На правах рукописи

ЧЕРНИКОВА Ольга Вячеславовна

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

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ярославль – 2026

Работа выполнена в лаборатории «Вычислительная химия» кафедры «Химия и химические технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»).

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

Официальные оппоненты: ***Клинов Александр Вячеславович,*** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра «Процессов и аппаратов химической технологии», заведующий кафедрой

Шилов Михаил Александрович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановский энергетический университет имени В.И. Ленина», кафедра теоретической и прикладной механики, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «26» января 2027 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.513.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный технический университет» по адресу: г. Ярославль, Московский проспект, 88, ауд. Г-219.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, направлять по адресу: 150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88, ФГБОУ ВО «ЯГТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.513.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Ярославского государственного технического университета и на официальном сайте ФГБОУ ВО «ЯГТУ» https://www.ystu.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Гуданов Илья Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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. В процессе эксплуатации, преимущественно, вследствие окисления, турбинное масло деградирует и требует замены. 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.

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 тепломассообмена, 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 ($E_а$ = 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности диссертации, формулировку цели и задач работы, характеристику научной новизны и практической значимости, описание структуры работы и анализ степени разработанности темы.

В **первой главе** проведен аналитический обзор проблем и перспектив процессов и установок для регенерации отработанных нефтепродуктов. Сформулированы требования к методам регенерации, а также представлены особенности изменения состава масел (старение) в процессе эксплуатации.

Показано, что наиболее перспективными для широкой области применения является комбинированный метод регенерации, включающий комбинацию физико-химического и химического метода, способного обеспечить очистку масел в полном соответствии с требованиями действующей нормативно-технической документации. На основании проведенного обзора в первой главе сформулирована общая постановка задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена постановке задачи и разработке методики экспериментального исследования. Изучены причины деградации турбинного масла в условиях компрессионной станции для установления основных характеристик изменения ключевых показателей качества масла в процессе эксплуатации. Изучены условия работы турбинной установки ГТК-25ИР и маслопроводной системы. К основным признакам старения турбинного масла, выявленным в процессе эксплуатации, отнесены: изменение вязкости, увеличение кислотного числа, понижение температуры вспышки, наличие кислой реакции водной вытяжки, присутствие механических примесей, снижение прозрачности.

В процессе постановки задачи экспериментального исследования определены методики и используемое оборудование для контроля характеристик турбинного масла ТП-22С. Определены контролируемые параметры.

Разработана методика получения комплексного поглотителя на основе модификации адсорбента гидроксидом калия с учетом варьирования концентраций щелочи (в количестве 0,1; 0,5; 1 и 5 % (масс.) от массы адсорбента). Адсорбент предварительно подвергали обработке: промывке, сушке и активации при температуре 450 °С, затем постепенному охлаждению в эксикаторе. Равномерное распределение щелочи на поверхности адсорбента достигалось обработкой в галтовочной машине барабанного типа. Полученный продукт хранили в герметичной таре для сохранения его свойств.

В ходе экспериментальных исследований определены следующие показатели турбинного масла: кислотное число, вязкость, плотность, температура вспышки в открытом тигле, устойчивость к окислению в среде кислорода. В результате модернизации методики определения устойчивости к окислению реализован переход к непрерывному сбору и обработке экспериментальных данных, что позволило количественно оценить динамику окислительных процессов в реальном времени и повысить достоверность полученных результатов.

Физическое моделирование процесса регенерации турбинного масла осуществлялось в лабораторных условиях. Эксперимент проводился в емкости, в которую помещалось отработанное масло и добавлялся комплексный поглотитель в количестве, составляющем 10 % от массы масла. Для создания вынужденных конвективных потоков применялось механическое перемешивающее устройство с верхним приводом, что обеспечивало равномерное распределение поглотителя в объёме масла и интенсификацию массообменных процессов.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям процесса регенерации турбинного масла.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований адсорбционно-щелочной регенерации и проведены эксперименты по оценке влияния концентрации гидроксида калия в комплексном поглотителе, температуры, времени реализации процесса и гидродинамических параметров на кинетику процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С.

