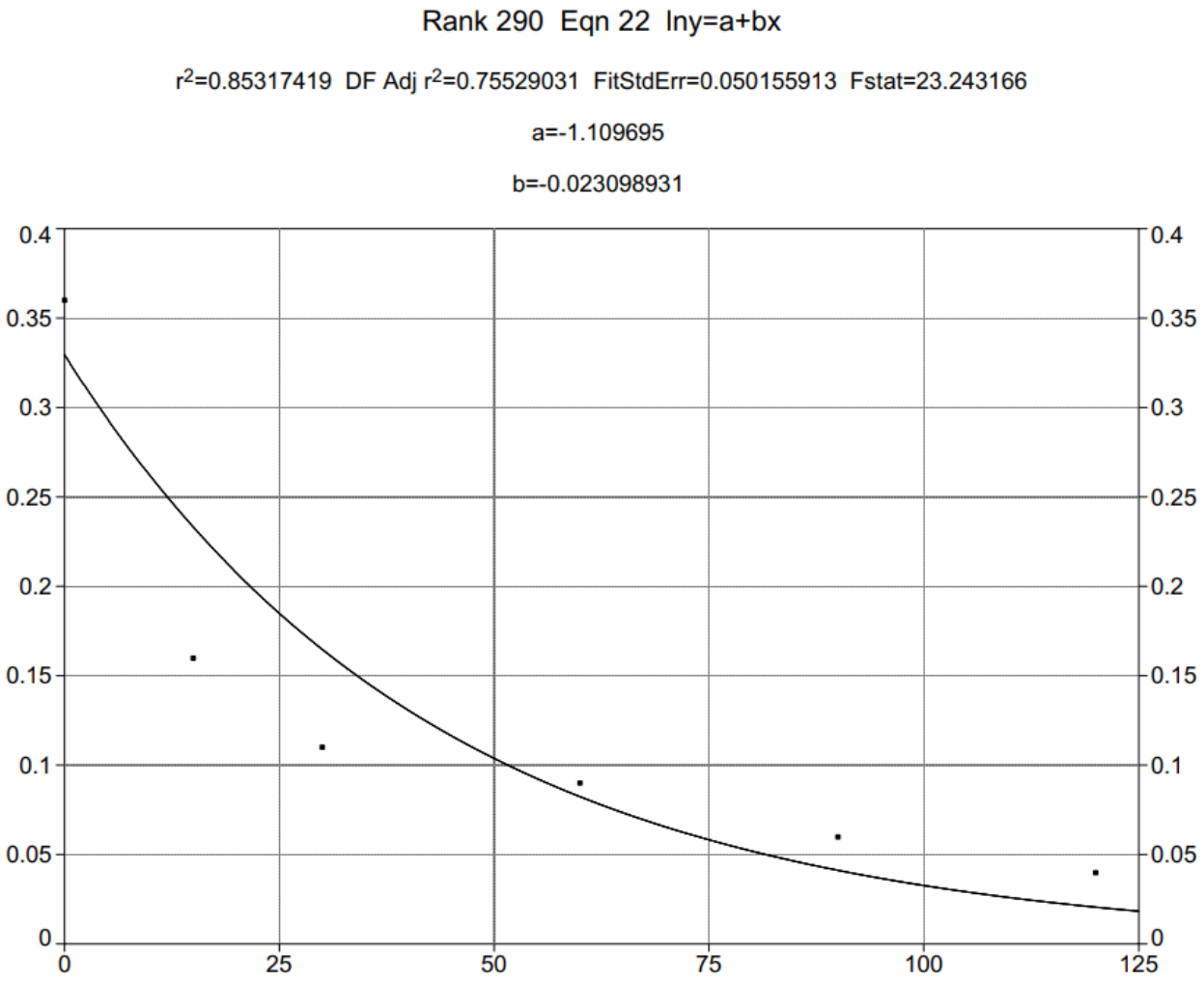


Рисунок 32 г) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 250 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 5% масс.

График отображает убывающую линейную зависимость ln(y) от x (уравнение ln(y) = –1.109695 – 0.023098931·x, Rank 290, Eqn 22) с r^2 = 0.8532, Adj r^2 = 0.7553, FitStdErr = 0.0502 и Fstat = 23.24, демонстрируя статистически значимую модель в диапазоне x от 0 до 125 и y от 0 до 0.4.

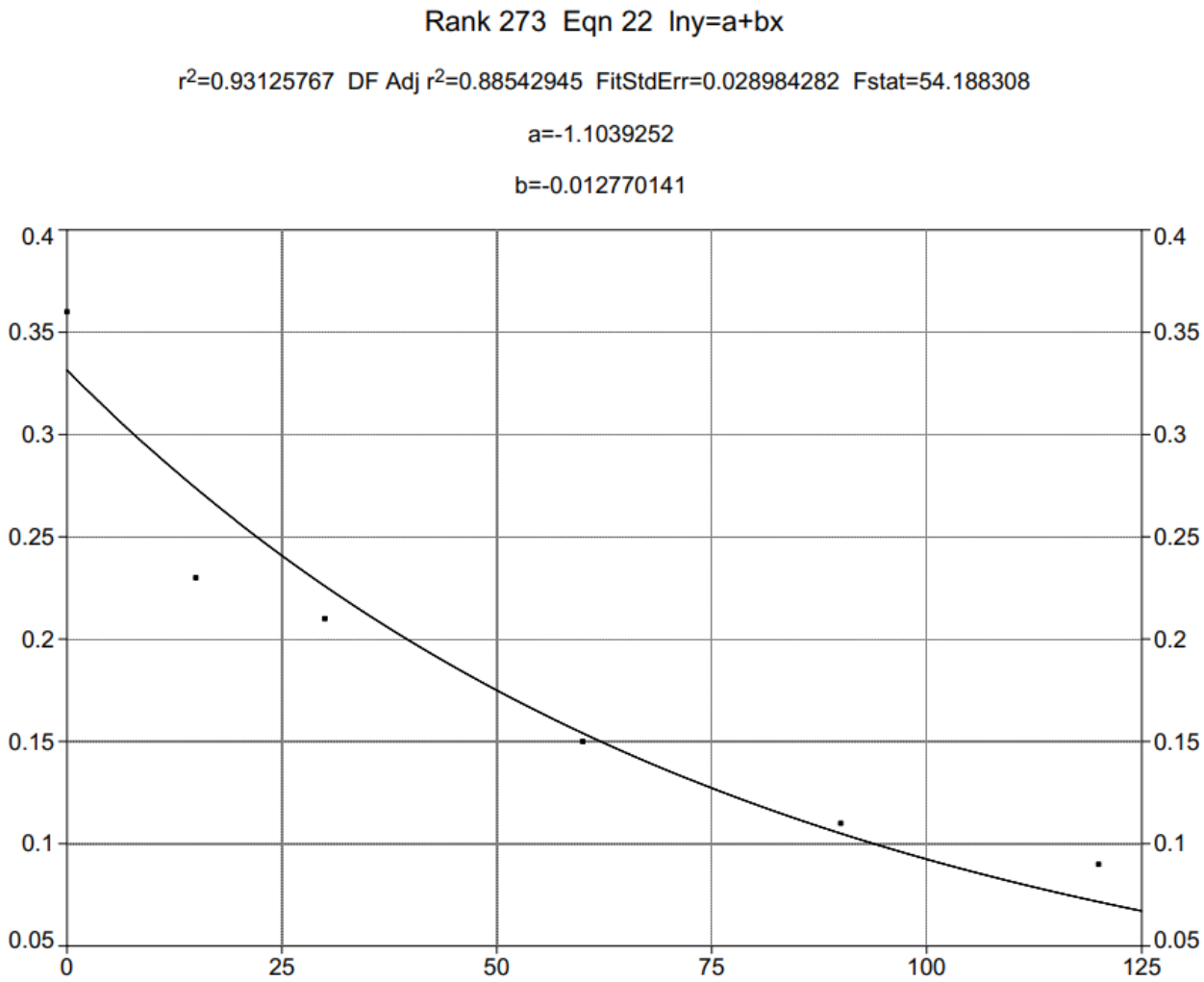


Рисунок 33 а) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 400 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,1% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (уравнение ln(y) = –1.1039252 – 0.012770141·x) с высоким коэффициентом детерминации r^2 = 0.93125767, стандартной ошибкой оценки 0.028984282 и статистически значимой F-статистикой 54.188308, показывая, что модель объясняет ~93.13% вариации данных.

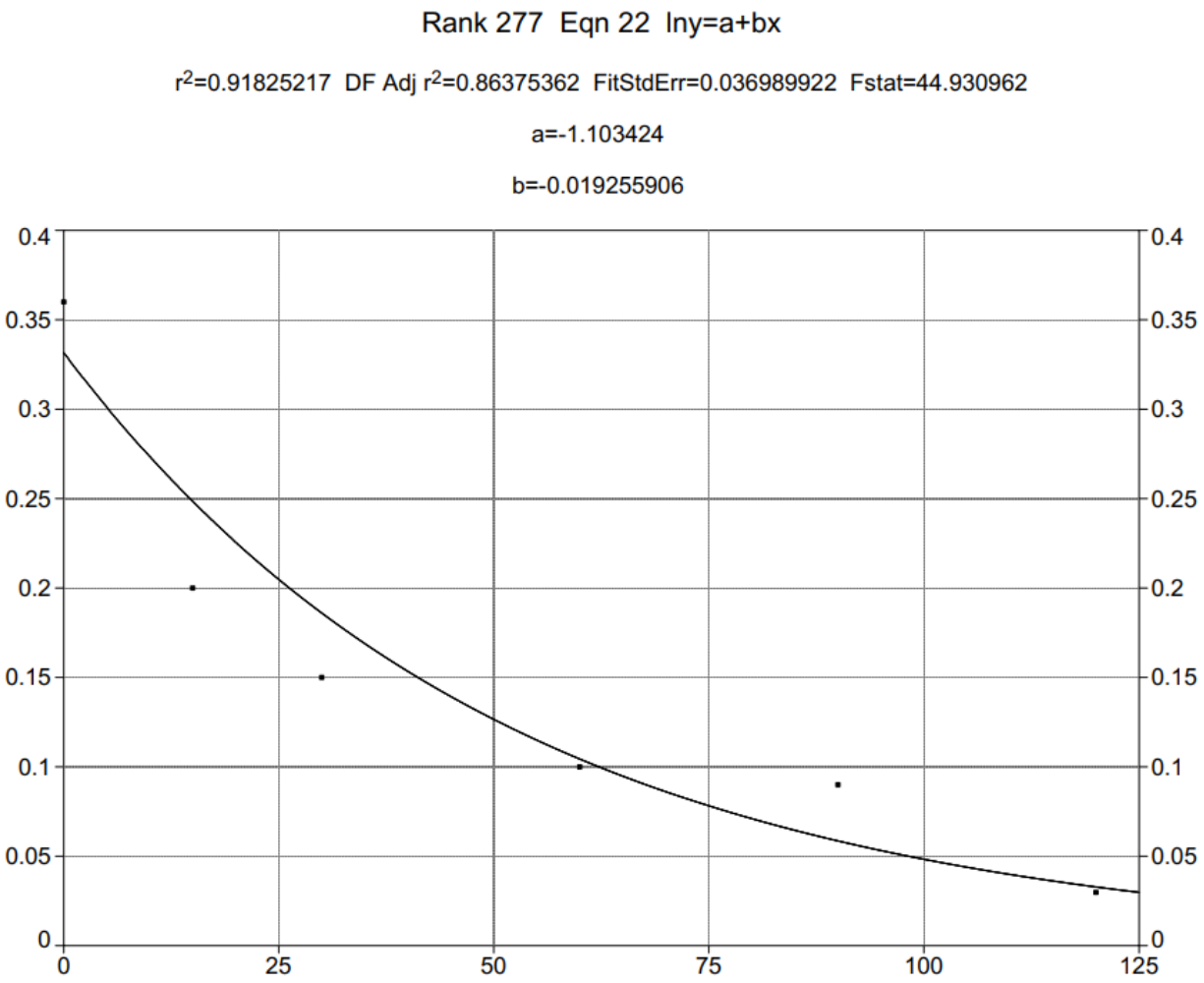


Рисунок 33 б) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 400 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 0,5% масс.

График показывает, как ln(y) уменьшается с ростом x (формула: ln(y) = – 1.103424 – 0.019255906·x). Модель хорошо описывает данные — 91,83% изменений объясняются этой зависимостью. Ошибка модели небольшая (0.037), а статистика F (44.93) подтверждает, что результаты надёжные.

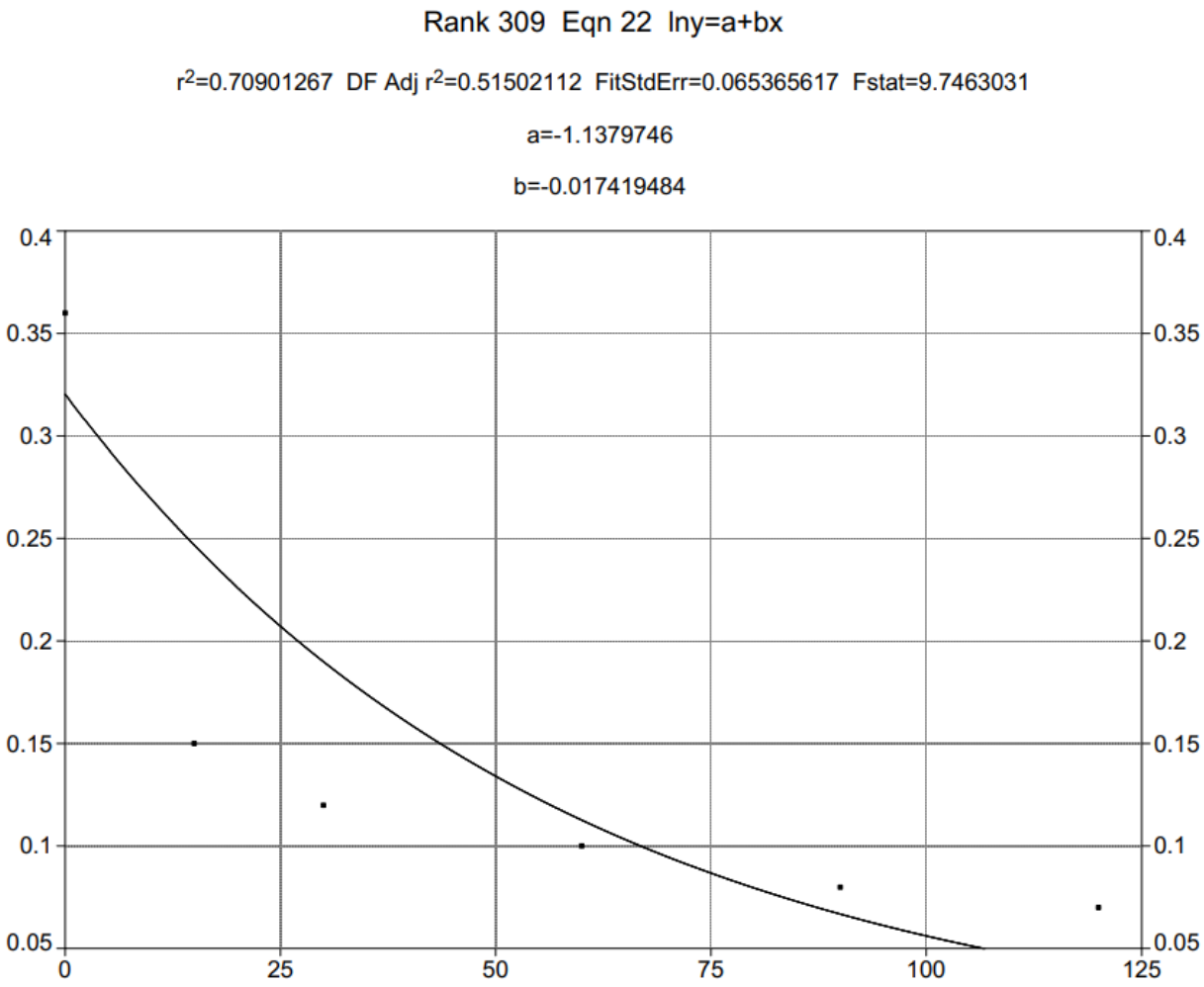


Рисунок 33 в) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 400 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 1% масс.

График показывает убывающую линейную зависимость ln(y) от x ($\ln(y) = -1.1379746 - 0.017419484 \cdot x$) с $r^2 = 0.709$, FitStdErr = 0.065 и значимой F-статистикой (9.746), демонстрируя, что модель объясняет около 70.9% вариации данных в диапазоне x от 0 до 125 и ln(y) от 0.05 до 0.4

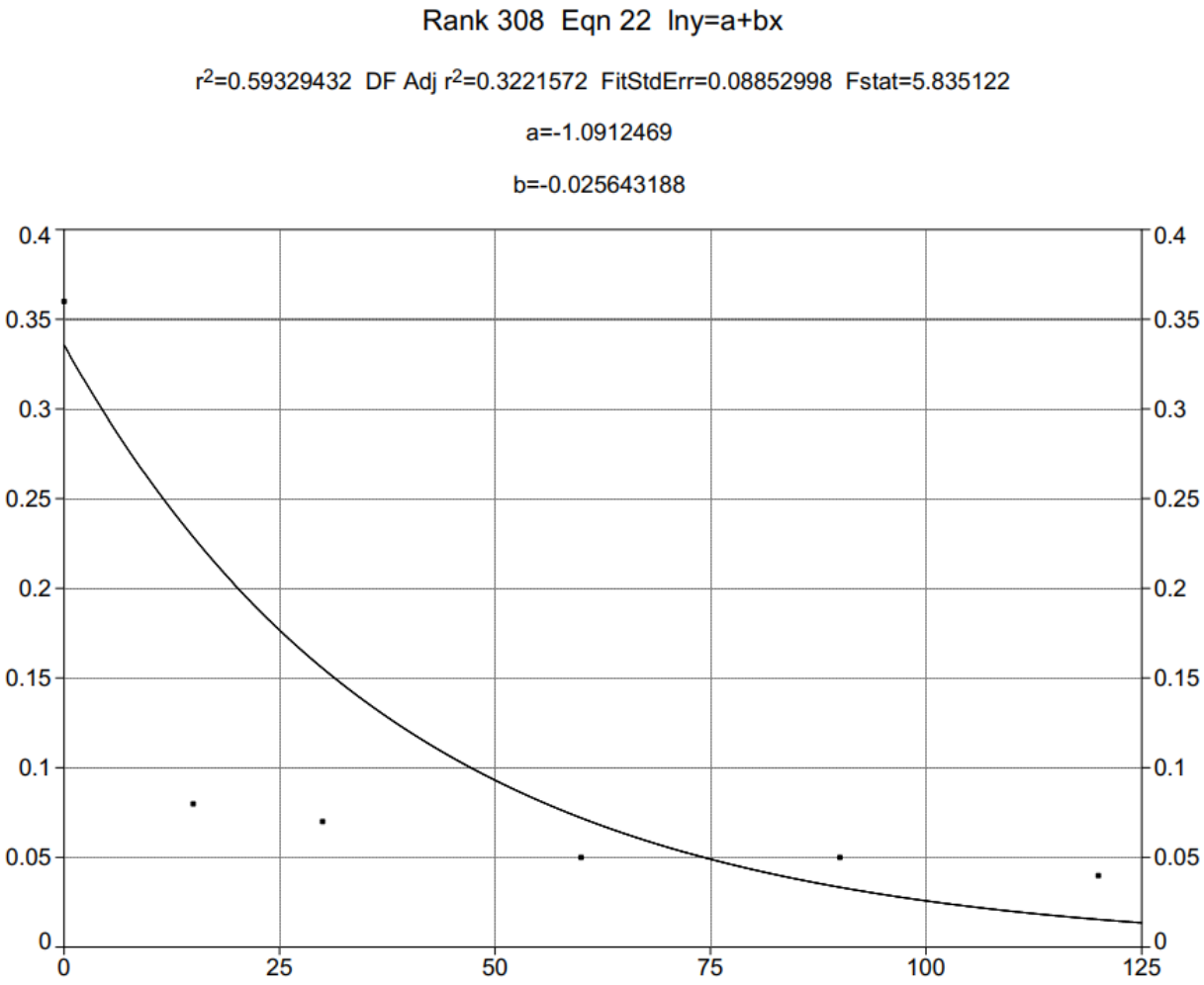


Рисунок 33 г) – График регрессионного анализа процесса регенерации. Частота вращения привода мешалки 400 об/мин – концентрация комплексного поглотителя 5% масс.