Изучено влияние температуры на динамику кислотного числа в процессе регенерации отработанного масла, рост которого свидетельствует о накоплении низкомолекулярных продуктов окисления (органических кислот) и обуславливает риск ухудшения эксплуатационных свойств масла, провоцируя износ компрессорного оборудования. На основании кинетических зависимостей, представленных на рисунке 1, определена энергия активации процесса регенерации. Среднее значение составило $E_{а\ ср} = 6{,}68$ кДж/моль.

Расчет температурного коэффициента скорости химической реакции и оценка энергии активации свидетельствует о диффузионном характере контроля процесса регенерации турбинного масла.

С целью определения лимитирующей стадии диффузионного процесса изучено влияние интенсивности перемешивания (режимного параметра процесса – частоты вращения привода мешалки) на кинетику адсорбционно-щелочной регенерации. Выявлена зависимость скорости регенерации от гидродинамических параметров, характерная для диффузионной области протекания процесса. Кинетические зависимости представлены на рисунке 2. На основании полученных данных

обоснован внешнедиффузионный характер контроля процесса регенерации турбинного масла.

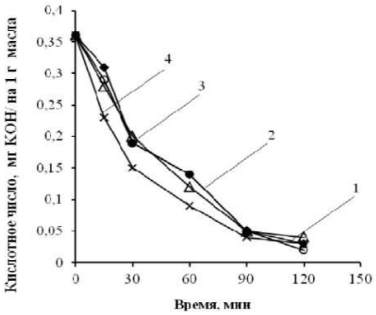


Рисунок 1 – Кинетика процесса регенерации при температуре процесса, °С: 1 – 25°С, 2 – 28°С, 3 – 32°С, 4 – 35°С (концентрация КОН в модифицированном сорбенте C = 1%)

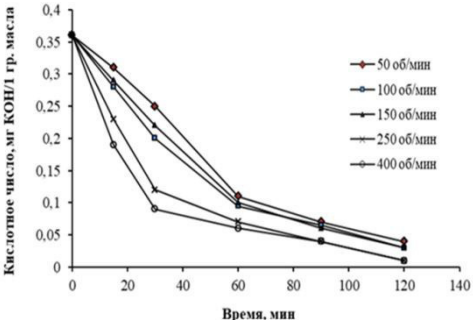


Рисунок 2 – Зависимость кислотного числа от скорости перемешивания (концентрация КОН в модифицированном сорбенте C = 1%)

Для оптимизации процесса регенерации отработанного турбинного масла с применением комплексного поглотителя исследовали кинетику массообменного процесса при варьировании следующих параметров: частоты вращения механической мешалки n (об/мин) и концентрации гидроксида калия в поглотителе C (% масс.). Полученные кинетические зависимости, представленные на рисунке 3, аппроксимированы с помощью регрессионного анализа. Анализ регрессионных зависимостей выявил, что гидродинамические параметры перемешивания являются определяющими для кинетики снижения кислотного числа: при увеличении частоты вращения перемешивающего устройства наблюдается существенное ускорение процесса и достижение нормативного показателя кислотного числа $c_н$ для турбинного масла ТП-22С ($c_н \leq 0{,}07$ мг КОН/г), что экспериментально подтверждено результатами серии опытов.

В четвертой главе проведен анализ полученных экспериментальных данных, позволивший установить вид критериального уравнения массообмена и определить численные значения его коэффициентов. Проведена модификация критериального уравнения, позволившая учесть влияние концентрации гидроксида калия на поверхности комплексного поглотителя, и отразить протекание совмещенного процесса регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С адсорбционно-щелочным методом. Поставлена и решена локальная оптимизационная задача, направленная на совершенствование процесса регенерации отработанного турбинного масла за счет поиска оптимальных значений режимных параметров. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что лимитирующей стадией процесса регенерации турбинного масла является внешняя массоотдача. При этом введение гидроксида калия в состав комплексного поглотителя оказывает положительное влияние на скорость снижения кислотного числа. Для объяснения данного факта проведен анализ значения числа Шмидта (для процесса регенерации турбинного масла порядок данного числа Шмидта составил $Sc \approx 10^3$), что послужило основанием формулирования следующей гипотезы: скорость процесса регенерации масла определяется массоотдачей в гидродинамическом пограничном слое, движущей силой которой является разность концентраций извлекаемых из масла компонентов в ядре потока и на границе диффузионного пограничного слоя. Наличие на поверхности цеолита щелочи