График демонстрирует убывающую линейную зависимость ln(y) от x (уравнение: ln(y) = –1.0912469 – 0.025643188·x), в диапазоне значений x от 0 до 125 и ln(y) от 0 до 0.4; модель объясняет около 59.3% вариации данных (r^2 = 0.59329432), имеет стандартную ошибку FitStdErr = 0.08852998 и значимую F-статистику (Fstat = 5.835122), подтверждающую статистическую надёжность зависимости.

Анализ регрессионных зависимостей выявил значимое влияние гидродинамических параметров перемешивания на снижение кислотного числа. Увеличение частоты вращения мешалки способствует достижению нормативного показателя для турбинного масла ТП-22С ($К_ч \leq 0{,}07$ мг КОН/г), что экспериментально подтверждено результатами серии опытов,

представленных на графиках 29 – 33. Полученные кинетические зависимости легли в основу критериального уравнения (раздел 4.4), позволившего масштабировать процесс регенерации.

3.2 Выводы по главе 3

1. Полученное значение коэффициента пористости ξ для цеолитов указывает, что 55 % объёма твёрдой фазы занимают поры; коэффициент порозности ε означает, что 18 % насыпного объёма занимают поры между зёрнами. Это свидетельствуют о развитой внутренней поверхности и достаточной межзерновой пористости, что обеспечивает эффективный массоперенос и доступность адсорбционных центров при выбранных гидродинамических условиях.

2. Экспериментально установлено, что использование комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия, приводит к существенной интенсификации процесса регенерации турбинного масла ТП-22С. Перемешивание при 50 об/мин позволило определить оптимальные значения параметров процесса (концентрацию щёлочи и продолжительность контакта фаз) и достигнуть нормативного значения кислотного числа ($К_ч \leq 0{,}07$ мг KOH/г) через 60 мин, что в 2 раза быстрее, чем в контрольном опыте без поглотителя (120 мин).

3. Намол адсорбента вносит существенный вклад в увеличение содержания механических примесей и зольных компонентов в масле, что потенциально может негативно сказаться на эксплуатационной надёжности оборудования. В связи с этим рекомендуется проводить дополнительную очистку регенерированного масла с применением фильтрации для удаления мелкодисперсных частиц намола.

4. Лимитирующей стадией процесса регенерации турбинного масла с применением комплексного поглотителя является диффузия, что подтверждено значением энергии активации $E_а = 6{,}68$ кДж/моль и температурным

коэффициентаом $k_t \geq 1{,}2$, характерных для процессов, контролируемых массопереносом.

5. Экспериментальным путём установлено, что варьирование гидродинамическими параметрами перемешивания (в частности, частотой вращения перемешивающего устройства в диапазоне 50 – 400 об/мин) подтверждает протекание регенерации в области внешнедиффузионного контроля.

6. Экспериментально подтверждено влияние гидродинамических параметров перемешивания на регенерацию масла: увеличение частоты вращения мешалки снижает кислотное число до нормативного уровня для масла ТП-22С ($К_ч \leq 0{,}07$ мг КОН/г), что также подтверждает возможность оптимизации процесса регенерации за счёт управления гидродинамическим режимом.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АППАРАТА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДСОРБЦИОННО-ЩЕЛОЧНОГО ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С

Для очистки отработанного турбинного масла от низкомолекулярных продуктов окисления предлагается комплексный метод, основанный на сочетании адсорбции и щелочной обработки. Данный метод направлен на удаление из нефтепродуктов таких загрязнителей, как низкомолекулярные органические кислоты и асфальтосмолистые вещества [95].

Адсорбционно-щелочная очистка обеспечивает удаление продуктов окисления из отработанного масла, в том числе низкомолекулярных кислот и полярных соединений, за счёт комбинации химической нейтрализации и физической адсорбции. Экспериментальные данные позволяют рекомендовать этот комбинированный метод в качестве основного для регенерации отработанного турбинного масла [83]. Адсорбция — эффективный способ улучшения качества масла, позволяющий довести содержание продуктов окисления (оксикислот, фенолов, спиртов, смол и асфальтенов) до уровня, соответствующего стандартам и техническим условиям [17, 67].

В процессе регенерации отстоявшееся масло направляется в адсорбционную установку. Установка, включающая в себя комплекс оборудования и трубопроводов, обеспечивает следующие этапы процесса: подачу отработанного масла в адсорбер, загрузку комплексного поглотителя, адсорбционную очистку масла путем его контакта с адсорбентом и отделение очищенного масла от отработанного адсорбента, фильтрование, сепарирование масла с последующим удалением возможного намола для утилизации [83].

Предложена конструкция аппарата с фиксированной загрузкой, в которой отработанное масло контактирует с комплексным поглотителем при оптимизированных параметрах скорости и времени контакта, после чего в том же аппарате происходит разделение регенерированного масла и отработанного твёрдого регенерирующего вещества [104, 107].

По результатам экспериментальных исследований в качестве сорбента рекомендуется использовать комплексный поглотитель цеолит марки NaX, содержащий на поверхности гидроксид калия, что приводит к увеличению сорбционной способности [83]. Синтетический цеолит марки NaX является эффективным адсорбентом, ключевыми характеристиками которого являются дисперсность, пористость, порозность и удельная поверхность. Эти характеристики, определяющие размер частиц адсорбента и его емкость, оказывают значительное влияние на эффективность адсорбционного процесса: увеличение дисперсности сорбента приводит к росту удельной поверхности и, как следствие, к повышению адсорбционной ёмкости. Однако чрезмерное измельчение может усложнять последующее отделение сорбента и способствовать увеличению содержания механических примесей в очищенном масле [108, 109]. В лабораторных условиях была исследована возможность применения комплексного поглотителя цеолита для удаления низкомолекулярных компонентов из отработанного масла, образующегося в процессе его эксплуатации. Модификация поверхности цеолита гидроксидом калия не приводит к деградации его адсорбционных свойств, а напротив, увеличивает реакционную способность и адсорбционную емкость сорбента [110].

Исследовано отработанное турбинное масло ТП-22С (марка 1) на предмет его качественных и количественных характеристик (кислотное число, кинематическая вязкость, температура вспышки, водорастворимые кислоты и щелочи, механические примеси, зольность, содержание воды и другие показатели) [69, 84, 111].

Процесс адсорбционно-щелочной очистки основан на комбинированном действии сорбента и щёлочи. Низкомолекулярные кислоты нейтрализуются гидроксидом калия, а асфальтосмолистые продукты адсорбируются на поверхности комплексного поглотителя. Эффективность метода оценивали по динамике снижения кислотного числа при варьировании концентрации поглотителя (1 – 5 масс. %), времени обработки (15 – 120 мин) и скорости

перемешивания (50 – 400 об/мин) [102]. Диапазоны варьирования параметров выбраны на основании предварительных исследований и ограничений по гидродинамике аппарата и селективности процесса.

Данные в работе [95], полученные в результате адсорбционно-щелочной регенерации отработанного нефтепродукта, показали, что описанный способ очистки позволяет эффективно очистить масло, удаляя продукты окисления (низкомолекулярные кислоты), механические примеси и воду. На примере масла ТП-22С подтверждена перспективность метода для регенерации турбинных масел: метод отличается экологичностью, экономичностью и низким энергопотреблением [106].

4.1 Эскизная схема процесса при установлении режимов работы установки для регенерации

Эскизная технологическая схема адсорбционно-щелочной регенерации масла демонстрирует ключевые этапы очистки: удаление крупных примесей отстаиванием, адсорбционно-щелочная обработка и отделение в емкостном аппарате, фильтрация и сепарация. На схеме (рисунок 34) обозначены основные аппараты, потоки сырья и реагентов.

Первая и обязательная стадия адсорбционно-щелочной очистки — отстаивание масла.

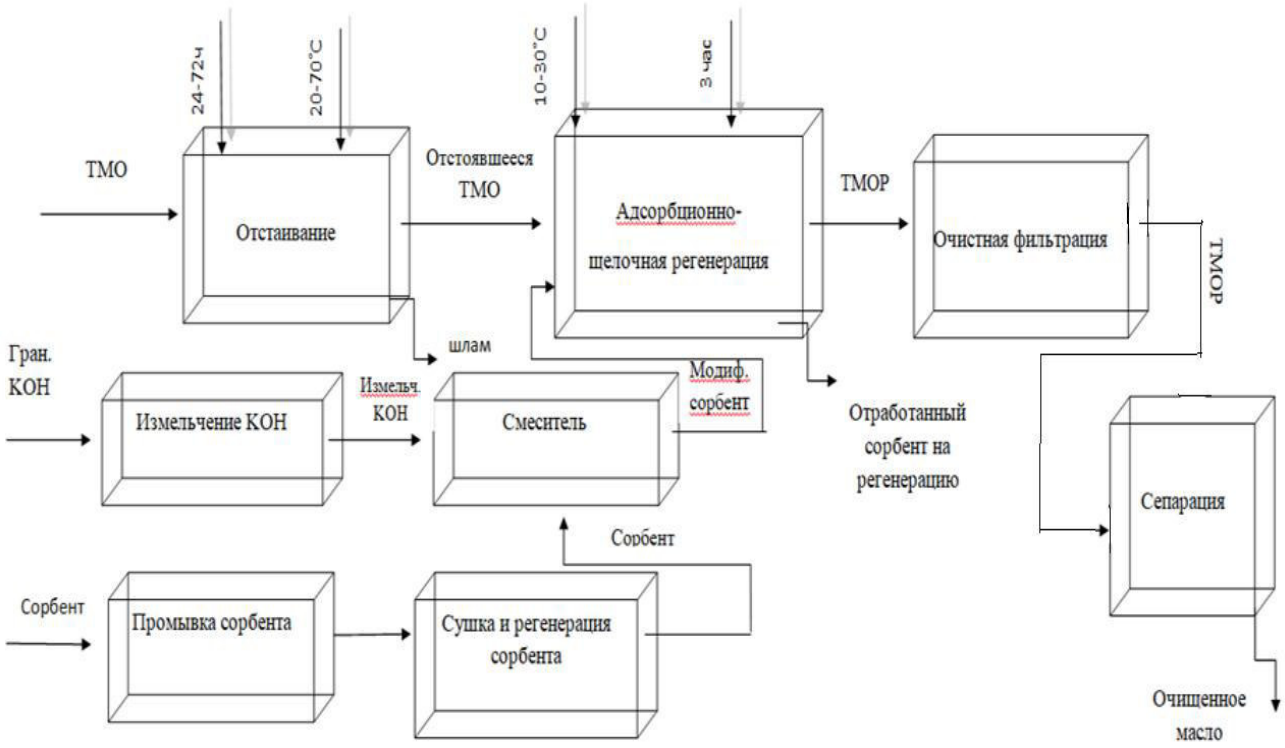


Рисунок 34 – Эскизная схема очистки отработанного масла адсорбционно-щелочным методом

Отстаивание — это гравитационное разделение фаз в грубодисперсных жидких системах. В процессе отстаивания происходит седиментация дисперсной фазы: частицы либо оседают под действием силы тяжести, либо всплывают из-за разницы в плотности с дисперсионной средой. В промышленности отстаивание применяется для выделения диспергированного вещества или для удаления механических примесей из жидкости. Эффективность процесса напрямую зависит от разности плотностей фаз и размера частиц дисперсной фазы. Для оптимального разделения необходимо избегать турбулентности, конвекции и образования структур, препятствующих седиментации [113].

В зависимости от степени загрязнения и времени, выделенного на очистку, отстаивание используют либо как самостоятельный способ, либо как предварительный этап перед фильтрацией или центробежной очисткой. Главным недостатком данного метода является длительность процесса оседания частиц до достижения полной очистки, а также то, что удаляются

преимущественно частицы размером 50 – 100 мкм. Отстаивание применяется для минимизации энергозатрат на начальном этапе очистки.

Отстаивание должно проводиться не менее 24 ч при подогреве масла в диапазоне температур 20–70 °С согласно Технологическому регламенту на эксплуатацию КС-28 Моршанское ЛПУМГ (Первомайский ПУ) [67]. Осадок, образующийся на протяжении процесса отстаивания, удаляется и направляется в шламонакопитель.

Вторая стадия — адсорбционно-щелочная регенерация. После отстойника масло направляют на этап регенерации, куда загружается отработанное масло и комплексный поглотитель на основе цеолита. Получение комплексного поглотителя осуществляется на отдельном этапе, на который подают предварительно измельченную щелочь. Гидроксид калия, нанесенный на поверхность сорбента, способствует более эффективному удалению из масла низкомолекулярных продуктов окисления. Щёлочь нейтрализует низкомолекулярные кислоты с образованием водорастворимых калиевых солей. При последующем разделении фаз эти соли преимущественно переходят в водную фазу и удаляются из масла [73, 83].

В адсорбере происходит процесс перемешивания отработанного турбинного масла и твердого регенерирующего материала с помощью механического устройства – лопастной мешалки с выдерживанием заданного временного интервала и поддержанием температуры 10 – 30 °С, тем самым создаются благоприятные условия для приведения в движение твердых частиц регенерирующего вещества и поднятия их со дна аппарата потоками масла. Контактирование масла с комплексным поглотителем позволяет снизить кислотное число, уменьшить содержание полярных продуктов окисления и механических примесей, что способствует восстановлению ключевых эксплуатационных характеристик масла (вязкости, температуры вспышки, стабильности к окислению) в соответствии с требованиями ТР ТС 030/2012 [114].

Третья стадия — фильтрация регенерированного масла. После регенерации отработанное масло подается на очистную фильтрацию, где отделяются механические примеси и остаточные продукты очистки. Отработанный поглотитель (адсорбент) передается на регенерацию/утилизацию.

Четвертая стадия — сепарация, предназначенная для отделения водной фазы и мелкодисперсных механических примесей от регенерированного масла. Сепарация проводится в центробежном сепараторе при частоте вращения 4500 – 8000 об/мин. Продолжительность обработки одной партии масла составляет 45 – 50 мин; производительность установки обеспечивает суммарную продолжительность работы до 18 ч в смену в зависимости от объёма и степени загрязнения согласно Инструкции по эксплуатации маслоочистительной машины ПСМ 2-4 Моршанского ЛПУМГ (Первомайского ПУ), что обеспечивает эффективное разделение фаз за счет разности плотностей. Центробежная сепарация предпочтительна при высокой скорости разделения и возможности обработки разных объемов масел. Методика сепарации разработана на основе Инструкции и Регламента Моршанского ЛПУМГ (Первомайского ПУ) [67, 115].

После завершения процесса регенерации получают базовое масло. Для стабилизации базового масла и повышения его устойчивости к окислению вводится антиокислительная присадка (Ангидол-1) в концентрации 0,2–0,3 % масс. Дозировка и эффективность присадки соответствуют требованиям к турбинным маслам по ТР ТС 030/2012.

Ангидол-1 — это антиокислительная присадка (химическое название ионол, 2,6-дитретбутил-4-метилфенол) [115, 116]. Замедление окисления масла ингибирует цепные реакции окисления, связывая свободные радикалы, снижает скорость накопления продуктов окисления (кислот, смол, шлама), сохраняет эффективность в условиях нагрева (до 120 °C и выше), характерных для работы турбоустановок.

4.2 Материальный баланс процесса

В рамках оптимизации производственных процессов разработан материальный баланс процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С на адсорбционной установке [83]. Цель расчета – определение норм расхода основных видов сырья и материалов, а также количественных характеристик образования отходов производства. Баланс составлен в соответствии с ГОСТ Р 57703-2017 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Ликвидация отработанных нефтепродуктов» [117], Программой производственного контроля (ПРД ГТМ 02/02-912-2024 «Порядок производственного экологического контроля ООО «Газпром трансгаз Москва», утв. Приказом № 862 от 13.09.2024) и отражает материальные потоки в границах технологического цикла от подачи сырья до выхода регенерированного продукта и побочных фракций. Согласно техническому заданию ООО «Газпром трансгаз Москва», объектом регенерации выступает объем отработанного турбинного масла ТП-22С, составляющий 5 $м^3$. Материальный баланс рассчитан применительно к данному объему с переводом в массовые единицы измерения и представлен в Приложении Б [118].

Приняты следующие исходные допущения:

плотность турбинного масла (ТП-22С) принята 890 кг/м³ (типичное значение при 20 °С);

цеолит NaX — 10 % от массы масла;

щёлочь (гидроксид калия) наносят на цеолит в количестве до 5 % от массы цеолита; вода на промывку/сушку принята из пропорции по исходному балансу; потери цеолита (пылеобразование) — 0,1 %, потери гидроксида калия — 1 %;

потери масла при регенерации — 5 % (унос с сорбентом + лёгкие фракции);

потери при фильтрации и сепарации — 0,5 % на каждой стадии от текущей массы масла;

намол (механический износ) принят пропорционально исходным данным.

Результаты расчета материального баланса демонстрируют количественное соответствие входящих и выходящих потоков веществ для заданного объема (5 м^3) с учетом установленных потерь и плотности масла.

4.3 Математическое описание процесса регенерации отработанного турбинного масла

Для внедрения процесса регенерации отработанных нефтепродуктов в промышленных масштабах необходимо определить оптимальные конструктивные и режимные параметры. Прямое масштабирование лабораторных данных невозможно из-за изменения гидродинамических и массообменных характеристик при переходе к промышленным объёмам. В связи с этим ключевым инструментом проектирования аппарата становится математическое описание процесса [120, 124], что требует понимания физико-химической природы и механизма его протекания.

Для четкого установления характера влияния щёлочи в составе комплексного поглотителя на кинетику процесса регенерации и на основании экспериментально полученного числа Шмидта выдвинули гипотезу, согласно которой наличие гидроксида калия на поверхности поглотителя цеолита приводит к увеличению кинетических параметров в пограничном диффузионном слое, то есть интенсифицирует процесс за счёт химического взаимодействия с органическими кислотами на поверхности сорбента. Согласно предложенному механизму (рисунок 35), при постоянстве материального потока (объеме масла V и концентрации низкомолекулярных органических кислот $c_к$), определяемого стадией внешней массоотдачи, процесс вызывает снижение концентрации поглощаемых органических кислот $c'_к$ на границе диффузионного пограничного слоя, что, в свою очередь, согласно уравнению массопереноса, увеличивает движущую силу процесса внешней массоотдачи в гидродинамическом пограничном слое $(c_к - c'_к)$, что отражается в

росте эффективного коэффициента массоотдачи β. При этом равновесная концентрация c^* задаёт теоретический предел процесса. Реальная концентрация на границе $c_к$ всегда стремится к равновесной c^*, но из-за гидродинамических ограничений не достигает её мгновенно.

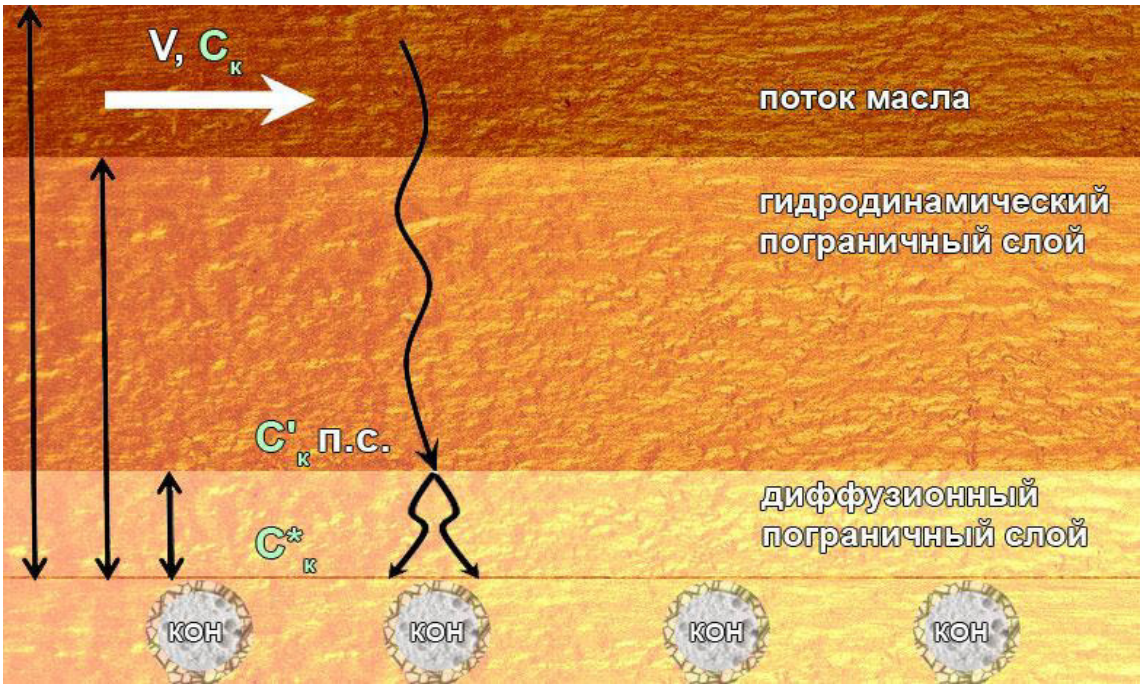


Рисунок 35 – Механизм влияния щелочи в составе комплексного поглотителя при диффузионном контроле:
$C_к$ — концентрация кислот в потоке масла;
$C'_к$ п.с. — концентрация кислот на границе диффузионного пограничного слоя;
$C^*_к$ — равновесная концентрация на поверхности сорбента.

Очистка отработанных нефтепродуктов адсорбционно-щелочным методом на уровне элементарных стадий лимитируется диффузионными процессами. Данный вывод обоснован экспериментальными исследованиями и следующими факторами:

- значение температурного коэффициента скорости процесса ($k \leq 1{,}2$), что характерно для диффузионно-контролируемых реакций;
- зависимость скорости регенерации от интенсивности перемешивания и гидродинамических условий;
- незначительное изменение энергии активации ($E_a \leq 7$ кДж/моль), что типично для процессов, лимитируемых диффузией.

С учётом диффузионного лимитирования для описания кинетики адсорбционно-щелочного метода в процессе регенерации целесообразно применить уравнение Щукарева, позволяющее количественно связать скорость процесса с коэффициентом массоотдачи и движущей силы массопереноса [121].

Для решения задачи совершенствования процесса регенерации турбинного масла необходимо установление таких технологических параметров (скорость перемешивания, концентрация щелочи в комплексном поглотителе) и нахождение значений конструктивных параметров аппаратурного оформления (объем, диаметр и высота аппарата), обеспечивающих достижение нормативных показателей качества очищенного масла при минимизации капитальных и эксплуатационных затрат за весь срок эксплуатации. Целесообразно представить математическое описание кинетики процесса регенерации турбинного масла с учетом следующих допущений:

1. Скорость процесса лимитируется стадией внешней массоотдачи.
2. Гранулы сорбента имеют однородную структуру и правильную сферическую форму.
3. В аппарате реализуется гидродинамический режим идеального смешения.
4. Пренебрегаем диффузионным сопротивлением в гидродинамическом пограничном слое.

В соответствии с законом Щукарева и сделанными допущениями изменение концентрации органических кислот (низкомолекулярных продуктов окисления) в процессе регенерации представим в виде:

$$\frac{dc_к}{d\tau} = \cdot\frac{\beta \cdot F \cdot \rho}{m_{масла}}(c_к - c^*) \qquad (4.1)$$

где $c_к$ – концентрация органических кислот в масле, кг/м^3; c^* – равновесная концентрация на поверхности сорбента, кг/м^3; β – эффективный коэффициент массоотдачи, м/с; F – поверхность раздела фаз, м^2; ρ – плотность масла, кг/м^3; $m_{масла}$ – масса турбинного масла, кг; τ – время, с.

С учетом начальных условий $c_к\ (0) = c_{к0}$, (4.2)

где $c_{к0}$ – исходная концентрация органических кислот, кг/м^3.

аналитическое решение уравнения математического описания процесса регенерации имеет следующий вид:

$$c_к = c_{к_0} \cdot e^{-\frac{\beta F \rho}{m_{масла}} \cdot \tau} + c^* \left(1 - e^{-\frac{\beta F \rho}{m_{масла}} \cdot \tau}\right), \quad (4.3)$$

Полученное уравнение математического описания процесса регенерации позволяет:

прогнозировать изменение кислотного числа при заданных параметрах процесса;

оптимизировать время регенерации (определить момент, когда дальнейшее проведение процесса нецелесообразно);

масштабировать лабораторные данные на промышленные установки.

4.4 Вывод и определение коэффициентов критериального уравнения для расчета эффективного коэффициента массоотдачи

Практическое применение полученного уравнения (4.3) для инженерных расчетов и решения задачи оптимизации процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С возможно при наличии информации о значении эффективного коэффициент массоотдачи β. Каждый раз получение экспериментальных данных для расчета эффективного коэффициента массоотдачи сопряжено со значительными материальными и временными затратами. Поэтому целесообразнее является применение теории подобия. Экспериментальные данные по определению эффективного коэффициента массоотдачи β обработали и представили в виде зависимости критериального числа Шервуда от определяющих критериальных чисел Рейнольдса и Шмидта.

Экспериментальные данные по определению эффективного коэффициента массоотдачи β обработали и представили в виде зависимости

диффузионного критерия Шервуда Sh от определяющих критериев Рейнольдса Re, диффузионного критерия Шмидта Sc.

$$\mathrm{Sh} = f(\mathrm{Re}\ (n),\ \mathrm{Sc},\ C)\ , \tag{4.4}$$

В качестве определяющего гидродинамического критерия использовано число Рейнольдса мешалки $\mathrm{Re}_{\text{м}}$, рассчитанное по диаметру и частоте вращения мешалки при кинематической вязкости масла ТП-22С, принятой равной $\nu = 22 \cdot 10^{-6}$ м²/с (паспортное значение при 40 °С):

$$\mathrm{Re}_{\text{м}} = \frac{d \cdot \omega}{\nu}, \tag{4.5}$$

где d – диаметр мешалки, м; n – частота вращения мешалки, об/мин; ν – кинематическая вязкость среды, м^2/с.

$$\mathrm{Sc} = \frac{\nu}{D} \tag{4.6}$$

где D – коэффициент диффузии, м^2/с.

Анализ дифференциального уравнения конвективного массообмена обосновал вид критериальной зависимости в степенной форме:

$$\mathrm{Sh} = a \cdot \mathrm{Re}^b \cdot \mathrm{Sc}^c \tag{4.7}$$

Критериальное уравнение получено для постоянного размера сферических частиц комплексного поглотителя, используемого в промышленных условиях, приняли допущение о пропорциональности числа Re на поверхности частицы и центробежного критериального числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_{\text{ц}}$. Принимая, что средняя окружная скорость в аппарате определяется частотой вращения привода, а характерный линейный размер задан диаметром мешалки через гидродинамический критерий подобия, тогда Re ~ $\mathrm{Re}_{\text{ц}}$, следовательно:

$$\mathrm{Re} = x \cdot \mathrm{Re}_{\text{ц}}; \tag{4.8}$$

В этом случае уравнение (4.7) принимает вид:

$$\mathrm{Sh} = a' \mathrm{Re}_{\text{ц}}^{b} \mathrm{Sc}^{c}, \tag{4.9}$$

где $a' = a \cdot x^{b}$.

Задача расчета коэффициента эффективной массоотдачи сводится к определению коэффициентов a', b, c в уравнении с помощью теории подобия,

что предполагает обдуманный подход к выбору определяющих размеров, выступающих в качестве переменных в критериальных уравнениях [120]. Значения коэффициентов критериального уравнения *a'*, *b*, *c* определены в результате обработки экспериментальных данных, представленных на рисунке 36. Обработка осуществлялась с использованием метода наименьших квадратов (МНК) в программном продукте MathCad 15 © MathSoft. В результате математической обработки экспериментальных данных получено критериальное уравнение 4.10:

$$Sh = 0{,}0052 \cdot Re_{ц}^{0{,}808} \cdot Sc^{0{,}038} \qquad (4.10)$$

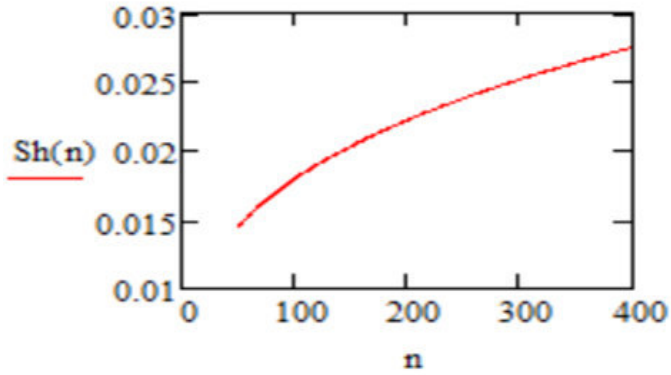


Рисунок 36 – Зависимость критерия Шервуда
от частоты вращения перемешивающего устройства

Слабая зависимость критерия Шервуда от числа Шмидта ($Sc^{0{,}038}$) свидетельствует о том, что в исследованном диапазоне гидродинамических условий интенсивность массопереноса определяется преимущественно конвекцией, а вклад молекулярной диффузии остаётся практически постоянным за счет относительно тонкого диффузионного пограничного слоя.

Таким образом, перемешивание интенсифицирует процесс массообмена: за счёт конвективной составляющей возрастает эффективный коэффициент массоотдачи, что проявляется в повышении критерия Шервуда (Sh).

Для учёта влияния концентрации гидроксида калия (C, масс. %) в составе комплексного поглотителя на процесс массопереноса на основе

литературных данных предложено модифицированное критериальное уравнение вида (4.11):

$$\mathrm{Sh} = a'\mathrm{Re}_{\text{ц}}^{b}\mathrm{Sc}^{c}(1 + d\mathrm{C}^{e}), \qquad (4.11)$$

где C – концентрация КОН, масс. %

Значения коэффициентов критериального уравнения d, e определены в результате обработки экспериментальных данных. Обработка осуществлялась с использованием метода МНК и программного продукта MathCad 15 © MathSoft:

$$\mathrm{Sh} = 0{,}0052 \cdot \mathrm{Re}_{\text{ц}}^{0{,}808} \cdot \mathrm{Sc}^{0{,}038}(1 + 1{,}429 \cdot C^{0{,}104}) \qquad (4.12)$$

Экспериментальное исследование массопереноса в системе с механическим перемешиванием позволило установить количественную связь между критерием Шервуда (Sh) и режимными параметрами процесса – частотой вращения мешалки (n, об/мин) и концентрацией комплексного поглотителя (C, % масс.). Результаты, представленные в координатах обобщённых переменных Sh(C, n) (рисунок 37), демонстрируют однозначную тенденцию: Sh монотонно возрастает с увеличением n и C:

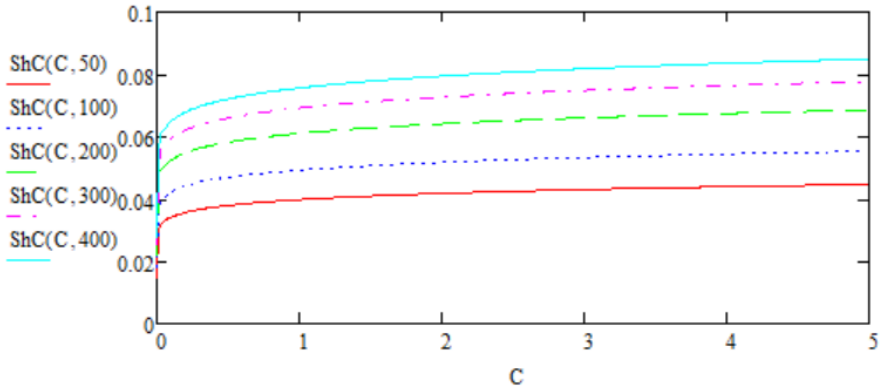


Рисунок 37 – Зависимость критерия Шервуда (Sh)
от концентрации сорбента (C) и частоты вращения мешалки (n)

Таким образом, полученное критериальное уравнение (4.12) [120, 121] позволяет оценить влияние гидроксида калия в составе комплексного поглотителя на эффективность массопереноса в условиях диффузионного контроля, коэффициенты которого дают возможность определить оптимальные

рабочие параметры системы, в том числе, эффективного коэффициента массоотдачи.

4.5 Проверка адекватности математического описания кинетики массообмена

Верификация математической модели выполнена путём сопоставления расчётных и экспериментальных данных, полученных в диапазоне варьируемых параметров (концентрация гидроксида калия, частота вращения мешалки, продолжительность процесса). На рисунке рисунок 38 а)–в) представлены графики сопоставления расчётных и экспериментальных данных, демонстрирующие хорошее совпадение как по общей тенденции, так и по характерным точкам.

Для количественной оценки расхождения применён критерий среднеквадратичного отклонения, значение которого составило не более 8,7 %. Принятая допустимая погрешность $\delta_{доп} \leq 10\%$ согласована с инструментальной погрешностью определения кислотного числа (ГОСТ 5985).

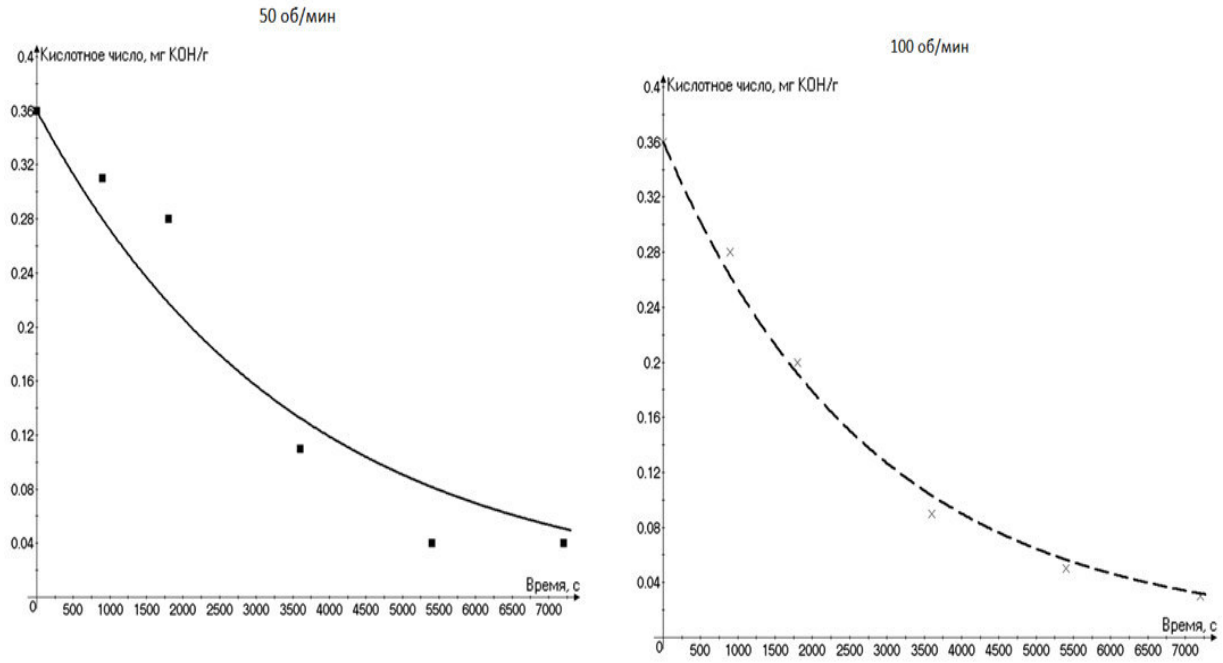


Рисунок 38 а) – Кинетика процесса регенерации отработанного турбинного масла при частоте вращения перемешивающего устройства 50 и 100 об/мин соответственно. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

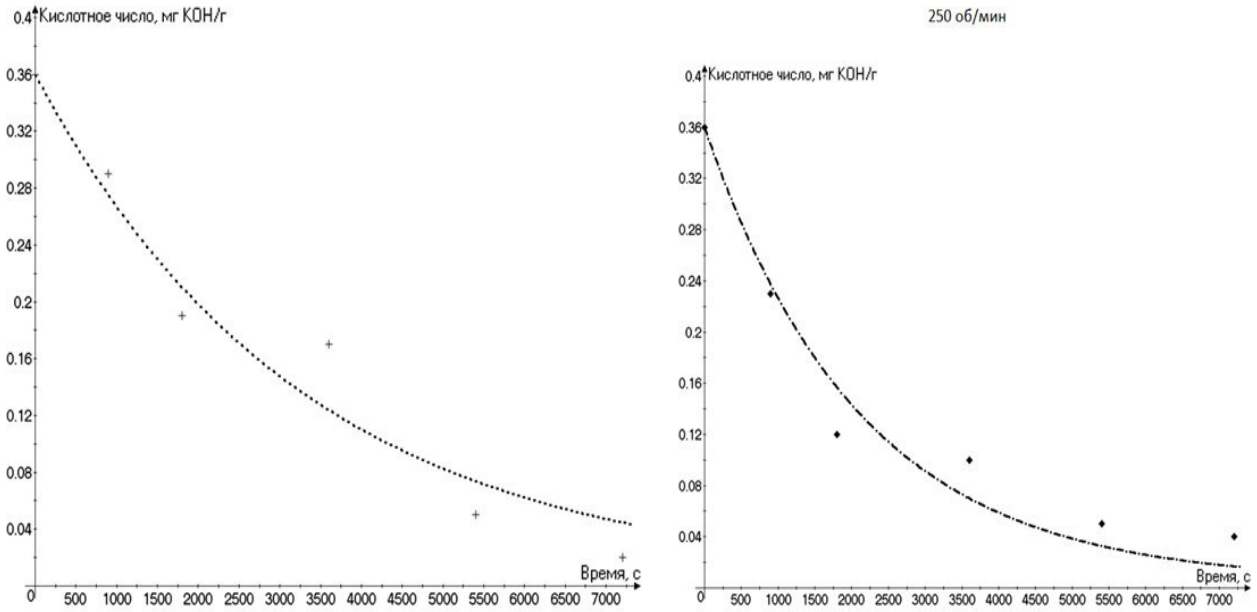


Рисунок 38 б) – Кинетика процесса регенерации отработанного турбинного масла при частоте вращения перемешивающего устройства 150 и 250 об/мин соответственно. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

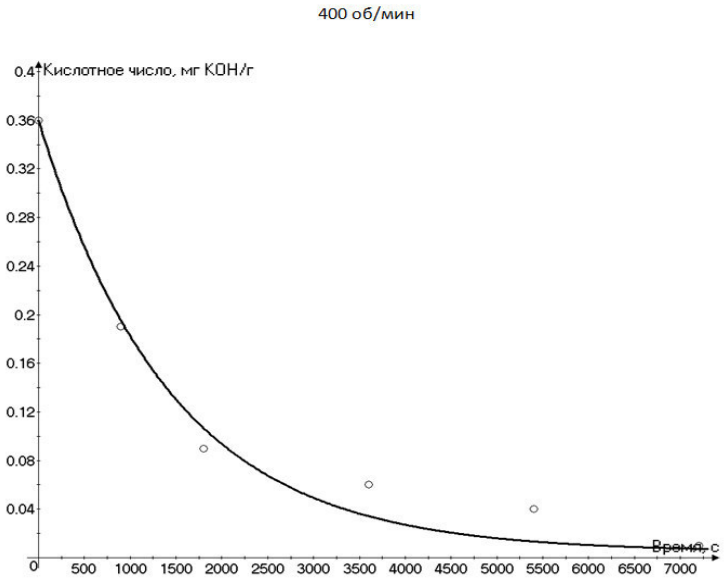


Рисунок 38 в) – Кинетика процесса регенерации отработанного турбинного масла при частоте вращения перемешивающего устройства 400 об/мин. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Полученный результат подтверждает адекватность математического описания реальному процессу массообмена при регенерации турбинного масла адсорбционно-щелочным методом.

4.6 Постановка и решение задачи оптимального проектирования аппарата для регенерации отработанного турбинного масла

Создание энерго- и ресурсосберегающих технологий не представляется возможным без применения подходов оптимального проектирования. Для постановки оптимизационной задачи необходимо определить набор варьируемых независимых параметров (переменных), а также выбрать тип и вид критерия оптимальности.

Основными конструктивными параметрами аппарата для регенерации отработанного масла являются его высота и диаметр, при этом данные параметры зависят от объема аппарата и являются табулированными функциями (типовыми зависимостями от объема). В качестве варьируемого независимого параметра выбран объём аппарата, который является определяющим конструктивным параметром и задаёт значения остальных геометрических характеристик (высоты и диаметра). Анализ экспериментальных данных, приведенных в Главе 3, показал, что основными параметрами являются частота вращения мешалки и концентрация щелочи в составе комплексного поглотителя. На процесс регенерации оказывает влияние температура, но из экономических соображений принято решение о регенерации турбинного масла при комнатной температуре для исключения стадии нагрева. В результате вышесказанного в качестве основных параметров, значения которых менялись в ходе исследований: концентрация гидроксида калия в комплексном поглотителе C, % масс. и частота вращения механического перемешивающего устройства n, об/мин.