(гидроксида калия) приводит к тому, что поглощение низкомолекулярных продуктов окисления происходит не только за счет концентрирования на поверхности сорбента, но и за счет протекания химической реакции. Химический сток на поверхности снижает равновесную концентрацию, вследствие чего увеличивается градиент и, соответственно, движущая сила внешнедиффузионного переноса. Это эквивалентно росту эффективного коэффициента массоотдачи по сравнению с чисто физической сорбцией, что и объясняет ускорение процесса при введении щёлочи.

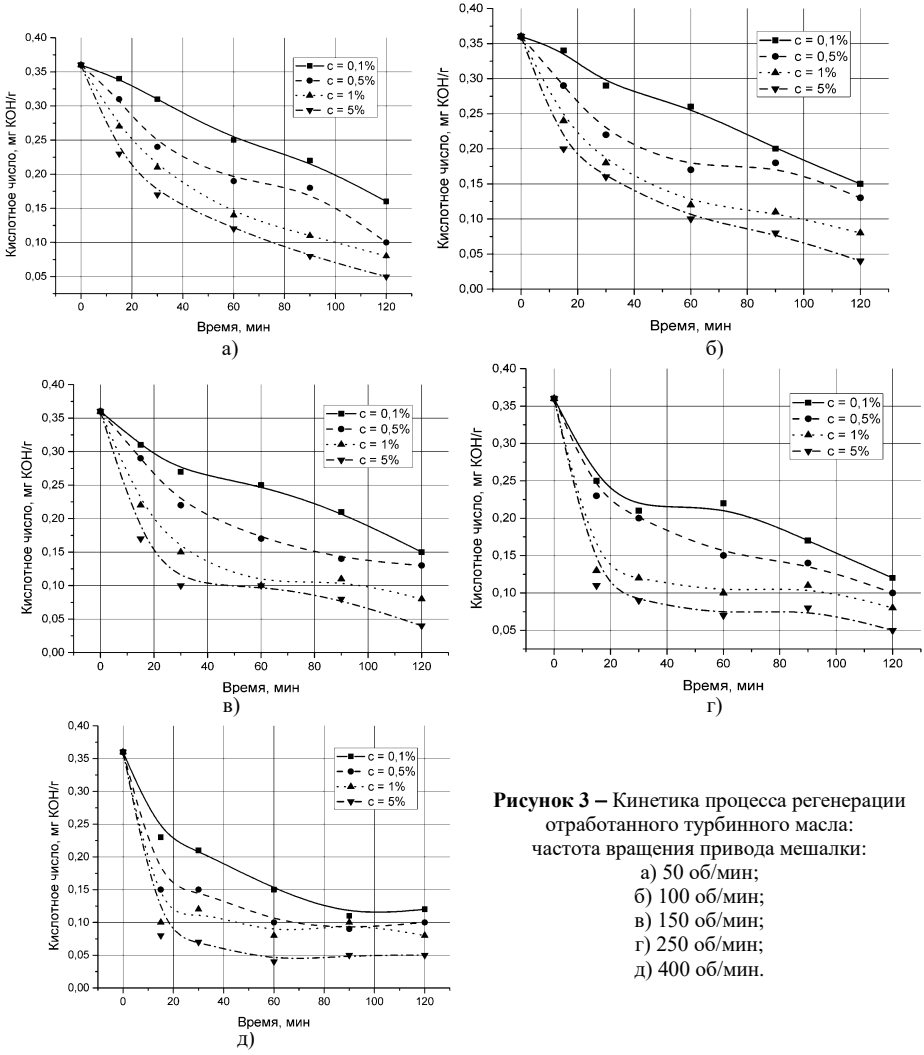


Рисунок 3 – Кинетика процесса регенерации отработанного турбинного масла:
частота вращения привода мешалки:
а) 50 об/мин;
б) 100 об/мин;
в) 150 об/мин;
г) 250 об/мин;
д) 400 об/мин.