Для выбора рационального технологического решения в рыночных условиях целесообразно использовать экономический критерий оптимальности. В рамках данной диссертационной работы в качестве критерия оптимальности выбраны затраты на реализацию процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С за весь срок эксплуатации. Критерий оптимальности

включает капитальные затраты на разработку, изготовление и монтаж технологического оборудования и эксплуатационные затраты на приобретение сырья (щелочи) и электроэнергию. Для расчета капитальных затрат введена пропорциональность функциональных характеристик от объема аппарата:

$$К = V_а \cdot Ц_а. \quad (4.13)$$

В свою очередь объем аппарата периодического принципа действия определяется объемом перерабатываемого вещества и периодом процесса, то есть временем, затрачиваемого на получение одной партии регенерированного турбинного масла:

$$V_а = \frac{V_с \, \tau \, (1+z)}{\varphi \, \tau_с}, \quad (4.14)$$

где $V_с$ – суточный объем регенерируемого отработанного турбинного масла, м^3; τ – период процесса регенерации, с; z – запас производительности на случай непредвиденного выхода аппарата из строя (для нашего типа аппарата принято z = 0,1); φ – коэффициент верхнего заполнения аппарата (для нашего типа аппарата и процесса принято φ = 0,7); $\tau_с$ – суточный фонд времени, с.

Из вышеизложенного следует, что определяющий размер аппарата зависит от продолжительности процесса, то есть, времени, за которое кислотное число отработанного масла снизится до нормативных значений в процессе регенерации. Наряду с этим, время, в соответствии с уравнением (4.3), зависит от эффективного коэффициента массоотдачи, который определяется частотой вращения механического перемешивающего устройства (числом $Re_ц$) и концентрацией щелочи в комплексном поглотителе. Таким образом, уравнение (4.13) примет вид (4.15):

$$К\,(C, n) = V_а(C, n) \cdot Ц_а. \quad (4.15)$$

На основании анализа уравнения (4.15) сделали вывод о том, что определяющий размер аппарата для регенерации отработанного масла является зависимой переменной от частоты вращения вала мешалки и концентрации щелочи. Соответственно, в качестве варьируемых параметров приняли частоту вращения и концентрацию.

Эксплуатационные затраты рассмотрели, как сумму затрат на щелочь и электроэнергию за весть срок эксплуатации аппарата. Затраты на щелочь $Э_{щ}$ в составе комплексного поглотителя представили в виде:

$$Э_{щ}(C) = Ц_{щ} \cdot V_{г} \cdot \tau_{э} \cdot \rho \cdot C \cdot C_{п}, \quad (4.16)$$

где $Ц_{щ}$ – цена щелочи, руб/кг; $V_{г}$ – годовой объем отработанного масла, м^3; $\tau_{е}$ – срок эксплуатации оборудования, год; ρ – плотность турбинного масла (≈ 0,875 кг/м^3); $C_{п}$ – доля комплексного поглотителя в масле ($C_{п} = 0,1$).

Затраты на электроэнергию$Э_{э}$ можно представить в виде:

$$Э_{э}(n) = Р \cdot Ц_{э} \cdot \tau_{с} \cdot \tau_{э} \cdot K_N \cdot n^3 \cdot d_m^5, \quad (4.17)$$

где Р – количество рабочих дней в году; $Ц_{э}$ – цена электроэнергии, руб/Дж; K_N – коэффициент мощности привода мешалки; d_m – диаметр мешалки, м.

Таким образом эксплуатационные затраты имеют следующий вид:

$$Э(C,n) = Э_{щ}(C) + Э_{э}(n) \quad (4.18)$$

В соответствии с уравнениями (4.15) и (4.18) критерий оптимальности примет следующий вид:

$$I = К\,(V(\tau_{пр}(C, n))) + Э\,(C, n) \rightarrow \min. \quad (4.19)$$

Ограничения оптимизационной задачи представлены уравнениями связи (кинетические зависимости, описывающие кинетику процесса регенерации) и неравенствами, устанавливающими условия применения полученного модифицированного критериального уравнения. Математическая постановка задачи оптимизации имеет следующий вид:

$$\{C, n\} \quad (4.20)$$

$$I(C, n) = К(C, n) + Э(C, n) \rightarrow \min. \quad (4.21)$$

$$\frac{dc_к(\tau)}{d\tau} = \frac{\beta F \rho}{m_{масла}}(c_к(\tau) - c^*). \quad (4.22)$$

$$c_к(0) = c_{к\,0} \quad (4.23)$$

$$Sh = 0,0052 \cdot Re_ц^{0,808} \cdot Sc^{0,038}(1 + 1,429 \cdot C^{0,104}). \quad (4.24)$$

$$c_к(\tau_{пр}) = c_{н\,.} \quad (4.25)$$

$$V_а = \frac{V_с\,\tau_{пр}\,(1+z)}{\varphi\,\tau_с}. \quad (4.26)$$

$$V_а \in (V_{а\,1}, V_{а\,2}, \ldots, V_{а\,m});\ \tau_{пр} \le \tau_{max};\ 140 \le Re_ц(n) \le 720;\ C \le 5\%. \quad (4.27)$$

Необходимо найти такие варьируемые параметры (концентрацию гидроксида калия в составе комплексного поглотителя и частоту вращения механического перемешивающего устройства) (4.20), при которых критерий оптимальности (4.21) стремится к минимуму при выполнении условий (4.22) – (4.27).

Решение оптимизационной задачи с применением метода сопряжённых градиентов выполнено для следующих условий: суточный фонд времени 24 ч ($\tau_с$ = 86400 с); суточный объем регенерируемого турбинного масла 5 м^3 ($V_{сут}$ = 5 м^3); исходное кислотное число $K_ч = 0{,}36$ мг КОН/г масла; нормативное значение кислотного числа регенерированного масла $K_ч$ = 0,05 мг КОН/г масла; срок эксплуатации оборудования 20 лет ($\tau_е = 6{,}31152 \cdot 10^8$ с) [126].

Рациональный режим процесса регенерации масла имеет следующие технологические и конструктивные параметры, соответствующие минимуму целевой функции: частота вращения мешалки n = 2,129 об/мин, концентрация гидроксида калия $C = 0{,}124$ масс.%, расчетный объём аппарата $V_а = 3{,}168$ м^3, установленный в соответствии с ограничением (4.27), диаметр аппарата 1,4 м, общая высота аппарата 2,25 м, высота цилиндрической части 1,5 м, продолжительность процесса $\tau_{пр} = 3{,}483 \cdot 10^4$ с (9,676 ч). Указанные значения соответствуют минимуму критерия оптимальности ($I = 3{,}777 \cdot 10^7$ руб.) при соблюдении технологических ограничений, что обеспечивает требуемую глубину очистки масла.

Зависимость критерия оптимальности от частоты вращения мешалки и концентрации щелочи во всем диапазоне поиска минимума представлен на рисунке 39.

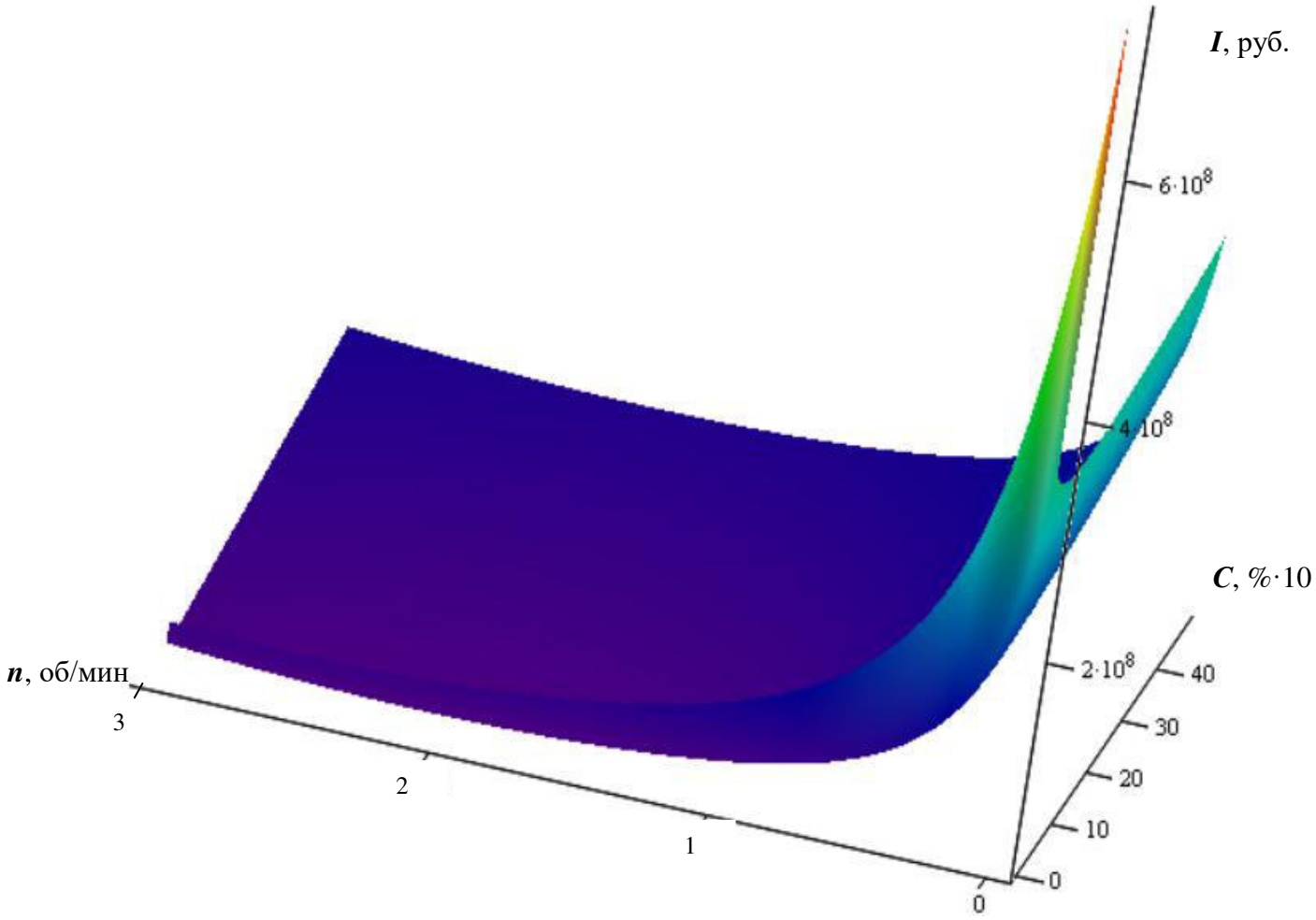


Рисунок 39 – Зависимость критерия оптимальности от частоты вращения мешалки и концентрации щелочи

Зависимость критерия оптимальности от частоты вращения мешалки и концентрации щелочи в диапазоне $0{,}1 \le C \le 0{,}6$ и $2 \le n \le 2{,}25$ поиска минимума представлен на рисунке 40.

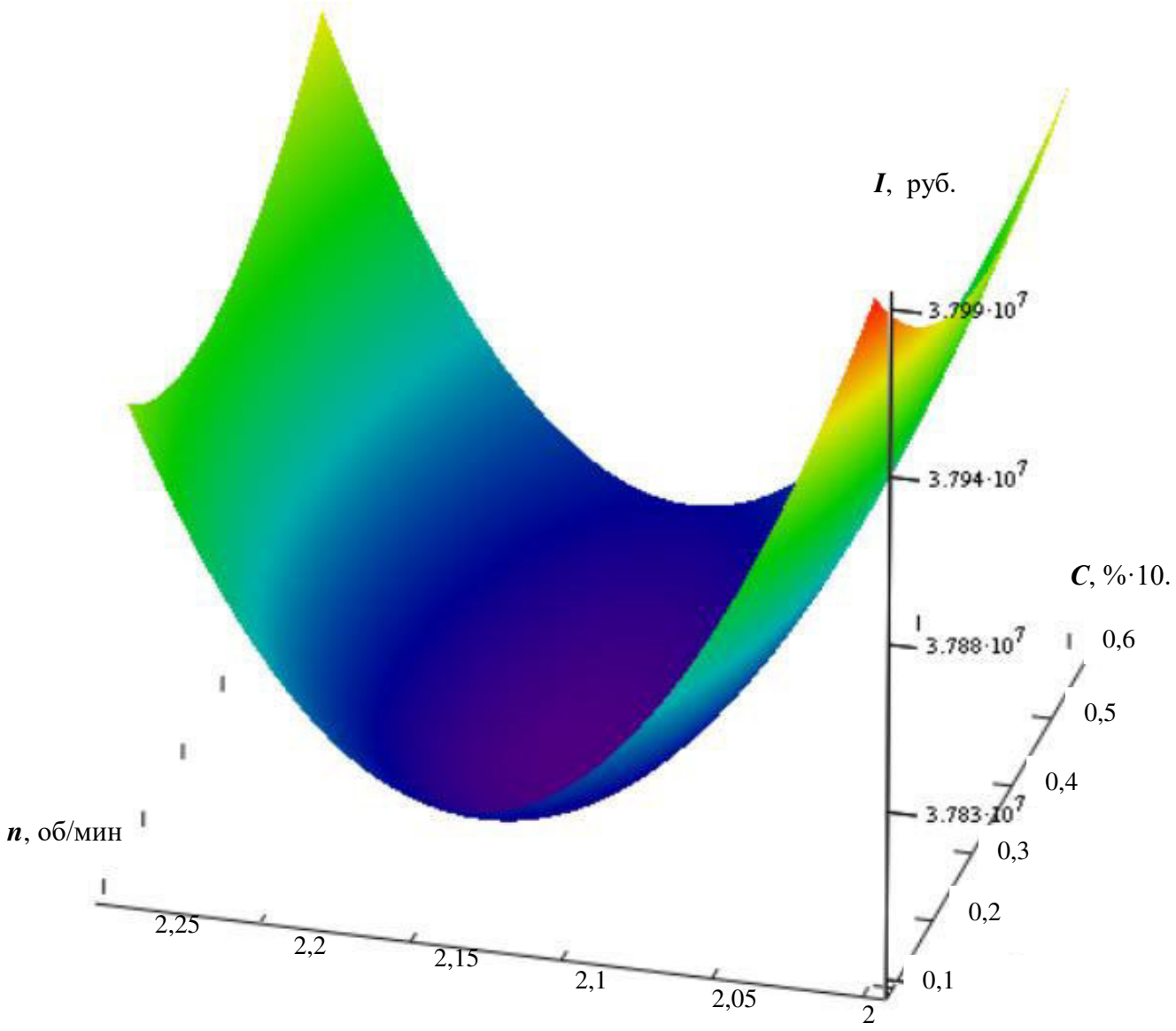


Рисунок 40 – Зависимость критерия оптимальности от частоты вращения мешалки и концентрации щелочи в ограниченном диапазоне поиска минимума

Экстремальный характер критерия оптимальности объясняется противонаправленным влиянием варьируемых параметров на его значение. Чем больше концентрация щелочи и частота вращения вала привода механической мешалки, тем более интенсивно протекает процесс регенерации, а в соответствии с уравнением (4.26), объем аппарата будет относительно мал, то есть невелики капитальные затраты, но при этом значительны эксплуатационные затраты на приобретение щелочи и оплату электроэнергии. В противном случае при малых концентрациях гидроксида калия и значений

частоты вращения мешалки эксплуатационные затраты также невелики, но за счет большего времени на реализацию процесса регенерации отработанного масла для обеспечения суточной производительности требуется больший аппарат, а соответственно, более дорогой. Эти размышления можно иллюстрировать зависимостями капитальных (рисунок 41) и эксплуатационных (рисунок 42) затрат от частоты вращения мешалки и концентрации щелочи.

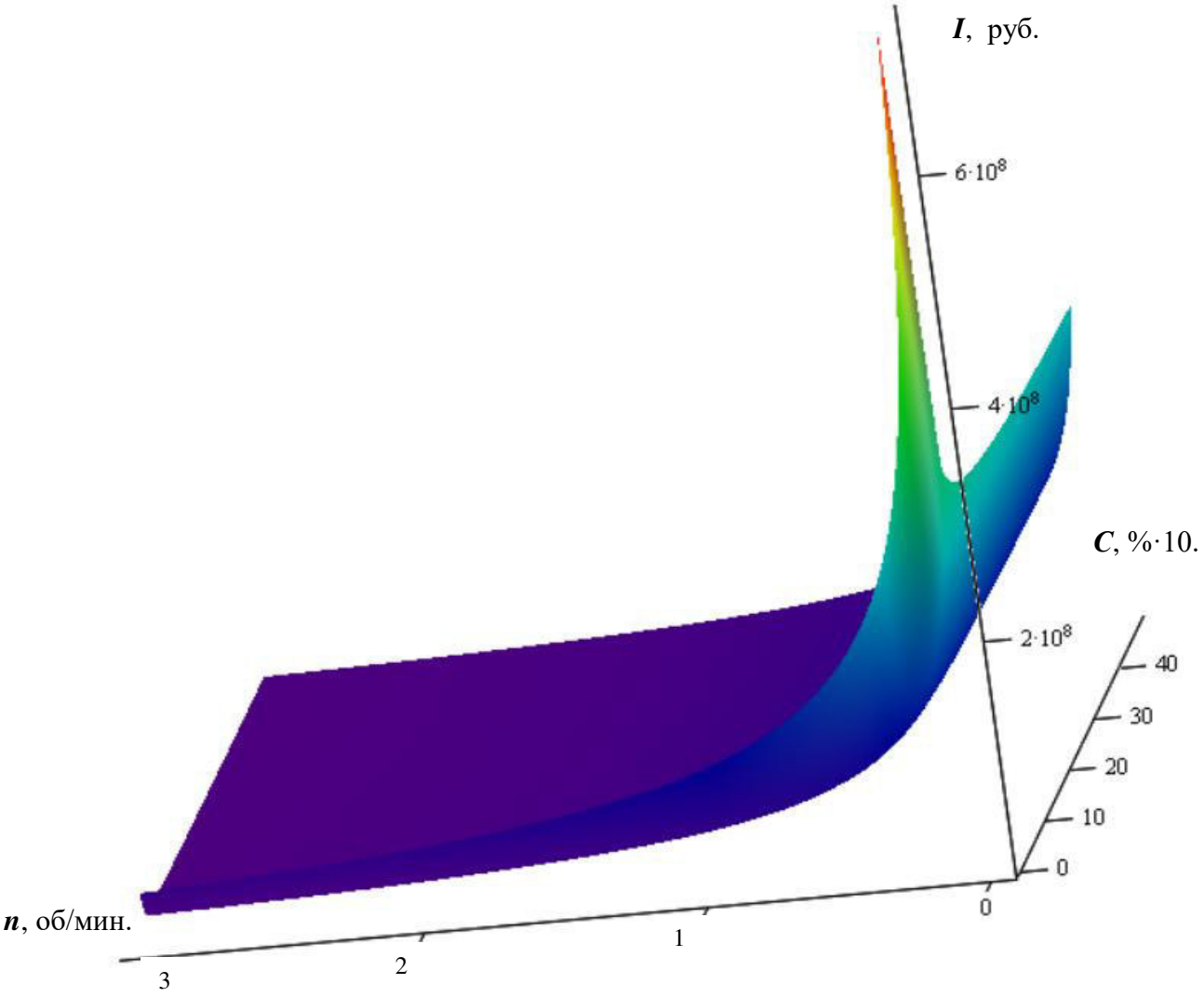


Рисунок 41 – Зависимость капитальных затрат от частоты вращения мешалки и концентрации щелочи

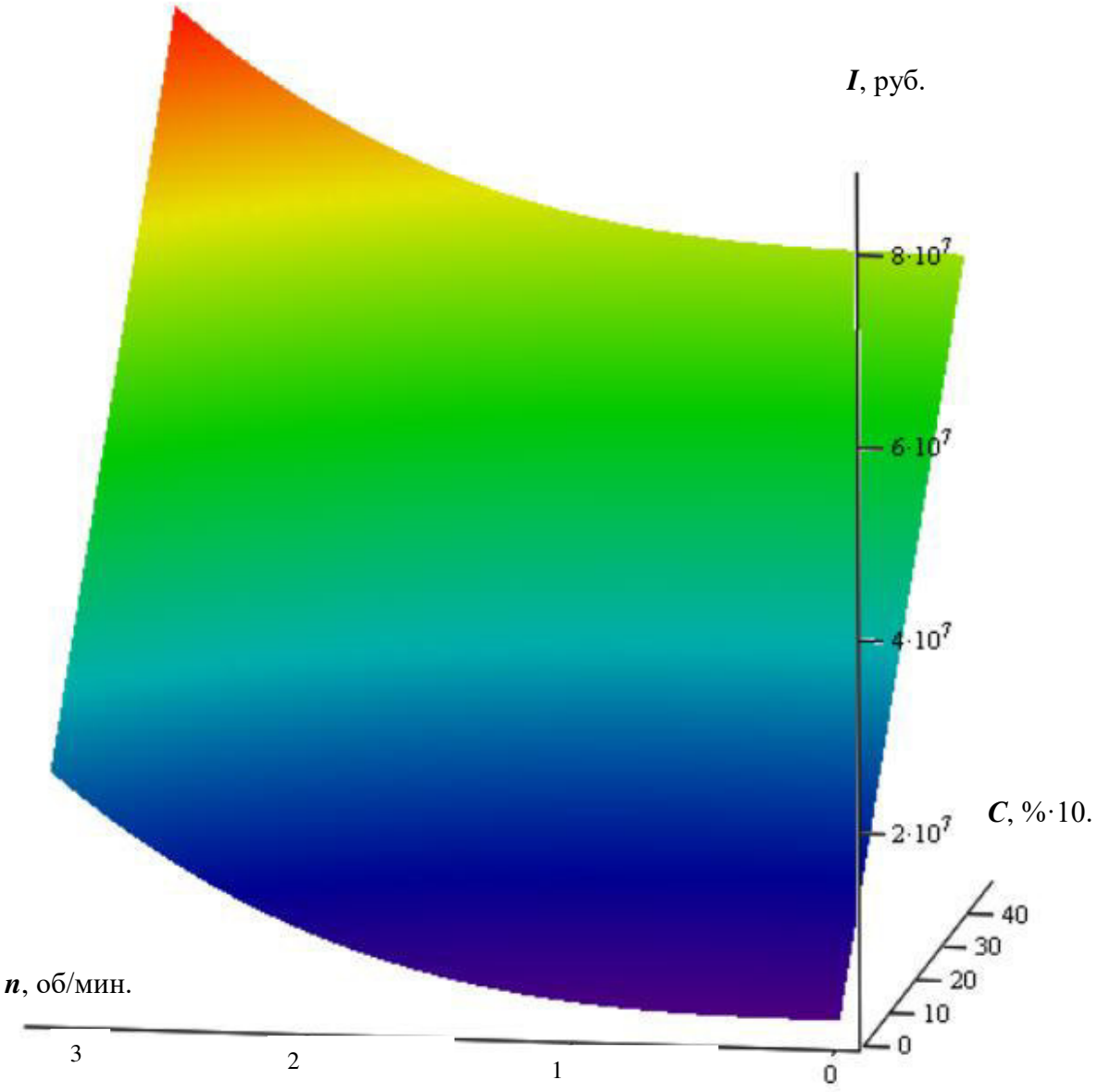


Рисунок 42 – Зависимость эксплуатационных затрат от частоты вращения мешалки и концентрации щелочи

Оптимальные параметры *C* и *n* должны быть реализованы в системе автоматического регулирования процесса:

- концентрация *C* поддерживается на заданном уровне за счёт дозирования щелочи;
- частота вращения *n* регулируется частотным преобразователем привода мешалки.

Достоверность найденного решения подтверждены следующими факторами:

- согласованность результатов численной оптимизации и графического анализа (совпадение значений $I = 3{,}777 \cdot 10^7$ руб. и $I = 3{,}78 \cdot 10^7$ руб.);
- выпуклая форма поверхности отклика, гарантирующая единственность и устойчивость решения;
- физическая обоснованность полученных значений (соответствие реальным диапазонам варьирования параметров и типичным соотношениям затрат для аппаратов с перемешиванием).

Для оценки экономической эффективности применения гидроксида калия в процессе регенерации турбинного масла выполнено сравнение оптимальных значений критерия оптимальности I для двух сценариев: с использованием гидроксида калия и без его применения. Установлено, что оптимальный режим со щёлочью характеризуется значением критерия оптимальности $I = 3{,}777 \times 10^7$ руб, тогда как в варианте без щёлочи (при оптимальной частоте перемешивания $n = 2{,}604$ об/мин) затраты за весь срок эксплуатации возрастают до $6{,}614 \cdot 10^7$руб, что обусловливает экономический эффект от применения гидроксида калия в размере $2{,}837 \cdot 10^7$руб.

Дополнительно проведён анализ с учётом антиоптимального режима, соответствующего максимальному значению критерия оптимальности в диапазоне $C \leq 5$ % масс. и $0{,}6 \leq n \leq 3$ об/мин. Значение критерия оптимальности составляют $1{,}389 \cdot 10^8$ руб. Сравнение с этим сценарием демонстрирует, что оптимизация параметров позволяет снизить затраты на $1{,}011 \times 10^8$ руб, подчёркивая критическую важность корректного выбора концентрации щёлочи и интенсивности перемешивания для обеспечения экономической эффективности процесса [119, 123].

Полученное решение оптимизационной задачи рекомендовано для проектирования оборудования и разработки технологической схемы.

Технологическая схема адсорбционно-щелочной регенерации представлена в Приложении В.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их использования при проектировании новых и модернизации действующих аппаратов с механическим перемешиванием. Предложенный подход позволяет минимизировать суммарные затраты за счёт оптимального выбора режима работы и типоразмера оборудования.

4.7 Методика определения режимов функционирования аппарата для регенерации

В настоящее время для решения задачи процесса регенерации отработанных масел применяются аппараты, представленные в работах [125-127]. Их общим ограничением является применение в качестве основного аппарата обогреваемой вакуумной колонны, которая требует повышенных требований к техническому обслуживанию и квалификации эксплуатирующего персонала, тем самым снижая технологичность регенерации отработанных масел. В открытых источниках есть информация об установке для регенерации отработанных масел мембранным методом [128]. Недостатком данного аппарата является высокие энергозатраты за счет применения водяного пара.

В настоящей диссертации предложен оригинальный аппарат (рисунок 43), реализующий процесс регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом и отделения отработанного комплексного поглотителя. Данный аппарат позволяет повысить технологичность процесса регенерации за счет совмещения в одном технологическом аппарате стадий регенерации и отделения регенерирующего материала, что способствует повышению эффективности работы аппарата с учетом полного вовлечение твердых частиц в процесс регенерации (Патент № 2870092 РФ).

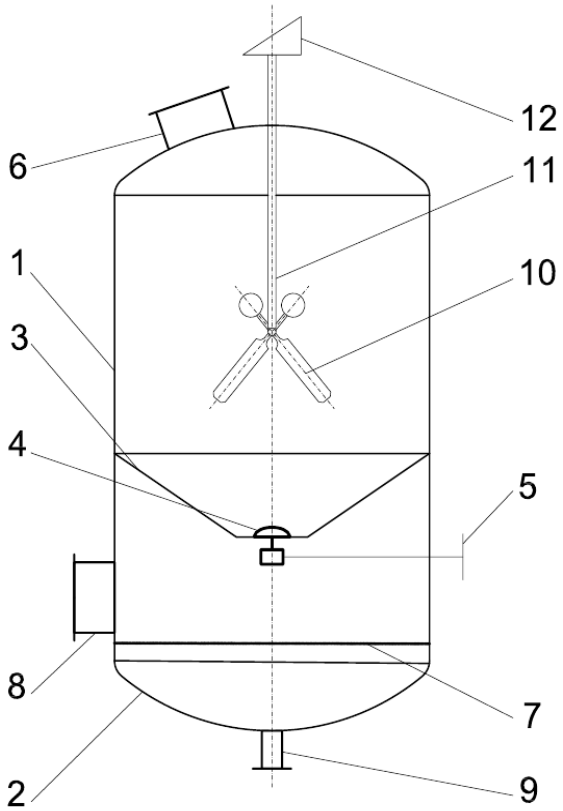


Рисунок 43 – Схема вертикального цилиндрического аппарата

Вертикальный цилиндрический аппарат *1* имеет эллиптическую крышку и днище *2*. Объем аппарата разделен на две части конической перегородкой *3*, которая имеет донный клапан *4*. Управление клапаном осуществляется при помощи привода *5*. Загрузка отработанного масла и твердого регенеративного материла осуществляется через люк *6*. Отделение регенерированного масла от твердого регенеративного материла реализуется в нижней части аппарата на горизонтальной фильтрующей перегородке *7*. Выгрузка отработанного твердого регенеративного материла выполняется через люк *8*, а слив регенерированного масла через штуцер *9*. В верхней части аппарат установлена лопастная мешалка *10*, имеющая шарнирное крепление лопастей к ступице, которые в зависимости от частоты вращения вала привода мешалки могу изменять угол наклона относительно горизонтальной оси. Крутящий момент на мешалку передается по валу *11* от привода *12*.

В верхнюю часть аппарата загружается отработанное турбинное масло и твердый регенерирующий материал. При включении механического

примешивающего устройства его лопасти находятся в нижнем положении (опущены вниз), тем самым создаются благоприятные условия для приведения в движение твердых частиц регенерирующего вещества и поднятия их со дна аппарата потоками масла. По мере увеличения частоты вращения механического перешивающего устройства, под действием центробежной силы, лопасти поднимаются, что позволяет обеспечить требуемые гидродинамические условия в процессе регенерации. После окончания процесса, в конической перегородке открывается донный клапан и в нижней части аппарата реализуется разделение фаз – регенерированного масла и отработанного твердого регенерирующего вещества.

Рассмотрим ситуацию, когда вращающаяся лопастная мешалка внутри емкостного аппарата достигает критической скорости вращения $\omega_{кр}$, то есть такой частоты, при которой проекция силы инерции центростремительной силы, направленная радиально наружу, уравновешивает проекцию силы тяжести, направленную вертикально вниз (рисунок 44).

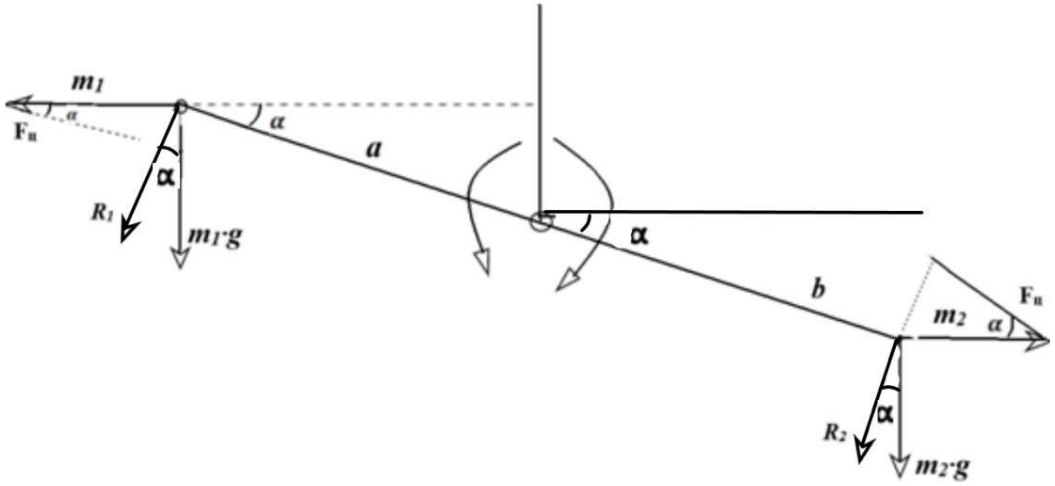


Рисунок 44 – Силовая схема вращения лопастной мешалки, имеющая шарнирное крепление лопастей

При определении критической скорости вращения лопастной мешалки $\omega_{кр}$ в емкостном аппарате результирующие силы R_1 и R_2, действующие на систему в процессе вращения, составляют $R_1 \cdot a = R_2 \cdot b$, то есть момент от результирующей силы R_1 на плече a должен уравновешиваться моменту от

результирующей силы R_2 на плече b. Тогда согласно рисунку 43 для двух противовесов получаем:

$$R_1 = m_1 \cdot g \cdot cos\alpha + \omega^2 \cdot a \cdot cos\alpha \cdot sin\alpha \quad (4.21)$$

$$R_2 = m_2 \cdot g \cdot cos\alpha - \omega^2 \cdot b \cdot cos\alpha \cdot sin\alpha, \text{ где} \quad (4.22)$$

R_1 и R_2 – векторная сумма сил, действующая на систему в процессе вращения (результирующая); a,b – соответствующие радиусы (или расстояния) от оси вращения до точек приложения этих сил; m_1, m_2 - масса противовеса; g – ускорение свободного падения; ω^2 – угловая скорость; α – угол наклона при заданной частоте вращения.

Приравнивание уравнений (4.25) и (4.26) дает уравнение (4.23):

$$m_1 \cdot g \cdot a \cdot cos\alpha + \omega^2 \cdot a^2 \cdot cos\alpha \; m_1 \cdot sin\alpha = m_2 \cdot g \cdot b \cdot cos\alpha - m_2 \cdot \omega^2 \cdot b^2 \cdot cos\alpha \cdot sin\alpha \quad (4.23)$$

Определим, как зависит критическая скорость $\omega_{кр}$ от комплекса механических и гидродинамических характеристик аппарата. Как только начинает вращаться лопастная мешалка, меняется угловая скорость ω^2, угол наклона α, а критическая скорость ($\omega_{кр}$) не изменяется непосредственно в момент начала вращения. Тогда, при $m_1 \cdot a^2 \neq m_1 \cdot b^2$ угол наклона α и геометрия известны, можно выразить критическую частоту $\omega_{кр}$ и угол наклона α по формулам (4.24), (4.25):

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{m_2 \cdot g \cdot b \cdot cos\alpha_{кр} - m_1 \cdot g \cdot a \cdot cos\alpha_{кр}}{m_1 \cdot a^2 \cdot cos\alpha_{кр} \cdot sin\alpha_{кр} + m_2 \cdot b^2 \cdot cos\alpha_{кр} \cdot sin\alpha_{кр}}} = \sqrt{\frac{m_2 \cdot g \cdot b - m_1 \cdot g \cdot a}{m_1 \cdot a^2 \cdot sin\alpha_{кр} + m_2 \cdot b^2 \cdot sin\alpha_{кр}}} \quad (4.24)$$

$$\alpha = arcsin\alpha \frac{m2 \cdot g \cdot b \cdot cos\alpha - m1 \cdot g \cdot a \cdot cos\alpha}{(m1 \cdot a^2 + m2 \cdot b^2)\omega 2} = g \cdot \cot\alpha \frac{m2 \cdot b - m1 \cdot a}{(m1 \cdot a^2 + m2 \cdot b^2)\omega 2} \quad (4.25)$$

Необходимо определить, при какой частоте вращения начнет выполняться уравнение (4.23), т.е проекция силы тяжести и сила инерции центростремительной силы равны ($F_{тяж}=F_{ц}$) при массе противовеса m_1 и расстоянии до оси мешалки a.

С целью определения оптимальных параметров противовеса (m_1, a) для стабилизации работы мешалки и предотвращения неконтролируемого подъёма

лопастей провели анализ для предложенного оригинального аппарата. На представленном графике (рисунок 45) изображена зависимость координаты (ось x), характеризующей угол наклона лопастей при вариациях массы противовеса m_1 (0 – 400 кг).

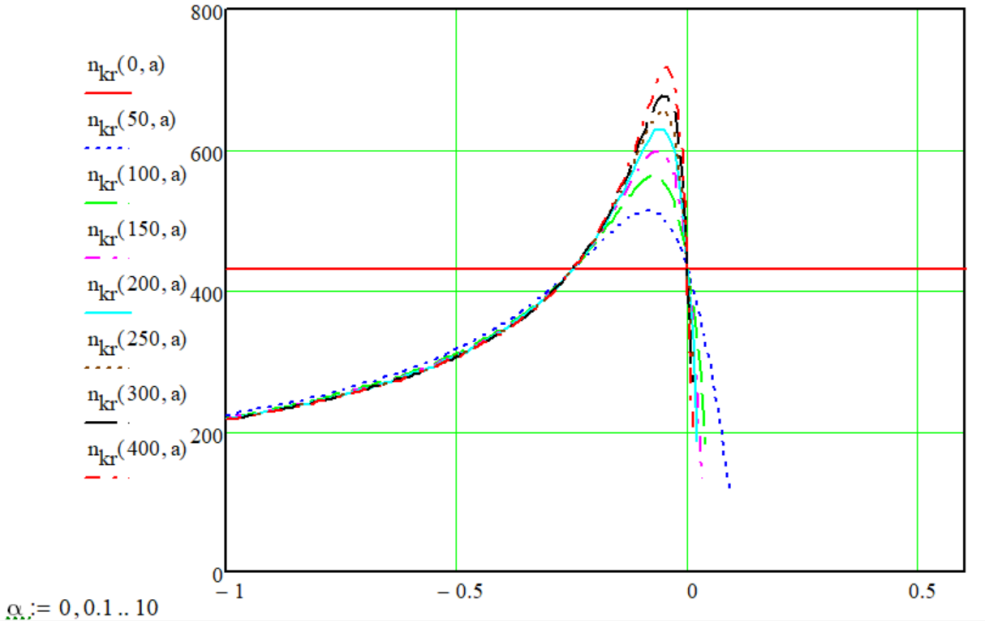


Рисунок 45 – Зависимость угла наклона лопастей мешалки от критической частоты вращения

На графике (рисунок 45) видно, что в области отрицательных значений координат ($x < 0$) линии зависимостей имеют горизонтальный характер, то есть его значение постоянно и не изменяется при варьировании координаты x. В рассматриваемом режиме работы лопасти мешалки демонстрируют пониженную склонность к вертикальному подъёму. При этом критическая частота вращения сохраняет стабильное значение во всем диапазоне исследуемых масс противовеса m.

Для положительных значений x ($x > 0$) характерно расхождение линий зависимости, указывающее на высокую чувствительность критической частоты вращения $\omega_{кр}$ к вариации координаты x. Увеличение массы противовеса m_1 приводит к снижению критической частоты вращения $\omega_{кр}$. Данный эффект объясняется возрастанием центробежных сил, способствующих подъему лопастей. Размещение противовеса на противоположной стороне позволяет компенсировать дисбаланс системы. Это

вызывает смещение рабочей точки в область $x < 0$, благодаря чему снижается вибрация и уменьшается нагрузка на вал. Для данного типа аппарата такая установка обеспечивает возможность регулирования критической частоты вращения $\omega_{кр}$, но требует точного подбора массы противовеса m_1 для достижения нужной частоты вращения n.

Практическое значение для аппарата при заданных характеристиках, таких как масса лопастей мешалки $m_1 = 100$ кг и $m_2 = 200$ кг; расстоянии, на котором находится центр-масс мешалки a = 0,150 м и b = 0,25 м от оси без противовеса, наблюдается уменьшение угла наклона α и снижение критической скорости по сравнению с угловой скоростью $\omega_{кр} < \omega^2$. Для повышения частоты вращения мешалки следует уменьшить массу противовеса. Установка противовеса с противоположно стороны для данного типа аппарата обеспечивает возможность варьирования частоты вращения мешалки $\omega_{кр}$ и угла наклона α лопастей.

Построение графической зависимости (рисунок 45), отражающей связь между критической частотой вращения $\omega_{кр}$, координатой, характеризующей угол наклона лопастей α и массой противовеса m_1, стало ключевым этапом в разработке *Методики определения режимов функционирования рекомендованного аппарата.*

С использованием разработанной номограммы (рисунок 46) для желаемого угла наклона $\alpha_{ж}$ и выбранного рационального вылета b выполняются определения соответствующих значений расстояния a от шарнира до точки крепления противовеса и необходимой массы противовеса m_1.

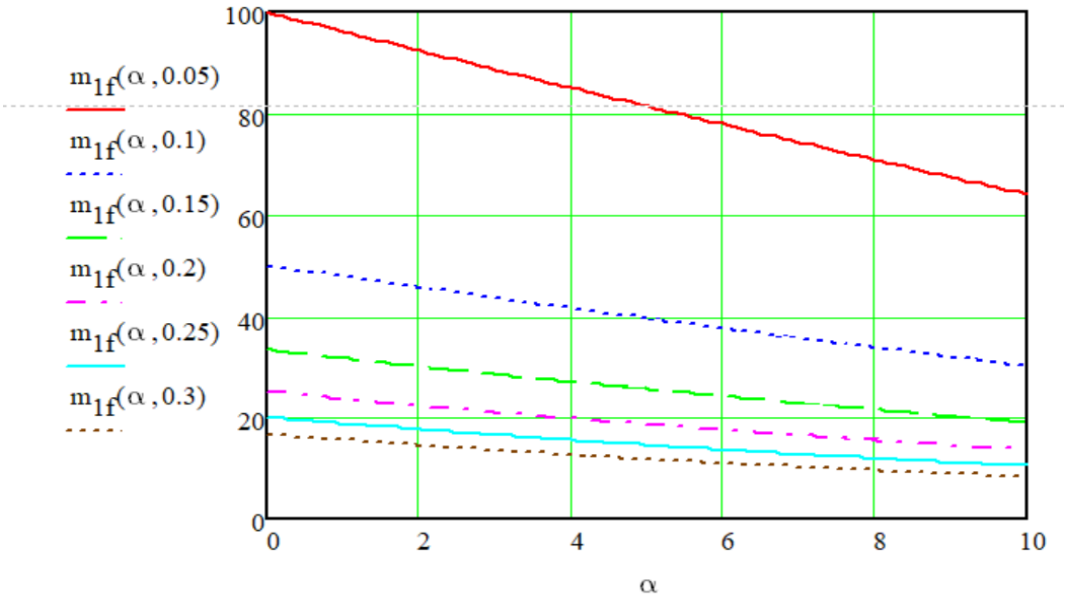


Рисунок 46 – Номограмма зависимости массы противовеса от угла наклона лопастей и расстояния центр-масс мешалки

Уравнение

$$m_{1f}(\alpha, a) = \frac{m_2 \cdot b \cdot g - m_2 \cdot b^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)}{a \cdot g + a^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)} \quad (4.26),$$

где $m_1(\alpha, a)$ — искомая масса противовеса, расположенного на расстоянии a от оси (м); m_2 — известная (заданная) масса нагрузки на другом радиусе b, кг; a — плечи (вылет), м; выбранный рациональный вылет b, м; n — частота вращения, об/мин; $\omega^2 = 2\pi \cdot n/60$ — угловая скорость, рад/с; α — угол наклона , °.