Для решения задачи совершенствования процесса регенерации турбинного масла необходимо установить технологические параметры (скорость перемешивания, концентрацию щелочи в комплексном поглотителе) и определить значения конструктивных параметров аппаратурного оформления (объема, диаметра и высоты 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.

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

$$\frac{dc_к}{d\tau} = \frac{\beta \cdot F \cdot \rho}{m_{масла}} (c_к - c^*), \quad (1)$$

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

$$c_к(0) = c_{к0}, \quad (2)$$

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

Аналитическое решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$c_к = c_{к_0} \cdot e^{-\frac{\beta F \rho}{m_{масла}} \cdot \tau} + c^* \left(1 - e^{-\frac{\beta F \rho}{m_{масла}} \cdot \tau}\right). \quad (3)$$

Практическое применение полученной зависимости (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. Получение экспериментальных данных для расчета эффективного коэффициента массоотдачи сопряжено со значительными материальными и временными затратами. Результаты определения эффективного коэффициента массоотдачи β обобщаются в форме критериальной зависимости числа Шервуда Sh от чисел Рейнольдса Re и Шмидта Sc:

$$\mathrm{Sh} = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Sc}). \quad (4)$$

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

$$\mathrm{Sh} = a \cdot \mathrm{Re}^b \cdot \mathrm{Sc}^c. \quad (5)$$

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

$$\mathrm{Re} = x \cdot \mathrm{Re}_ц. \quad (6)$$

С учетом выражения (6) уравнение (5) принимает вид (7):

$$\mathrm{Sh} = a' \mathrm{Re}_ц^b \mathrm{Sc}^c; \; a' = a \cdot x^b. \quad (7)$$

Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила определить числовые коэффициенты критериального уравнения (*a'*, *b*, *c*) и записать уравнение (7) в форме (8):

$$\mathrm{Sh} = 0{,}0052 \cdot \mathrm{Re}_{\text{ц}}^{\,0{,}808} \cdot \mathrm{Sc}^{0{,}038}. \quad (8)$$

Для учета влияния концентрации гидроксида калия в составе комплексного поглотителя предложено модифицированное критериальное уравнение вида:

$$\mathrm{Sh} = a' \mathrm{Re}_{\text{ц}}^{\,b} \mathrm{Sc}^{c}(1 + d \cdot C^{e}). \quad (9)$$

Числовые значения коэффициентов критериального уравнения *d*, *e* определены по результатам полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов в математическом пакете MathCad 15:

$$\mathrm{Sh} = 0{,}0052 \cdot \mathrm{Re}_{\text{ц}}^{\,0{,}808} \cdot \mathrm{Sc}^{0{,}038} \cdot (1 + 1{,}429 \cdot C^{0{,}104}). \quad (10)$$

С целью верификации разработанной методики расчёта кинетики процесса массообмена проведена проверка адекватности математического описания. Экспериментальная часть выполнена на лабораторной установке, моделирующей условия регенерации отработанного турбинного масла ТП-22С. Расчётные значения кинетических параметров, полученные с использованием предложенной методики, сопоставлялись с соответствующими экспериментальными данными. Для количественной оценки расхождения применён критерий среднеквадратичного отклонения, значение которого составило не более 8,7 %. Полученный результат находится в пределах допустимой погрешности и подтверждает адекватность математического описания реальному процессу массообмена при регенерации турбинного масла.

В рамках работы поставлена и решена задача расчета оптимальных технологических режимов процесса регенерации, реализуемых в емкостном аппарате. Основные параметры, значения которых менялись в ходе исследований: концентрация гидроксида калия в комплексном поглотителе *C*, % (масс.) и частота вращения механического перемешивающего устройства *n*, об/мин.

В качестве критерия оптимальности (*I,* руб) выбран экономический показатель – сумма капитальных и эксплуатационных затрат за нормативный срок эксплуатации технологического оборудования:

$$I = \mathrm{K}\,(V(\tau_{\text{пр}}(C,\, n))) + \Э\,(C,\, n) \rightarrow \min. \quad (11)$$

Определены следующие ограничения.

Изменение концентрации низкомолекулярных продуктов окисления в процессе регенерации:

$$\frac{d\mathrm{c_к}}{d\tau} = \frac{\beta \cdot F}{m_{\text{масла}}}(\mathrm{c_к} - \mathrm{c}^{*}); \qquad c_{\text{к}}(0) = c_{\text{к}0}; \quad (12)$$

$$\mathrm{Sh} = 0{,}0052 \cdot \mathrm{Re}_{\text{ц}}^{\,0{,}808} \cdot \mathrm{Sc}^{0{,}038} \cdot (1 + 1{,}429 \cdot C^{0{,}104}). \quad (13)$$

Необходимое и достаточное время регенерации турбинного масла:

$$c_{\text{к}}(\tau_{\text{пр}}) = c_{\text{н}}. \quad (14)$$

Определяющий размер аппарата:

$$V_a = \frac{V_c\, \tau_{пр}\, (1+z)}{\varphi\, \tau_c}, \quad (15)$$

$$\boldsymbol{V_a} \in (\boldsymbol{V_{a_1}}, \boldsymbol{V_{a_2}}, \ldots \boldsymbol{V_{a_n}}); \qquad \tau_{\text{пр}} \le \tau_{\max}; \quad 140 \le \mathrm{Re}_{\text{ц}} \le 720; \; C \le 5\%. \quad (16)$$

Таким образом, постановка оптимизационной задачи имеет следующий вид: необходимо найти такие значения концентрации гидроксида калия и частоты

вращения мешалки, при которых сумма капитальных и эксплуатационных затрат за весь срок эксплуатации (11) стремится к минимуму при выполнении условий (12)-(16).

Решение оптимизационной задачи получено методом сопряженных градиентов. Рациональный режим процесса регенерации масла имеет следующие технологические и конструктивные параметры, соответствующие минимуму целевой функции: n = 2,13 об/мин; C = 0,124 % (масс.); $V_а$ = 3,2 м^3; $D_а$ = 1,4 м; $H_{ац}$ = 1,5 м; $\tau_{пр}$ = 9,7 ч.

Предложен оригинальный аппарат для реализации процесса регенерации отработанного турбинного масла (рисунок 4). Аппарат имеет цилиндрическую обечайку 1, эллиптическую крышку и днище 2. Объем аппарата разделен на две части конической перегородкой 3, которая имеет донный клапан 4. Загрузка отработанного масла и твердого регенеративного материала осуществляется через люк 6 в крышке аппарата.

Отделение регенерированного масла от твердого регенеративного материала реализуется в нижней части аппарата на горизонтальной фильтрующей перегородке 7. В верхней части аппарата установлена лопастная мешалка 10, имеющая шарнирное крепление лопастей к ступице. Конструкция позволяет изменять угол наклона лопастей мешалки относительно горизонтальной оси в зависимости от частоты вращения привода. При включении механического примешивающего устройства его лопасти опущены вниз, тем самым создаются благоприятные условия для приведения в движение твердых частиц комплексного поглотителя и поднятия их со дна аппарата потоками масла. По мере увеличения частоты вращения лопасти поднимаются вверх под действием центробежной силы или при помощи механического привода.

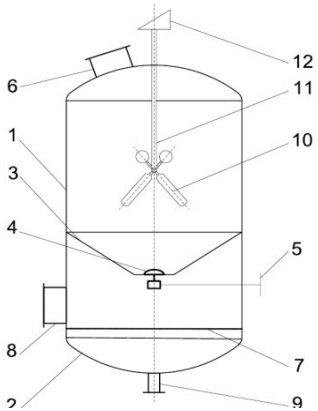


Рисунок 4 – Аппарат для регенерации отработанного турбинного масла: 1- вертикальный цилиндрический аппарат, 2 - эллиптическая крышка и днище, 3 - коническая перегородка, 4 - донный клапан, 5 - привод, 6 - люк, 7 - фильтрующая перегородка, 8 - выгружной люк, 9 - штуцер, 10 - лопастная мешалка, 11 - вал, 12 - привод.

Проведен статический анализ сил, действующих на лопасти мешалки в процессе регенерации отработанного масла, получены функциональные зависимости: рабочего угла наклона лопастей от частоты вращения; критической частоты вращения от массы и места установки противовеса; массы и места установки противовеса от рабочего угла наклона лопастей. Разработана инженерная методика определения режимов функционирования аппарата для регенерации, получены расчетные номограммы, проведен расчет места установки и массы противовесов.