Уравнение (4.27) — вычисление рабочего угла $\alpha_{раб}$ наклона лопасти мешалки:

$$\alpha_r(n, m_1) = \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{g \cdot (m_2 \cdot b - m_1 \cdot a)}{4 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot (m_1 \cdot a^2 + m_2 \cdot b^2)}\right) \quad (4.27)$$

Методика определения режимов функционирования рекомендованного аппарата.

1. Согласно номограмме (рисунок 46) для желаемого рабочего угла наклона лопастей мешалки $\alpha_{ж}$ и заданного рационального вылета b находим рекомендуемую массу противовеса m_1 и расстояние от центра шарнира (вылет) a. Масса противовеса подбирается так, чтобы уравновесить дисбаланс,

возникающий из-за наклона лопастей.

2. Согласно графику (рисунок 45) находим критическую частоту вращения мешалки $\omega_{кр}$ с учетом желаемого угла наклона $\alpha_{ж}$, вылета a и массы противовеса m_1:

2.1 Найти на графике точку, соответствующую желаемому углу наклона $\alpha_{ж}$

2.2 Определить на этой точке значение критической частоты вращения для заданной массы противовеса $\omega_{кр}$

3. Записать рабочую частоту вращения $n_{\text{р}}$ мешалки согласно оптимизационному расчету. Используя график (рисунок 47) провести сравнение:

3.1 рабочий угол при частоте вращения $n_{раб}$ менее или равен желаемому $\alpha_{\text{р}} \leq \alpha_{ж}$;

3.2 критическая частота меньше рабочей $n_{\text{кр}} \leq n_{\text{р}}$.

Условие 3.1 и 3.2 выполняется – аппарат работает в безопасном режиме (за критической зоной), риск резонанса отсутствует.

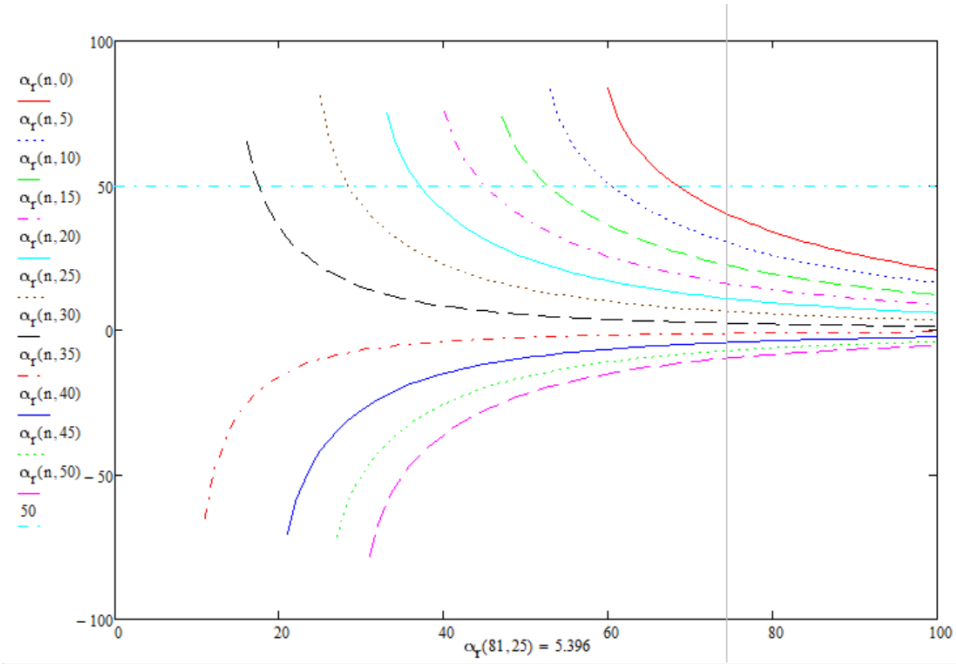


Рисунок 47 – Номограмма зависимости рабочего угла от критической частоты вращения и массы противовеса

Пример расчета режимных параметров по Методике:

Исходные данные:

- Желаемый рабочий угол наклона: $\alpha_ж = 6°$;
- Вылет $a = 0{,}15$ м.

Расчёт:

1. По номограмме (рисунок 46) для $\alpha_ж = 6°$ и $a = 0{,}15$ м находим массу противовеса: $m_1 = 25$ кг.

2. По графику (рисунок 45) для заданного $\alpha_н = 50°$ и $m = 25$ кг определяем критическую частоту вращения: $n_{кр} = 31$ об/мин.

3. Задаём рабочую частоту вращения по результатам оптимизационного расчёта: $n_р = 81$ об/мин.

4. Проверяем условия по графику (рисунок 47):

- Рабочий угол при $n_р$: $\alpha_р = 5{,}4°$;
- $\alpha_р = 5{,}4° \leq \alpha_ж = 6°$ — условие 3.1 выполняется;
- $n_{к\,р} = 31$об/мин $\leq n_р = 81$об/мин — условие 3.2 выполняется.

Вывод: оба условия выполнены. Аппарат работает в безопасном режиме, риск резонанса отсутствует.

Исходя из предоставленных данных, можно проанализировать работу аппарата и рассчитать параметры, связанные с его функционированием [122].

Результат исследования: установленные рабочие характеристики оригинального лопастного перемешивающего устройства приведены в табл. 8:

Таблица 8 – Итоговые параметры работы аппарата

Параметр	Значение	Единицы измерения	Примечание
Диаметр аппарата, D	1,2	м	По ГОСТ 9931-85
Диаметр мешалки, $d_м$	0,6	м	$d_м = 0{,}5D$
Желаемый угол наклона, $\alpha_ж$	6	∘	Технологическое требование
Рабочий угол наклона, $\alpha_р$	5,4	∘	При $n_р$=81 об/мин

Окончание таблицы 8

Масса противовеса, m_1	25	кг	По номограмме
Вылет противовеса, a	0,15	м	Задано
Критическая частота, $n_{кр}$	31	об/мин	Расчет
Рабочая частота, $n_р$	81	об/мин	Оптимизационный расчёт

Рассчитанные параметры обеспечивают более интенсивный массоперенос, минимизируя застойные зоны в реакционном объеме аппарата, увеличивают поверхность контакта фаз, повысив при этом эффективность степени очистки отработанного масла в целом.

Для малых частот вращения вала привода мешалки предусмотрен механический привод подъема лопастей, т.к. реализовать это в автоматическом режиме не представляется возможным из-за низкого значения центробежной силы.

Выводы:

1. Ключевым преимуществом разработанного аппарата является совмещение в едином технологическом объёме стадий адсорбционно-щелочной регенерации турбинного масла и отделения отработанного комплексного поглотителя, что существенно повышает технологичность процесса [127].

2. С помощью разработанной методики определения режимов функционирования аппарата для регенерации рассчитаны основные конструктивные и режимные параметры аппарата, включая: критическую частоту вращения 31 об/мин, угол наклона лопастей в рабочем положении 5.4°, масса 25 кг и вылет противовеса 0,15 м.

3. Номограммы служат инструментом для оперативного подбора параметров противовеса в зависимости от угла наклона оси мешалки, что обеспечивает равновесие системы и компенсирует дисбаланс, обусловленный наклоном оси.

4. На основании графика (рисунок 45) установлена зависимость

критической частоты вращении мешалки от начального угла наклона оси и массы противовеса, что обеспечивает корректную настройку режимов работы мешалки.

5. Используя номограмму (рис 47), проведено сравнение рабочей частоты вращения и критической. Установлено, что выполняется условие при допустимом рабочем угле наклона, что гарантирует работу аппарата вне резонансной зоны и обеспечивает стабильность процесса перемешивания.

6. При расчётном оптимальном режиме функционирования аппарата привод лопастей принят механическим, обеспечивающим стабильную реализацию заданных гидродинамических условий. При изменении технологических требований (например, при необходимости работы на иных диапазонах частот вращения) предложенная методика расчёта режимных параметров остаётся применимой: Она позволяет оперативно скорректировать массу и вылет противовеса, а также назначить рабочую частоту вращения с обеспечением работы вне резонансной зоны. Таким образом, конструкция аппарата и разработанная методика обеспечивают гибкость настройки под различные эксплуатационные условия при сохранении высокой эффективности очистки масла.

4.8 Выводы по главе 4

1) На основе уравнения Щукарева разработано математическое описание кинетики массообмена процесса регенерации отработанного масла в емкостном аппарате, позволившее рассчитать кинетические параметры процесса. Для учета влияния концентрации гидроксида калия в составе комплексного поглотителя предложено модифицированное критериальное уравнение вида: $Sh = 0{,}0052 \cdot Re_{ц}^{0{,}808 \cdot} Sc^{0{,}038}(1 + 1{,}429C^{0{,}104})$, коэффициенты которого определены на основе анализа экспериментальных данных.

3) Подтверждена адекватность разработанного математического описания сравнением расчетных и экспериментальных данных. Это позволило

использовать обобщённое критериальное уравнение для процесса конвективного масопереноса. Расхождение между рассчитанными по уравнению (4.12) значениями и экспериментальными данными составило 8,7%. Полученное критериальное уравнение рекомендуется использовать для расчета эффективного коэффициента массоотдачи β при конвективном массообмене.

4) Предложена конструкция аппарата (Патент № 2870092 РФ), обеспечивающая реализацию совмещенного процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом и последующего отделения отработанного комплексного поглотителя; разработана инженерная методика расчета рабочих характеристик оригинального лопастного перемешивающего устройства с механическим приводом поднятия лопастей и определены их параметры: диаметр мешалки 0,6 м, рабочий угол подъема лопасти мешалки 5,4°, масса противовеса 25 кг, вылет противовеса 0,15 м.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана эффективная методика проведения экспериментальных исследований с целью установления влияния параметров процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С (концентрации гидроксида калия в комплексном поглотителе, температуры, времени реализации процесса и гидродинамических параметров) на его кинетику, реализация которой сократила время экспериментального исследования и общее количество экспериментов.

2. Проведен анализ экспериментальных данных, позволивший оценить значение энергии активации процесса ($E_a = 6{,}68$ кДж/моль) и температурного коэффициента скорости химической реакции ($k_t = 1{,}095$). Установленные особенности влияния гидродинамических условий на процесс регенерации турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом показали, что в исследуемом диапазоне параметров процесс протекает во внешнедиффузионной области контроля.

3. В результате анализа массообменного процесса при регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом установлен вид критериального уравнения, а обработка экспериментальных данных определила численные значения коэффициентов полученного критериального уравнения: $\mathrm{Sh} = 0{,}0052\mathrm{Re}_{ц}^{0{,}808}\mathrm{Sc}^{0{,}038}$.

4. Проведена модификация критериального уравнения, учитывающая влияние концентрации гидроксида калия в составе комплексного поглотителя на кинетику процесса регенерации турбинного масла. В результате обработки экспериментальных данных определены значения коэффициентов модифицированного критериального уравнения: $\mathrm{Sh} = 0{,}0052\mathrm{Re}_{ц}^{0{,}808}\mathrm{Sc}^{0{,}038}(1+1{,}429\,C^{0{,}104})$.

5. Поставлена и решена оптимизационная задача расчета конструктивных (объем, диаметр и высота аппарата) и режимных (время процесса, частота вращения мешалки и концентрация гидроксида калия)

параметров процесса регенерации, позволяющая реализовать процесс при минимальном значении суммы капитальных и эксплуатационных затрат за весь срок эксплуатации. Рекомендована реализация процесса регенерации отработанного масла при следующих параметрах: объем аппарата $V_а$ = 3,2 м^3, диаметр аппарата $D_а$ = 1,4 м; высота цилиндрической части аппарата $H_{ац}$ = 1,5 м; время процесса регенерации $\tau_{пр}$ = 9,7 часа, концентрация гидроксида калия в комплексном поглотителе C = 0,124 % масс., частота вращения механического перемешивающего устройства $n = 2{,}13$ мин$^{-1}$. Разработаны и переданы для внедрения эскизный проект и химико-технологическая схема усовершенствованного процесса регенерации отработанного масла ТП-22С.

6. Разработана оригинальная конструкция аппарата для регенерации турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя на основе цеолита NaX, содержащего на поверхности гидроксид калия. Разработана инженерная методика расчета основных конструктивных параметров оригинального лопастного перемешивающего устройства с механическим приводом поднятия лопастей и определены их оптимальные значения: диаметр аппарата 1,4 м; высота цилиндрической обечайки регенерационной части 1,5 м; диаметр мешалки 0,6 м; начальный угол установки лопасти 50° относительно горизонтали; рабочий угол подъема лопасти мешалки 5,4°; масса противовеса 25 кг, вылет противовеса 0,15 м.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$V_а$ – объем аппарата, м^3;

$V_{сут}$ – суточный объем отработанного турбинного масла, м^3;

$\tau_{пр}$ – продолжительность цикла очистки до достижения нормативных показателей, с;

$\tau_{сут}$ – суточный фонд времени, с;

z – запас производительности на случай непредвиденного выхода аппарата из строя;

φ_* – коэффициент верхнего заполнения аппарата;

Э – эксплуатационные затраты за весь срок работы, руб;

К – капитальные затраты, зависящие от объема спроектированного аппарата, руб;

$H_{ац}$ – высота цилиндрической части аппарата, м;

$D_а$ – диаметр аппарата, м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маколова, Л.В. Методология развития бизнес-процесса отработанных продуктов Класса L (Смазочные материалы, индустриальные масла и родственные продукты): монография / Л.В. Маколова. – Ростов н/Д.: РГАСХМ, 2002. – 213 с.

2. Otchet kompanii Kline «Mirovoi rynok smazochnykh materialov: analiz rynka i ego vozmozhnosti» [Global Lubricant: Market Analysis and Opportunities]. Materialy Ezhegodnoi mezhdunarodnoi konferentsii «Masla i topliva SNG II». – 27.05.2014. Moscow, Russia. – 55 c.

3. Милованов, А.В. Топливо и смазочные материалы: учебное пособие/ А.В. Милованов, С.М. Ведищев. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 80 с.

4. Попова, К.А. Влияние присадок на физико-химические свойства масел для газотурбинных двигателей / К.А. Попова / Norwegian Journal of development of the International Science. — № 91/2022. — С. 3 – 8.

5. Мукамбеткалиева, А.Н., Ахметжан, С.З. Исследование физико-химических свойств отработанных моторных масел / А.Н. Мукамбеткалиева, С.З. Ахметжан // Научно-технические проблемы развития систем газоэнергоснабжения. – г.Уральск, 2023. – С. 67 – 71.

6. Rukhov, A.V. Modern methods for synthesis of few-layer graphene structures by electrochemical exfoliation of graphite / A. Rukhov, E. Bakunin, E. Obrazcova // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – 10 (2). – P. 249 - 255.

7. Рухов, А.В. Разработка консистентного смазочного материала с улучшенными характеристиками на основе отработанных моторных масел / А.В. Рухов // Вестник ТГТУ, Тамбов, 2020. – № 10 – С.156–161.

8. Еуров, Д.А Увеличение пористости частиц кремнезема путем уменьшения толщины стенок наноканалов и формирования дополнительной системы микропор / Еуров Д.А., Кириленко Д.А., Томкович М.В., Яговкина

М.А., Курдюков Д.А.// Неорганические материалы. СПб. – 2022. –Т. 58. № 12. – С. 1404-1412.

9. Кламанн, Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты. Пер. с англ. / Под ред. Ю.С. Заславского. – М.: Химия, 1988. – 488 с.

10. Пшениснов, Н.А. О чистоте турбинного масла / Н.А. Пшениснов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. №8 (773). – С. 94–103.

11. Письменко, В.Т. Коллоидная химия: методические указания / В.Т. Письменко, Е.Н. Калюкова. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 72 с.

12. Шевченко, А.А. Использование отходов производства в качестве адсорбентов для регенерации отработанных масел / А.А. Шевченко, О.К. Семакина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 130-летию академика М. А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. – 2013. – С. 191–193.

13. Осинцев К.В., Пшениснов Н.А., Пшениснов А.И. Процессы загрязнения и очистки турбинного масла в системах смазки паровых турбин / К.В. Осинцев, Н.А. Пшениснов, А.И. Пшениснов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2022, Т.22, № 3, – С. 83–89.

14. Прозорова, И.В., Рябов, А.Ю., Очередько, А.Н., Применение продукта окисления бензола в составе присадки ингибирующего действия для парафинистых и высокопарафинистых нефтей / А.В Лещик, И.В Прозорова, А.Ю. Рябов., А.Н Очередько, Н.В Юдина, С.В Кудряшов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2023. Т. 31. № 2. – С. 216–219.

15. Литвинец И.В. Влияние ингибирующих присадок на процесс образования асфальтосмолопарафиновых отложений нефтяных дисперсных систем : автореферат диссертации к.х.н: 02.00.13 / И.В. Литвинец. – Томск, 2015. – 23 с.

16. Турбинные масла: характеристики, классификация и применение – [Электронный ресурс]. – URL: http://fb.ru/article/265016/turbinnyie-masla harakteristiki-klassifikatsiya-i-primenenie (дата обращения: 27.12.2024).

17. ТУ 38.101821-2001 Масла турбинные ТП-22С. Технические условия (с изм. 1-27). — М.: ОАО «ВНИИНП», 2001.

18. Соколов, Н.В., Хадиев, М.Б.Влияние вязкости смазки на работу упорного подшипника скольжения / Н.В Соколов, М.Б Хадиев, П.Е Федотов, Федотов, Е.М. Федотов //Математические методы в технологиях и технике. – 2022. № 3. – С. 88–94.

19. Buzauova T., Bussurmanova A., Yengbek, D. Investigation into the impact of cutting modes on surface roughness during machining gray cast iron on a cnc lathe / T. Buzauova, A. Bussurmanova, D. Yengbek // Труды университета. – 2024. № 4 (97). – С. 64–71.

20. Саториус, В.В., Корнеев, С.В., Бакулина, В.Д. Влияние вязкости на низкотемпературные свойства моторных масел / В.В Саториус, С.В Корнеев, В.Д. Бакулина // Динамика систем, механизмов и машин. – 2022. Т. 10. № 4. – С. 44–46.

21. Ширкунов, А.С., Рябов, В.Г., Бондарев, А.В. Оценка влияния группового химического состава на индексы вязкости базовых масел / А.С. Ширкунов, В.Г. Рябов, А.В. Бондарев, П.В. Бакулев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2012. – № 13. – С. 97–104.

22. Гришин, П.Ф Окислительная стабильность гидрокрекинговых базовых масел и способы ее повышения / Гришин П.Ф., Ермак А.А. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 3. – С. 80–85.

23. Турбинные масла: основные характеристики, применяемое оборудование [Электронный ресурс]. – URL: https://www.npo64.ru/turbinnoe-maslo (дата обращения: 27.12.2023).

24. Маркова, Л.В., Макаренко, В.М., Семенюк, М.С., Зозуля, А.П.

Оперативный контроль вязкости смазочных масел / Маркова Л.В., Макаренко В.М., Семенюк М.С., Зозуля А.П. // Трение и износ. – 2010. –Т. 31. № 6. – С. 569–581.

25. Черножуков, Н.И. Значение химического состава масел в практике их производства и эксплуатации / Н.И. Черножуков // кн. "Химический состав и эксплуатационные свойства масел". – М.: НГТЛ. – 1957. – С. 5–24.

26. Чураев, Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в капиллярно–пористых телах / Н.В. Чураев – М: Химия, 1990. – 272 с.

27. Черножуков, Н.И. Химия минеральных масел / Н.И. Черножуков, С.Э. Крейн, Б.В. Лосиков. — 2-е изд., перераб. — Москва: Гостоптехиздат, 1959. — 416 с.

28. Панков, Ю.В., Новопашин, Л.А., Садов, А.А., Денежко, Л.В. Исследования образования форм нагара характерногои при работе на дизельном топливе или рапсовом масле / Ю.В. Панков, Л.А. Новопашин, А.А.Садов, Л.В. Денежко // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2021. — № 4 (12). — С. 39–46.