Результаты работы переданы для внедрения в ряд организаций: ООО «Газпромнефть – Промышленные инновации» в г. Санкт-Петербург, КС-28 Моршанское ЛПУМГ (Первомайский ПУ) Первомайского района Тамбовской области, ООО «Агрокапиталспасский» (Тамбовская область, Староюрьевский район, с. Спасское), ООО «Возрождение» (Тамбовская область, Первомайский район, с. Чернышевка), ООО «Тем» (Тамбовская область, Первомайский район, с. Чернышевка).

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 ($E_а = 6{,}68$ 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 $n = 2{,}13$ об/мин. 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.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\boldsymbol{V_а}$ – объем аппарата, м^3; $\boldsymbol{V_{сут}}$ – суточный объем отработанного турбинного масла, м^3; $\boldsymbol{\tau_{пр}}$ – 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Рухов, А. В. Модифицированное критериальное уравнение конвективной массоотдачи в процессе адсорбционно-щелочной регенерации турбинного масла / А. В. Рухов, **О. В. Черникова**, Е. Ю. Образцова. – Текст : непосредственный // Башкирский химический журнал. – 2025. – Т. 32, № 3. – С. 101–106. – DOI 10.17122/bcj-2025-3-101-106.

2. 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. – Текст : непосредственный // Бутлеровские сообщения. – 2023. – Т. 73, № 3. – С. 46–53. – DOI 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-3-46.

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

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах Web of Science и Scopus:

4. 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 // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 59, No. 5. – P. 1177–1182. – DOI 10.1134/S0040579526600348.

Патенты:

5. Патент № 2804769 Российская Федерация, МПК C10M 175/02 (2003.08). Способ регенерации отработанного турбинного масла : № 2022127302 : заявл. 20.10.2022 : опубл. 05.10.2023 / А. В. Рухов, Е. С. Бакунин, **О. В. Черникова**, Е. Ю. Образцова, Е. С. Полушкин, С. Н. М. Аль-Амери, А. М. Истомин, М. С. Гончарова; заявитель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – 6 с. – Текст : непосредственный.

6. Патент 2870092 Российская Федерация МПК C10M 175/02 (2006.01), C11B 3/02 (20006.01). Аппарат для регенерации отработанных машинных масел : № 2026103854 : заявл. 12.02.2026 : опубл. 15.09.2026 / А. В. Рухов, **О. В. Черникова**, Е. С. Бакунин, А. М. Истомин, Е. Ю. Образцова, Р. Ю. Павлинов, Н. С. Бакунин, М.С. Гончарова ; заявитель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – 9 с. – Текст : непосредственный.

Материалы научных конференций:

7. **Chernikova, O. V.** Technology development of the complex adsorption-alkaline purification of waste oil of the TP-22C brand / **O. V. Chernikova**. – Текст : непосредственный // Мир науки без границ : материалы 9-й всероссийской науч.-практ. конференции молодых учёных с международным участием, Тамбов, 11 февраля 2022 г. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – С. 126–130.

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

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

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

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

12. **Черникова, О. В.** Теоретические исследования эффективности очистки отработанного масла сорбентом при использовании перемешивающего устройства **/ О. В. Черникова.** – Текст : непосредственный // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков : сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции, Москва, 25 апреля 2024 г. – М. : ООО "Издательство "Экономическое образование", 2024. – С. 239–244.

13. **Черникова, О. В.** Методика определения содержания эмульгированной воды в турбинном масле **/ О. В. Черникова.** – Текст : электронный // «Eurasiascience» : сборник статей LXV Международной научно-практической конференции. Москва, 15 ноября 2024 г. – М. : Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность. РФ», 2024. – С. 42–45. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_75156760_33381 326.pdf.

14. **Черникова, О. В.** Анализ примесей турбинного масла в процессе эксплуатации и его очистка с помощью синтетического сорбента **/ О. В. Черникова.** – Текст : непосредственный // Исследования и инновации: синергия знаний и практики : сборник статей II Международной научно-практической конференции, Самара, 20 февраля 2025 г. – Часть 2. – М. : Издательство "Доброе слово и Ко", 2025. – С. 20–27.

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