29. Боровик, С.Ю. Влияние скорости потока масла на результат обнаружения частиц износа пар трения в системах смазки силовых установок / С.Ю. Боровик, О.А. Заякин, П.Е. Подлипнов, Ю.Н. Секисов // Автометрия. — 2022. — Т. 58. № 4. — С. 39–49.

30. Титов И.В. Очистка топлив от эмульгированной воды методом фильтрации / И.В. Титов, К.В. Рыбаков // Труды семинара по очистке воздуха, масла и топлива с целью увеличения долговечности двигателей: Сборник статей. – М. : ОНТИ НАМИ, 1969. – Т. 9. – Вып. 9. – С. 9–16.

31. СТО 70238424.27.100.053-2013 Энергетические масла и маслохозяйства электрических станций и сетей. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. НП «ИНВЭЛ». – URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293784/4293784229.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

32. Патент № 2356028 C1 Российская Федерация, МПК G01N 15/02,

G01N 15/06. Устройство для экспресс-анализа промышленной чистоты жидкостей / В.А. Бухалов, Е.В. Лесников, Ф. Ф. Стуканов. — заявл. 27.05.2008: опубл. 20.05.2009 .

33. Маркин, И.Н. Стратегии эксплуатации и организации системы технического обслуживания и ремонта сложных технических систем / И.Н Маркин // Наука и техника транспорта. — 2016. № 3. — С. 53-55.

34. Ровенских, А.С. Исследование влияния температуры на вязкостные характеристики смазочных материалов / А.С. Ровенских, Е.Г. Шубенкова, В.А. Игуминова, А.Е. Карючина. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2019. — № 49 (287). — С. 202-206. — URL: https://moluch.ru/archive/287/64969/ (дата обращения: 12.06.2024).

35. Пшениснов, Н.А. Влияние процессов загрязнения и очистки на характеристики турбинного масла в системах маслоснабжения турбоагрегатов: дисс. канд. тех. Наук: 2.4.7 / Н.А. Пшениснов; Южно-уральский государственный университет. – Челябинск. – 2024. – С. 82 – 86.

36. Утаев С.А. Закономерности накопления загрязняющих примесей моторных масел в процессе эксплуатации двигателей современные материалы, техника и технологии. – 2016. – № 2 (5). – С. 207–213.

37. **Chernikova, O.V.** Technology development of the complex adsorption-alkaline purification of waste oil of the TP-22C brand / **O.V. Chernikova** // Мир науки без границ: материалы 9-й всероссийской науч.-практ. конференции молодых учёных, Тамбовский государственный технический университет, 11 февраля 2022 года. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. - 1 CD-ROM. – С. 126-130.

38. Осинцев, К.В. Анализ эффективности очистки турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов и модификация рамных фильтров / К.В. Осинцев, Н.А. Пшениснов, А.И. Пшениснов // Энергетик. – 2022. – № 11. – С. 45– 49.

39. Магеррамов А.М. Нефтехимия и нефтепереработка: учебник для высших учебных заведений / А.М. Магеррамов. – Баку: Бакы Университети,

2009. – 660 с.

40. Осинцев К.В. Процессы загрязнения и очистки турбинного масла в системах смазки паровых турбин / К.В. Осинцев, Н.А. Пшениснов, А.И. Пшениснов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 83– 89.

41. Осинцев К.В. Эффективность многоступенчатого фильтрования турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов / К.В. Осинцев, Н.А. Пшениснов // Теплоэнергетика. – 2023. – № 9. – С. 28–34.

42. Петриченко А.Д. Качество нефтяного турбинного масла и надежность работы систем регулирования и смазки турбоагрегатов / А.Д. Петриченко, В.В. Вакуров // Электрические станции. – 1991. – № 10. – С. 18–22.

43. Цветков, Ю.Н. Природа вязкостно-температурной зависимости смазочных масел / Ю.Н. Цветков, М.Ю. Власов, Л.И. Дехтярь // Вестник ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. – С.1242 – 1251.

44. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле / перевод с англ.инж.В.А. Боролина; под ред. д.т.н В.К. Житомирского. — М.: Машгиз, 1962. — 296 с.

45. Семенидо, Е.Г. Моторные, реактивные и ракетные топлива. / Е.Г. Семенидо, К.К. Папок // 4-е переработанное и дополненное издание. — М.: Гостоптехиздат, 1962. — 427 с.

46. Haj-Kacem, R.B. Contribution to modeling the viscosity Arrhenius-type equation for some solvents by statistical correlations analysis / R.B. Haj-Kacem, N. Ouerfelli, J.V. Herráez, M. Guettari, H. Hamda, M. Dallel // Fluid Phase Equilibria. — 2014. — Vol. 383. — Pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.fluid.2014.09.023.

47. Messaâdi, A.A. New Equation Relating the Viscosity Arrhenius Temperature and the Activation Energy for Some Newtonian Classical Solvents / A. Messaâdi, N. Dhouibi, H. Hamda, F.B. M. Belgacem, Y.H. Adbelkader, N. Ouerfelli, A. H. Hamzaoui // Journal of Chemistry. — 2015. — Vol. 2015. DOI:

10.1155/2015/163262.

48. Романков, П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии: Сер. «Процессы и аппараты хим. и нефтехим. технологии» / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. – 3-е изд., перераб. – Л. : Химия Ленингр. отд-ние, 1982. – 287 с.

49. Венцель, С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. — Москва: Издательство Химия, 1979. – 267 с.

50. Морозов, Г.А. Применение дизельных масел с присадками / Г.А. Морозов . —Л. Гостоптехиздат, 1962. — 114 с.

51. Rybakov, K.V., Kovalenko, V.P. Fil'trovanie aviatsionnykh masel i spetsial'nykh zhidkostey [Filtration of aviation oils and special liquids] / K.V Rybakov, V.P. Kovalenko // Moscow: Transport; 1977. — 188 p.

52. Muzykin A.D., Popova I.M. [Removing air bubbles from liquids using meshes] / A.D. Muzykin, I.M. Popova // Vestnik mashinostroeniya. [Bulletin of mechanical engineering]. — 1982;(4).- P. 12-15.

53. Johnson M., Livingstone G., Identifying varnish and oxidation precursors in lubricant sumps / M. Johnson, G., Livingstone // Tribology and Lubrication Technology. 2011;67(4) - P. 2–7.

54. Konovalov V.M., Skritsky V.Y., Rokshevsky V.A. Ochistka rabochikh zhidkostey v gidroprivodakh stankov [Purification of working fluids in hydraulic drives of machine tools] / V.M. Konovalov, V.Y Skritsky, V.A. Rokshevsky. // Moscow: Mashinostroenie; 1976. – 261 p.

55. Yano, A., Watanabe, S., Miyazaki, Y., Tsuchiya, M., Yamamoto, Y. Study on sludge formation during the oxidation process of turbine oils / A.Yano, S. Watanabe, Y Miyazaki, M. Tsuchiya, Y Yamamoto // Tribology Transactions. 2004;47(1) - P. 111–122. DOI: 10.1080/05698190490278985.

56. Levich, V.P. Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika [Physical and chemical hydrodynamics] / V.P Levich — Moscow: Fizmatgiz; 1959. – 240 p.

57. Yang, K., Qiu, Y., Song, P., Yan, X.P., Zhou, X.C., Chen, Y. Multi-

parameter prediction modeling for analyzing the trend of turbine oil online monitoring parameters / K. Yang, Y. Qiu, P. Song, X.P Yan., X.C. Zhou., Y. Chen // In: Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2014 Hunan); 2014.- P. 301–304. DOI: 10.1109/PHM.2014.6988183.

58. Субочева, М.Ю. Химическая технология органических веществ: учебное пособие / М.Ю. Субочева, А.П. Ликсутина, М.А. Колмакова, А.А. Дегтярев. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – Ч. 3. – 80 с.

59. Патент РФ № 2614244 С1. Способ очистки отработанных минеральных моторных масел / В.В. Остриков, Д.И. Афанасьев, В.Ф. Кругов, С.Н. Сазонов; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. — Опубл.24.03.2017. — Бюл. № 9.

60. Семёнов, Н.Н. Цепные реакции: монография / Н.Н. Семенов; Госхимтехиздат, 1986. — 535 с.

61. Семенов, Н.Н. Самовоспламенение и цепные реакции / Н.Н. Семенов; Госхимтехиздат. Л. – 1934. – С. 214–229.

62. Липштейн, Р.А. Трансформаторное масло/ Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович // 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1983. — С. 90–95.

63. РД 34.43.102-96. Инструкция по эксплуатации нефтяных турбинных масел. /утв. Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС России» 28.06.1996; разраб.: ВТИ, АО «Фирма ОРГРЭС». — М.: ВТИ, 1997.

64. Патент РФ № 2219226 С1. Способ регенерации отработанного турбинного масла / А.П. Савостьянов, В.Г. Бакун, С.В. Пугачева, В.А. Таранушич; заявитель и патентообладатель Южно-российский гос.техн.унив. — Опубл. 20.12.2003. — Бюл. № 36.

65. Спиркин, В.Г. Химмотология. Свойства и применение топлив, смазочных и специальных материалов. Часть II. Свойства и применение смазочных и специальных материалов/ В.Г. Спиркин, И.Г. Фукс, И.Р Татур, Д.В. Шуварин// уч. пособие (Под ред. В.Г. Спиркина, В.Л. Лашхи). — Москва: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. — 2014. —271 с.

66. Программа мероприятий, направленных на повышение уровня эксплуатации, совершенствования методов испытаний и контроля качества турбинных и трансформаторных масел, применяемых на АЭС: Сборник докладов 8-й международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетике» / В. А. Гашенко, Л.А. Галимова, Д.В. Курганов, Д.В. Шуварин. — М.: Изд-во НИИ, 2012. — 350 с.

67. Технологический регламент на эксплуатацию газокомпрессорной станции КС-28 Моршанское ЛПУМГ (Первомайский ПУ) (утв. 01 сентября 2025 г.). – ООО «Газпром трансгаз Москва». – 2025.

68. Guseinova, E.A. Adsorption purification of used industrial oil using natural aluminosilicates / E.A. Guseinova. — Bulletin of the Karaganda University. Chemistry Series. —2022. № 4 (108). — С. 162-170.

69. ГОСТ 21046-89. Нефтепродукты отработанные. Общие технические условия. – Введен 1989-01-01. - М.: Госстандарт России: Стандартинформ, 1989. – .6 с.

70. Выборнова, Т.С., Власова, Г.В., Пименов, Ю.Т Очистка минеральных и синтетических моторных масел от механических примесей посредством физических воздействий / Т.С. Выборнова, Г.В. Власова, Ю.Т. Пименов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2023. № 2. – С. 172–184.

71. Кича, Г.П., Воробьёв, Б.Н., Семенюк, Л.А. Комбинирование фильтрования и центрифугирования − эффективный метод полнопоточной тонкой очистки масла в двухконтурных системах смазки судовых дизелей / Г.П. Кича, Б.Н. Воробьёв, Л.А. Семенюк // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. № 4 – 5 (42). – С. 59 – 65.

72. Эркаева, Н.Ч., Ахмедов, А.Н. Исследование процесса фильтрации растительных масел // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2022. 1(94). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12970 (дата

обращения: 10.03.2026).

73. **Черникова, О.В.** Адсорбционно-щелочной метод регенерации смазочных масел на примере комплексной очистки отработанного турбинного масла/ **О.В. Черникова** // Актуальные аспекты научных исследований: Сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Москва, 30 июня 2023 года. – Москва: Цифровое научное издательство, 2023. – С. 19 – 30.

74. Дворецкий, С.И. К разработке методики расчета и прогнозирования эксплуатационных характеристик проектируемых гранулированных цеолитовых сорбентов / С.И. Дворецкий, А.А. Ермаков, А.С. Гурова // Вестник ТГТУ. – 2004. – Т. 10, №4а. – С. 1009–1026.

75. **Черникова, О.В** Теоретические основы динамики адсорбции. Транспорт в пористых телах синтетических сорбентов / **О.В. Черникова,** А.В. Рухов // Современные стратегии и цифровые трансформации устойчивого развития общества, образования и науки: Сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции. Москва, 15 мая 2024. – Москва: Издательство «Экономическое образование», 2024. – С. 278 – 283.

76. Онищук, А.Ю. Обоснование выбора растворителя для процесса селективной очистки масляных вакуумных дистиллятов / А.Ю. Онищук. – Вестник магистратуры. – 2018. № 12-4(87) – С.12–13.

77. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А. Н. Плановский, П. И. Николаев // М.: Химия, 1972. – 496 с.

78. Остриков, В.В., Кошелев, А.В., Забродская, А.В. Метод очистки промывочных масел с целью повторного использования в двигателях сельскохозяйственной техники / В.В. Остриков, А.В. Кошелев, А.В. Забродская // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. Т. 16. № 4 (79). – С. 102–109.

79. Маркелов, А.В. Калаева, С.З., Волков, Д.В. Технология экологически безопасной утилизации отработанных смазочных масел / А.В. Маркелов, С.З. Калаева, Д.В. Волков // Известия Самарского научного

центра Российской академии наук. – 2025. Т. 27. № 1 (123). – С. 185–191.

80. Машины и аппараты химических производств: Основы теории и расчета / И.И. Чернобыльский, А.Г. Бондарь, Б.А. Гаевский [и др.]; под ред. И.И. Чернобыльского. – М.; Киев: Машгиз. [Юж. отд-ние], 1959. – 464 с.

81. Долганов, А.В., Маркелов, А.В., Осадчий, Ю.П. Анализ оборудования для регенерации моторных масел / А.В. Долганов, А.В. Маркелов, Ю.П. Осадчий // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2020. № 1. – С. 181–183.

82. РД ЭО 1.1.2.05.0444-2016. Требования к эксплуатации, организации и проведению испытаний трансформаторных и турбинных масел на атомных станциях. Введ. 2016-11-14. – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2016.– 336 с.

83. Патент 2804769 Российская Федерация, МПК C10M 175/02 (2006.01) Способ регенерации отработанного турбинного масла/ Рухов А.В., Бакунин Е.С., **Черникова О.В.**, Образцова Е.Ю. , Полушкин Е.С., Аль-Амери С.Н.М., Истомин А.М. , Гончарова М.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2022127302 ; заявл. 20.10.2022 ; опубл. 05.10.2023, Бюл. № 28. – 6 с.

84. **Черникова, О.В.** Методика определения содержания эмульгированной воды в турбинном масле/ **О.В. Черникова** //«Eurasiascience»: LXV Международная научно-практическая конференция. Москва, 15 ноября 2024. – Научно-издательский центр «Актуальность. РФ», МГУ, Москва, 2024. – С. 42 – 45.

85. Руководящий документ РД 34.43.102-96 Инструкция по эксплуатации нефтяных турбинных масел (с Изменениями N 1, 2), 01.01.1997

86. ГОСТ 981-75. Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления. — Москва: Стандартинформ, 1976. – 12 с.

87. ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости. — Москва: Стандартинформ, 2017. — 24 с.

88. ГОСТ 2477-2014. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. — Москва : Стандартинформ, 2016. — 16 с.

89. ГОСТ 5985-2022. Нефтепродукты. Метод определения кислотности и кислотного числа. — Москва: Российский институт стандартизации, 2023. — 20 с.

90. ГОСТ 6370-2018. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. — Москва : Стандартинформ, 2019. — 12 с.

91. ГОСТ 17216-2001. Промышленная чистота. Классы чистоты жидкостей. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. — 8 с.

92. ГОСТ 4333-2014. Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле. — Москва : Стандартинформ, 2015. — 16 с.

93. ГОСТ 6307-75. Нефтепродукты. Метод определения наличия водорастворимых кислот и щелочей. — Москва: Изд-во стандартов, 1975. — 4 с.

94. СТО ГТМ 46/03-830-2018. Технические требования по эксплуатации маслохозяйств компрессорных станций. — Москва, 2018. — 32 с.

95. Адсорбционно-щелочной метод регенерации машинных масел на примере комплексной переработки отработанных синтетических моторных и турбинных масел / А.В. Рухов, А.Ю. Осетров, С.Н.М. Аль-амери, **О.В. Черникова**, А.В. Рухов, А.П. Спиридонова // Бутлеровские сообщения. — 2023. — Т. 73, № 3. — С. 46-53.- DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-3-46.

96. **Черникова, О.В.** Теоретические исследования эффективности очистки отработанного масла сорбентом при использовании перемешивающего устройства/ **О.В. Черникова** // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков: Сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции. Москва, 25 апреля 2024. – Москва: Издательство АНО ДПО «ЦРОН», 2024. – С. 239 – 244.

97. ГОСТ Р 58144-2018. Вода дистиллированная. Технические условия. — Введ. 2021-07-01. — Москва, Российский институт стандартизации, 2021. — 12 с.

98. ГОСТ 25336-82. Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры. — Введ. 1994-01-01. — Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1992. — 14 с.

99. Шашкин, П.И. Регенерация отработанных нефтяных масел: изд. 2-е, перераб. и доп. / П.И. Шашкин, И.В. Брай. — Москва, Химия, 1970. — 304 с.

100. СТО Газпром 2-3.5-454-2010. Правила эксплуатации магистральных газопроводов. — Введ. распоряжением ОАО «Газпром» от 24.05.2010 № 130. — Москва, 2010. — 86 с.

101. Метелица, А.А. Влияние металлов на процессы самоорганизации в смазочных материалах / А.А. Метелица, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. — 2013. — С. 226–228.

102. Кинетика адсорбционно-щелочной регенерации отработанного турбинного масла марки ТП-22С / **О.В. Черникова**, А. В. Рухов, Е. Ю. Образцова, Р. Ю. Павлинов. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2025. — Т. 31, № 1. — С. 129-137. — DOI: 10.17277/vestnik.2025.01.- Pp.129-137.

103. **Черникова, О.В.** Расчет кинетических параметров массопереноса в процессе перемешивания фаз/ **О.В. Черникова** // Современные исследования: теория, практика, результаты: Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. Москва, 15 февраля 2024. – Москва: Издательство АНО ДПО «ЦРОН», 2024. – С. 97 – 106.

104. Карпушкин, С.В. Расчёты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных ёмкостных аппаратов: учеб. Пособие / С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, А.Б. Борисенко; Тамбовский

государственный технический университет. — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. — 168 с.

105. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твёрдой фазой) / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов — Ленинград: Химия, 1990. — 384 с.

106. Патент РФ № 2078127 Способ очистки отработанного масла (C10M 175/02) / В.А. Гущин, В.В. Остриков, А.И. Гущина, С.В. Калюжный; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» ; заявл. 02.04.1990 ; опубл. 27.04.1997.

107. Бондаренко, А.А. Малогабаритные регенерационные установки: сбор и утилизация отработанных масел на производствах / А.А. Бондаренко, Д.А. Трухачев, И.Н. Маслов // Вода: химия и экология. — 2023. — № 6. — С. 30–35.

108. Дубинин, М.М. Адсорбция и пористость: учебное пособие / М.М. Дубинин; Военная Краснознамённая академия химической защиты им. маршала Советского Союза С.К. Тимошенко.— Москва: ВАХЗ, 1972.— 124 с.

109. Dubinin, M.M. Heterogeneous microporous structures and the adsorption properties of carbonaceous adsorbents / M.M. Dubinin, L.I. Kataeva, N S. Polyakov // Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Division of Chemical Science. — 1987. — Vol. 36, № 11. — P. 2234–2236.

110. Размахнин, К.К. Модификация свойств цеолитов с целью расширения областей их применения / К.К. Размахнин, А.Н. Хатькова // ГИАБ. — 2011. — № 4. — С. 246–252.

111. **Черникова, О.В**. Анализ примесей турбинного масла в процессе эксплуатации и его очистка с помощью синтетического сорбента / **О.В. Черникова** // Исследования и инновации: синергия знаний и практики: Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – Москва, 20 февраля 2025. – Москва: Издательство "Доброе слово и Ко", 2025. – С. 20 – 27.

112. **Черникова, О.В.** Определение устойчивости к окислению регенерированного турбинного масла с помощью адсорбционно-щелочного метода /**О.В. Черникова,** А.В. Рухов, // Научное обозрение: актуальные вопросы теории и практики: сборник статей V Международной научно-практической конференции. Т. 5, Пенза, 27 апреля 2023 года. – Пенза: Наука и просвещение, 2023.– С. 26 – 28.

113. Юлдашев, Х.М. Моделирование процесса отстаивания твёрдых частиц в прессовом хлопковом масле / Х.М. Юлдашев, О.Р. Абдурахмонов, Ж. Жумаев // Universum: технические науки. — 2024. — № 7-5 (124). — С. 11–16.

114. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 030/2012 «О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям» (принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 20 июля 2012 года № 59).

115. Инструкция по эксплуатации маслоочистительной машины ПСМ 2-4: утв. 12 января 2009 г. — Тамбовская область, р.п. Первомайский, 2009.

116. Паспорт безопасности химической продукции для масла турбинного ТП-22С, марка 1 (РПБ № 00149765.19.60796): от 19 февраля 2020 г.

117. ГОСТ Р 57703-2017. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Ликвидация отработанных нефтепродуктов. — Москва: Стандартинформ, 2017.

118. ПРД ГТМ 02/02-912-2024 «Порядок производственного экологического контроля ООО «Газпром трансгаз Москва» : утв. Приказом № 862 от 13 сентября 2024 г.

119. Рухов, А.В. Постановка и решение задачи оптимизации технологического параметра реактора синтеза углеродных нанотрубок / А.В. Рухов, А.А. Аладинский // Химическая промышленность. — 2014. — Т. 91, № 2. — С. 118–124.

120. Рухов, А.В. Модифицированное критериальное уравнение конвективной массоотдачи в процессе адсорбционно-щелочной регенерации турбинного масла / А.В. Рухов, **О.В. Черникова,** Е.Ю. Образцова //

Башкирский химический журнал.— 2025. — Т. 32, № 3 — С. 101 - 106. — DOI: 10.17122/bcj-2025-3-01-106.

121. Rukhov, A. V. Modified Criterion Equation of Convective Mass Transfer in the Process of Adsorption–Alkaline Regeneration of Turbine Oil / A. V. Rukhov, **O. V. Chernikova,** E. Y. Obraztsova. — Текст: непосредственный // THEORETICAL FOUNDATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING. — 2025. — Vol. 59, №. 5. — P. 1177-1182.- 10.1134/S0040579526600348.

122. Рухов, А.В. Процессы и реакционное оборудование производства углеродных наноматериалов / А.В. Рухов. — Москва: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2013. — 133 с.

123. Кожевникова, Л.В. Создание программного модуля для определения оптимального размера аппарата для перемешивания / Л.В. Кожевникова, В.Б. Кузнецов, С.О. Кожевников // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоёмкие технологии и материалы (SMARTEX). — 2021. — № 1. — С. 102–105.

124. Грачёв, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачёв, Ю.М. Плаксин. — Москва: ДеЛипринт, 2005. — 296 с.

125. Патент РФ № 99115454/04 Способ и установка для регенерации смазочных масел с высокими рабочими характеристиками / ДХАУАДИ Мохамед, УАЗЗАН Ашур, БУФАХЬЯ Мед Али, МЕЗИУ Салах; заявл. 1997.12.05; опубл. 2001.06.27.

126. **Черникова, О.В**. Постановка и решение задачи оптимизации технологических параметров процесса регенерации отработанных масел/ **О.В. Черникова** // Устойчивое развитие общества: новые научные подходы и исследования: Сборник материалов XXXII Международной научно-практической конференция**,** Москва, 10 июля 2026. – Издательство АНО ДПО «Университет ИТБО», Москва, 2026. – С. 99 – 103.

127. Патент 2870092 Российская Федерация МПК C10M 175/02 (2006.01), C11B 3/02 (20006.01). Аппарат для регенерации отработанных

машинных масел / Рухов А.В., **Черникова О.В.**, Бакунин Е.С., Истомин А.М., Образцова Е.Ю., Павлинов Р.Ю., Бакунин Н.С., Гончарова М.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2026103854 ; заявл. 12.02.2026 ; опубл. 15.09.2026, Бюл. № 26.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Патенты, полученные по результатам работы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 804 769**(13) **C1**

(51) МПК
C10M 175/02 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
C10M 175/02 (2023.08)

(21)(22) Заявка: **2022127302, 20.10.2022**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.10.2022

Дата регистрации:
05.10.2023

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **20.10.2022**

(45) Опубликовано: **05.10.2023** Бюл. № **28**

Адрес для переписки:
392000, г.Тамбов, ул. Советская, 106/5, помещ.2, ТГТУ, каб. 6, ВОИР, отдел патентования, Неверова Ольга Сергеевна, Неверова Светлана Юрьевна

(72) Автор(ы):
Рухов Артем Викторович (RU),
Бакунин Евгений Сергеевич (RU),
Черникова Ольга Вячеславовна (RU),
Образцова Елена Юрьевна (RU),
Полушкин Дмитрий Леонидович (RU),
Аль-Амери Саджа Нафеа Мохсин (RU),
Истомин Андрей Михайлович (RU),
Гончарова Мария Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тамбовский государственный технический университет" (ФГБОУ ВО "ТГТУ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2769605 C1, 04.04.2022. RU 2153526 C1, 27.07.2000. RU 2186096 C1, 27.07.2002. RU 2329084 C2, 20.07.2008. Н.С. ЗЕФИРОВ И ДР. ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ. ТОМ 5. НАУЧНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО: "БОЛЬШАЯ РОССИЙСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ". МОСКВА: 1998. CN 106669622 A, 17.05.2017.**

(54) **Способ регенерации отработанного турбинного масла**

(57) Реферат:

Настоящее изобретение относится к химической технологии переработки вышедших из строя в результате эксплуатации турбинных масел. Раскрывается способ регенерации отработанного турбинного масла путем его пропускания через слой адсорбента. При этом в качестве адсорбента используется цеолит NaX, на поверхность которого нанесен гидроксид калия. Скорость прохождения отработанного турбинного масла через слой адсорбента составляет от 1 до 2 м/ч. Техническим результатом настоящего изобретения является упрощение процесса очистки и, за счет применения модифицированного адсорбента, высокой степени очистки. 1 з.п. ф-лы, 6 пр.

RU 2804769 C1

RU 2804769 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 870 092**(13) **C1**

(51) МПК
C10M 175/02 (2006.01)
C11B 3/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
C10M 175/02 (2026.05); C11B 3/02 (2026.05)

(21)(22) Заявка: 2026103854, 12.02.2026

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.02.2026

Дата регистрации:
15.09.2026

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 12.02.2026

(45) Опубликовано: 15.09.2026 Бюл. № 26

Адрес для переписки:
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106/5, пом. 2, ФГБОУ ВО "ТГТУ", Кузнецовой М.С.

(72) Автор(ы):
Рухов Артем Викторович (RU),
Черникова Ольга Вячеславовна (RU),
Бакунин Евгений Сергеевич (RU),
Истомин Андрей Михайлович (RU),
Образцова Елена Юрьевна (RU),
Павлинов Роман Юрьевич (RU),
Бакунин Николай Сергеевич (RU),
Гончарова Мария Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тамбовский государственный технический университет" (ФГБОУ ВО "ТГТУ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2810056 C1, 21.12.2023. RU 2854760 C2, 16.01.2026. RU 2196810 C1, 20.01.2003. RU 191308 U1, 01.08.2019. CN 101608142 B, 02.01.2013. CN 209652267 U, 19.11.2019. CN 105602696 A, 25.05.2016.

(54) Аппарат для регенерации отработанных машинных масел

(57) Реферат:

Настоящее изобретение относится к химическому технологическому оборудованию для переработки потерявших свои свойства в результате эксплуатации машинных масел. Изобретение касается аппарата для регенерации отработанных машинных масел, который имеет цилиндрическую стальную обечайку эллиптическую крышку и днище, снабжен механическим перемешивающим устройством. Внутренний объем аппарата разделен на две части конической перегородкой, которая имеет донный клапан. В верхней части аппарата установлена лопастная мешалка, имеющая шарнирное крепление лопастей к ступице, которые в зависимости от частоты вращения вала привода мешалки могут изменять угол наклона относительно горизонтальной оси. В нижней части аппарата имеется горизонтальная фильтрующая перегородка и люк для извлечения отработанного регенерирующего вещества. Технический результат - повышение технологичности процесса регенерации и увеличение эффективности работы аппарата для регенерации машинных масел. 1 ил., 2 пр.

RU 2870092 C1

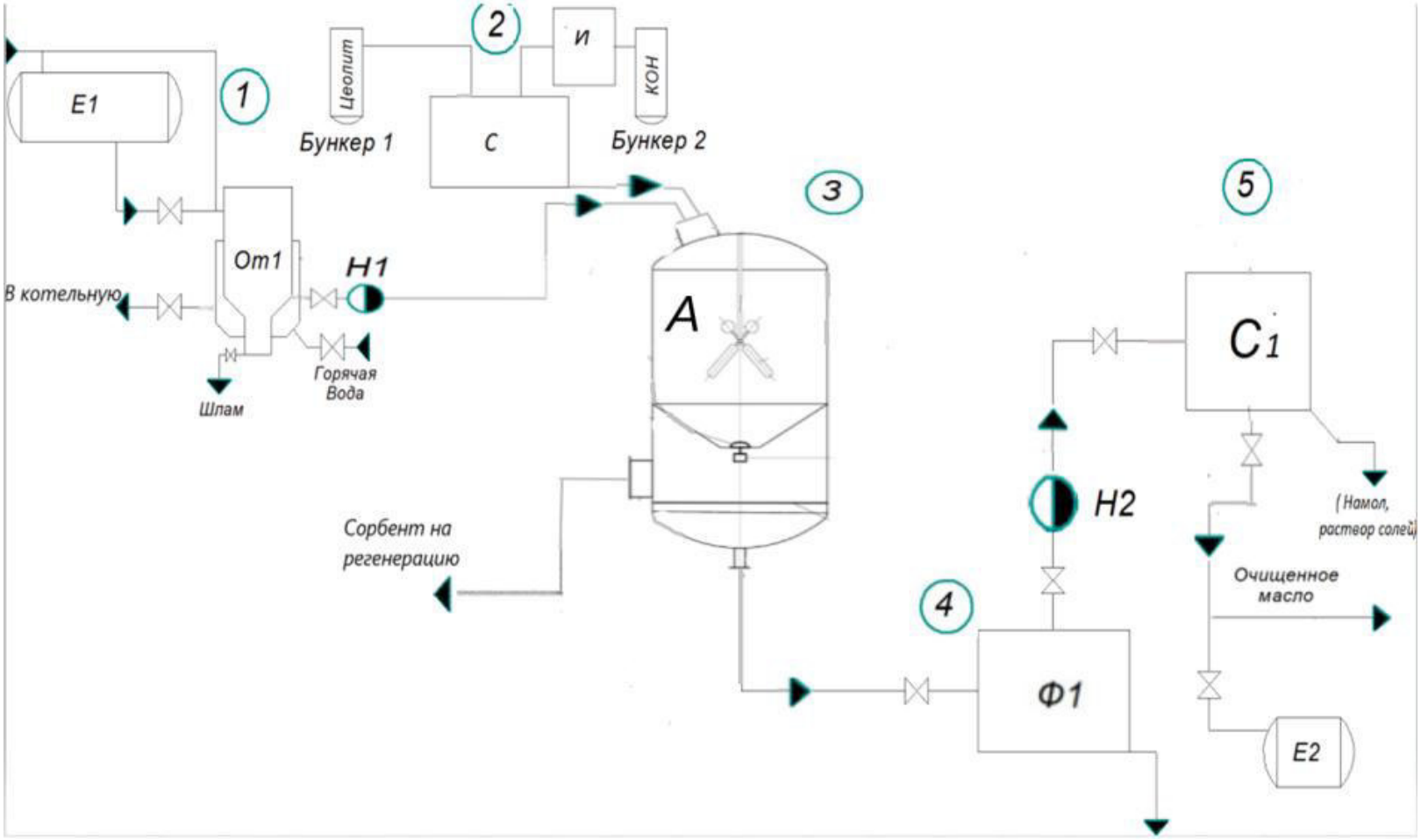
RU 2870092 C1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Материальный баланс процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С

Стадия процесса	**Статья прихода**	**Количество, кг**	**Статья расхода**	**Количество, кг**	**Примечание**
Исходные компоненты	Цеолит NaX	445,00	Цеолит NaX (в т. ч. потери 0,1 %)	444,56	Потери — пылеобразование при сушке/транспортировке (0,44)
	Гидроксид калия (KOH)	22,25	KOH (в т. ч. потери 1 %)	22,03	Удержание в порах цеолита + гигроскопические потери (0,22)
			Итого по компонентам:	**466,59**	
Приготовление компонентов	Вода на промывку/сушку	2966,67	Подготовленный сорбент (NaX)	444,53	Потери 0,03 кг (0,1 %) на пылеобразование
	Цеолит	444,56	Вода (испарение при сушке)	2965,00	Конденсат учтён отдельно
	KOH	22,25	Порошок KOH	22,25	
			Итого:	**3431,78**	Приход: 3433,48; расхождение 1,70 кг — это испарённая вода и пылеобразование, учтены в потерях
Модифицирование сорбента	Подготовленный NaX	444,53	Реакционная смесь: NaX + KOH	466,78	Смешение без существенных потерь
	Порошок KOH 0,30	22,25			
			Итого:	**466,78**	Баланс сходится
Адсорбционно-щелочная регенерация	ТМО (турбинное масло отработанное)	4450,00	ТМОР (турбинное масло отработанное регенерированное)	4227,50	Потери масла 5 % = 222,50 кг (унос с сорбентом, лёгкие фракции)
	Модифицированный сорбент	466,78	Отработанный сорбент (на	466,78	Включая удержание масла и продукты реакции

			утилизацию/регенерацию)		
			Итого:	**4694,28**	Приход 4916,78 кг; разница 222,50 кг — учтены как потери масла
Очистная фильтрация	ТМОР	4227,50	ТМОР (после фильтрации)	4206,36	Потери 0,5 % от 4227,50 кг = 21,14 кг
	Намол (механический износ)	0,68	Намол (осадок + взвеси)	0,71	Экспериментальное значение, пропорционально масштабу
			Итого:	4207,07	Сходится с учётом намола и потерь
Сепарация	ТМОР	4206,36	ТМОР (базовое масло)	4185,33	Потери 0,5 % от 4206,36 кг ≈ 21,03 кг
	Намол	0,71	Намол (дополнительно)	0,75	
	Вода (конденсат + продукт реакции)	2,00	Вода (отделяемая фаза)	2,00	Стехиометрия + конденсат
			Итого:	**4188,08**	
Сводный баланс	Приход: ТМО 4450 + сорбент 445 + KOH 22,25 + вода 2966,67	7883,92	ТМОР 4185,33 + отходы (сорбент 466,78, намол 0,75, вода 2,00) + потери масла 244,67 + прочие потери	7883,92	Баланс замкнут

ПРИЛОЖЕНИЕ В Технологическая схема процесса



ПРИЛОЖЕНИЕ Г Документы по практической реализации результатов работы

Справка о внедрении от 25.04.2024 года

Настоящим документом удостоверяется, что разработанная в рамках кандидатской диссертации «Разработка технологии комплексной адсорбционно-щелочной очистки отработанного масла марки ТП-22С» технология очистки и регенерации отработанного нефтепродукта щелочным методом внедрена в ООО «Агрокапиталспасский».

Технология заключается в том, что в отработанное масло после предварительного отстаивания, поступившего в емкость для регенерации малогабаритной регенерационной установки, добавляется модифицированный адсорбент с KOH, и в течение часа перемешивается при температуре 10-30˚С. Далее отработанное масло сепарируется при частоте вращения барабана свыше 3000 об/мин в течении 12-18 часов, в зависимости от загрязнения масла. Данная очистка на малогабаритной установке позволяет производить регенерацию отработанных масел в местах их потребления, исключая транспортировку отработанных масел на пункты переработки, что связано со значительными потерями масла

Внедрение данной технологии очистки позволило снизить материальные затраты за счет повышения эффективности регенерации, снижения транспортных расходов и низкой себестоимости единицы массы регенерированного масла.

Внедренная технология разработана аспирантом Черниковой Ольгой Вячеславовной кафедры «Химия и химические технологии» Тамбовского государственного технического университета при активном участии на этапе внедрения директора ООО «Агрокапиталспасский» Петина Михаила Григорьевича.

Генеральный директор
ООО «Агрокапиталспасский» (Петин М.Г.)

СПРАВКА
о внедрении

Настоящим документом удостоверяется, что ООО "Тем" подтверждает успешное внедрение инновационной технологии регенерации отработанного масла, разработанной Черниковой О.В. в рамках кандидатской диссертации. Эта технология, основанная на адсорбционно-щелочном методе с использованием модифицированного цеолита, позволяет проводить регенерацию непосредственно на месте потребления, что значительно снижает транспортные расходы и потери масла.

Процесс регенерации включает следующие этапы: предварительно отстоянное отработанное масло обрабатывается модифицированным цеолитом в малогабаритной регенерационной установке при перемешивании и температуре 10-30°С. Затем масло фильтруется для удаления адсорбента и подвергается сепарации (около 1,7 об/мин в течение 3,5 часов, в зависимости от степени загрязнения).

Внедрение, осуществленное при участии генерального директора ООО "Тем" Кишояна Ашота Артаваздовича, привело к существенному снижению материальных затрат за счет повышения эффективности регенерации и низкой себестоимости регенерированного продукта.

Генеральный директор
ООО «Тем»
_____ А.А. Кишоян
«25» 02 2025 г.
М.П.
393709 Тамбовская область
Первомайский р-он
с.Чернышевка
ИНН 6812007586
ОГРН 1196820006547
КПП 681201001

Аспирант кафедры
«Химия и химические технологии»
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
_____ О.В. Черникова
«25» 02 2025 г.

СПРАВКА
о внедрении

Настоящим документом удостоверяется, что на предприятии успешно внедрена технология регенерации отработанного масла, разработанная Черниковой О.В. в рамках ее кандидатской диссертации. Технология основана на адсорбционно-щелочном методе и включает следующие этапы: предварительно отстоянное отработанное масло обрабатывается модифицированным цеолитом в малогабаритной регенерационной установке при перемешивании и температуре 10-30°С. Затем масло фильтруется для удаления адсорбента и подвергается сепарации (около 1,7 об/мин в течение 3,5 часов, в зависимости от степени загрязнения). Использование малогабаритной установки позволяет регенерировать масло непосредственно на месте его потребления, избегая затрат на транспортировку отработанного масла.

Внедрение технологии, осуществленное при активном участии генерального директора ООО "Возрождение" Мухортова Алексея Анатольевича, позволило снизить материальные затраты благодаря повышению эффективности регенерации, сокращению транспортных расходов и низкой себестоимости регенерированного масла.

Генеральный директор
ООО «Возрождение»

_____ А.А. Мухортов

«__» _____ 2025 г.

М.П.

393409 Тамбовская область
Первомайский р-он
с.Чернышевка
ИНН 6812503753
ОГРН 1046805887040
КПП 681201001

Аспирант кафедры
«Химия и химические технологии»
ФГБОУ ВО «ТГТУ»

_____ О.В. Черникова

«13» 04 2025 г.

Общество с ограниченной ответственностью «Газпромнефть – Промышленные инновации»
(ООО «Газпромнефть – Промышленные инновации»)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА ПО РАЗВИТИЮ

Для корреспонденции: ул. Парадная, д. 8В, корп. 2, стр. 1,
Санкт-Петербург, 197350
тел.: +7 812 449-49-07
e-mail: gpnpi@gazprom-neft.ru
ОГРН 1207800161843, ИНН 7814783579, КПП 781401001

14.07.2026 № ЗР-04/000314

на № от

По месту требования

О принятии для рассмотрения к внедрению

СПРАВКА

Настоящим документом удостоверяется, что разработанная в рамках диссертационной работы «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ТУРБИННОГО МАСЛА ТП-22С АДСОРБЦИОННО-ЩЕЛОЧНЫМ МЕТОДОМ» технология, эскизная и технологическая схема регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом с применением комплексного поглотителя цеолита NaX с нанесенным на его поверхность гидроксидом калия принята для рассмотрения к внедрению в ООО «Газпромнефть – Промышленные инновации», г. Санкт-Петербург.

Технология заключается в том, что адсорбент предварительно подвергается обработке: промывке, сушке и регенерации при температуре 450°С, затем охлаждению без доступа воздуха. Равномерное распределение щелочи с концентрацией 0,124% (от массы адсорбента) на поверхности поглотителя достигается обработкой в галтовочной машине барабанного типа. В аппарат объемом Va = 3,2 м3 загружается отработанное турбинное масло ТП-22С и комплексный поглотитель из расчета 10 % от массы масла. Включается лопастная мешалка диаметром 600 мм и частотой вращения n = 2,13 об/мин. Время процесса регенерации тпр = 9,7 часа. Разработанный эскизный проект и химико-технологическая схема включают основные технологические стадии и оборудование необходимые для регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С предложенным способом.

Технология разработана аспирантом кафедры «Химия и химические технологии» Черниковой Ольгой Вячеславовной и заведующим кафедрой «Химия и химические технологии» Руховым Артемом Викторовичем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

С уважением,

Д.О. Кондрашев

Попов М.В.
+7(812)449-49-07 доб. 06127367

ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ – ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИННОВАЦИИ»