

На правах рукописи



Исхакова Регина Яновна

**КОМПЛЕКСНАЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ
ЭНЕРГЕТИКИ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА НА
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

2.10.2. Экологическая безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена на кафедре «Инженерная экология и безопасность труда» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Научный консультант –	Николаева Лариса Андреевна , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная экология и безопасность труда» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».
Официальные оппоненты:	Тугов Андрей Николаевич , доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств (ОПТ) акционерного общества «Всероссийский дважды ордена трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (АО «ВТИ»); Козодаев Алексей Станиславович , доктор технических наук, профессор кафедры экологии и промышленной безопасности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»; Пугин Константин Георгиевич , доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова».
Ведущая организация –	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Защита диссертации состоится 21 января 2027 г. в 11 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, зал заседаний диссертационного совета Д-224).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

К.Т.Н., доцент

Борисова

Светлана Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

В Российской Федерации проблемам экологической безопасности и благополучия окружающей среды уделяется повышенное внимание. Национальный проект «Экологическое благополучие», который является одной из национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года, связан с вопросами экологической безопасности населения за счет повышения качества окружающей природной среды и снижения антропогенного воздействия предприятий промышленного и коммунального комплексов.

Проблема экологической безопасности находится в тесной взаимосвязи с задачами ресурсосбережения при эксплуатации объектов промышленности и коммунального хозяйства. Согласно оценке текущего состояния экологической безопасности в Российской Федерации, за 2023 год было образовано около 9 млрд тонн отходов производства. Накопление и хранение многотоннажных отходов производства является причиной отчуждения сельскохозяйственных земель и территорий, повышения антропогенной нагрузки на окружающую природную среду, нерационального использования ресурсов. При этом сокращение потерь материальных, топливно-энергетических и сырьевых ресурсов, а также снижение уровня негативного воздействия на окружающую природную среду являются важнейшими принципами современной государственной политики, которые находят отражение в «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года», утвержденной Правительством Российской Федерации.

В эколого-экономическом аспекте ресурсосбережение должно основываться на принципе заменяемости ресурсов, являющемся более экономичным и экологически безопасным, предотвращая загрязнение окружающей среды отходами. Для организации экологически безопасной среды целесообразным является формирование на базе нескольких предприятий или нескольких производственных процессов одного предприятия циклических воспроизводственных систем, максимально вовлекающих в хозяйственный оборот отходы в качестве вторичных ресурсов и вторичного сырья, что соответствует концепции промышленного симбиоза.

По этой причине разработка и внедрение современных подходов и научно-технических решений к утилизации, технологиям переработки и вторичному использованию отходов производства является актуальной задачей.

Актуальность диссертационного исследования подтверждается тем, что работа выполнена в рамках реализации: госзаказа №13.405.2014/К «Энерго- и ресурсосбережение и снижение техногенного воздействия на окружающую среду на предприятиях топливно-энергетического комплекса» (2014-2016 г.г.), научного проекта РНФ 18-79-101-36 «Теоретические методы моделирования и разработки эффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса» (2018-2023 гг.), научного проекта РНФ 25-29-00129 «Энерго-ресурсоэффективность широкого класса процессов и технологическая независимость промышленных аппаратов на предприятиях топливно-энергетического комплекса» (2025-2026 гг.), гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан, предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан (2025-2026 гг.), гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых

функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Степень разработанности темы

Анализ мирового уровня исследований показывает, что за рубежом и в Российской Федерации отходы производства и потребления используются в качестве вторичных материальных и энергетических ресурсов.

К ведущим отечественным научным школам в этой области относятся коллективы во главе с: д.т.н., проф. С.В. Свергузовой (БГТУ им. В.Г. Шухова); д.т.н., проф. Васильевым А.В. (СамГТУ); д.т.н., проф. Глушанковой И.С. (ПНИПУ); д.т.н., проф. Туговым А.Н. (ВТИ), д.т.н., проф. Политаевой Н.А. (СПбПУ); д.т.н., проф. Николаевой Л.А. (КГЭУ); д.т.н., проф. Шайхиевым И.Г. (КНИТУ); д.т.н., проф. Азаровым В.Н. (ВолГТУ); д.б.н., проф. Тихомировой Е.И. (СГТУ им. Гагарина Ю.А.); д.т.н., проф. Тупицыной О.В. (СамГТУ) и пр.

Из зарубежных исследователей можно выделить научную школу Жумаевой Д.Ж. (Узбекистан), Jiahua Xia, Hui Geng (Китай), Ming Zou, Haixin Zhang, Taira Hidaka (Япония), Ahmer Ali Siyal (Малайзия), Hossein Hazrati (Иран), Vijay Sodhi (Индия) и др.

Достигнуты значительные результаты в использовании различных отходов в качестве вторичных ресурсов. Однако, в связи с утверждением Национального проекта «Экологическое благополучие» требуется дальнейшее развитие научных исследований, повышающих экологическую безопасность и ресурсоэффективность производственного комплекса.

Цель работы

Разработка научно обоснованного подхода, научно-технических и технологических решений организации системы комплексной утилизации отходов энергетики и жилищно-коммунального хозяйства для повышения экологической безопасности и эффективности при их использовании в качестве вторичных материальных ресурсов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Научно обосновать предлагаемый способ локальной очистки сточных вод от сбросов анионно-синтетических поверхностно-активных веществ (АСПАВ) с применением процесса адсорбции на материалах, полученных на основе шлама водоподготовительных установок (ВПУ) тепловых электрических станций (ТЭС) и различных связующих. Произвести выбор наиболее эффективного связующего.

2. Получить изотермы адсорбции АСПАВ на разработанных материалах, установить механизм адсорбции. Разработать технологию и аппаратное оформление локальной очистки сточных вод от АСПАВ в аппарате периодического действия.

3. Получить экспериментальные данные по доочистке сточных вод от АСПАВ в проточном неподвижном слое сорбционного материала. Определить динамическую и полную сорбционную емкость, коэффициент защитного действия, провести оценку лимитирующей стадии процесса адсорбции. Разработать технологическую схему и аппаратное оформление доочистки сточных вод от АСПАВ в адсорбере.

4. Обобщить экспериментальные данные в виде расчетного выражения, описывающего количественную зависимость снижения значения илового индекса от вводимой дозы шлама ВПУ.

5. Разработать и научно обосновать технологию извлечения тяжелых металлов (ТМ) для детоксикации избыточного активного ила (ИАИ) после биологической очистки сточных вод. Определить дозу шлама ВПУ и условия проведения детоксикации ИАИ, загрязненного ионами ТМ, с целью использования в качестве почвогрунта.

6. Оценить возможность снижения влажности ИАИ при совместном центрифугировании с шламом ВПУ для использования в качестве вторичного энергетического ресурса.

7. Научно обосновать возможность термической утилизации топливных рециклинг-гранул (ТРГ) на основе ИАИ. Разработать технологическую схему предварительной очистки дымовых газов, образующихся при сжигании ТРГ, от твердых частиц с выбором аппаратов.

8. На основе математической модели разработать алгоритм расчета эффективности скруббера «мокрой» очистки запыленных газов при совместном охлаждении очищаемого газа. Разработать конструкцию комбинированного аппарата для разделения суспензии, образующейся после очистки газовых сред от твердых частиц, состоящий из тонкослойной и флотационной секций и алгоритм расчета эффективности разделения загрязненных дисперсными частицами жидких сред.

9. Оценить экономический эффект и предотвращенный экологический вред окружающей природной среде, полученный при использовании предлагаемых технических и технологических решений.

Объект исследования: отходы промышленного и жилищно-коммунального секторов Республики Татарстан.

Предмет исследования: процессы утилизации отходов производства и их вторичное использование в качестве материальных ресурсов; очистка сточных вод промышленных и коммунальных предприятий от АСПАВ.

Основы научного подхода заключаются в использовании концепции промышленного симбиоза как системного подхода к организации хозяйственной деятельности, направленного на повышение эффективности и повторного вовлечения ресурсов, применения альтернативных традиционным ресурсосберегающих вариантов обращения с отходами при условии обеспечения экологической безопасности, минимизации негативного воздействия на окружающую среду и технической возможности реализации в промышленных масштабах.

Методы решения поставленных задач

Методы решения основаны на комплексном анализе, связывающем технологические и технические решения, экологические и экономические аспекты, при использовании отходов в качестве вторичных материальных ресурсов.

Поставленные задачи решаются с использованием известных методов физического и математического моделирования. В работе используются химические, физические и физико-химические методы анализа: гравиметрический, титриметрический, фотоколориметрический, атомно-эмиссионный, масс-спектральный, калориметрический. Методики анализа сточных вод, отходов, используемые в работе, рекомендованы природоохранными нормативными документами федерального уровня. При подготовке диссертационной работы использовались методы статистической обработки данных, аппроксимации полученных зависимостей. Для обработки результатов измерений, вычисления погрешностей оценки измеряемой величины, неопределенности измерения использовали ГОСТ 34100.3-2017. В вычислительных экспериментах применялось компьютерное моделирование.

Научная новизна работы:

1. На основе экспериментально полученных изотерм адсорбции научно обоснован способ очистки сточных вод от анионно-синтетических поверхностно-активных веществ (АСПАВ), проявляющих дифильные свойства, в статических условиях гранулированным сорбционным материалом на основе шлама ВПУ ТЭС, модифицированного парафином (ШМП), при сбросах загрязненных сточных вод с концентрацией ≤ 45 мг/дм³. Предложен способ получения ШМП путем введения нагретого до 65 °С парафина в количестве 30 % масс. в шлам ВПУ с последующим охлаждением до температуры 25 °С.

2. Экспериментально установлен механизм физической сорбции АСПАВ из сточных вод на основе фундаментального термодинамического анализа с определением характеристик процесса адсорбции лаурилсульфата натрия (ЛСН) ШМП: значение стандартной

энергии Гиббса -8,67 кДж/моль, свидетельствующее о самопроизвольном протекании процесса адсорбции; энтальпия процесса адсорбции -14,46 кДж/моль, свидетельствующая об экзотермичности процесса. Исследованы кинетические характеристики процесса адсорбции. Энергия активации адсорбции составляет 7,64 кДж/моль. По результатам расчета получены константы адсорбционного равновесия по модели Ленгмюра, наиболее точно описывающие процесс. Характеристическая свободная энергия адсорбции ЛСН ШМП – 6,65 кДж/моль.

3. Исследована и экспериментально подтверждена возможность доочистки сточных вод от АСПАВ (при концентрации ≤ 3 мг/дм³) при их пропускании через неподвижный слой сорбционного материала, динамическая сорбционная емкость, коэффициент защитного действия слоя и потеря времени защитного действия, до значений нормативов допустимого сброса. При адсорбции ЛСН ШМП процесс лимитируется внутренней диффузией.

4. Установлена зависимость снижения значения илового индекса от количества вводимого шлама ВПУ, которая является эмпирическим обоснованием механизма агрегации и седиментации ИАИ, получена расчетная зависимость. Установлено повышение обезвоживания ИАИ при совместном центрифугировании с шламом ВПУ за счет разрыва флоккул и нарушения агрегативной устойчивости ИАИ.

5. Обоснован механизм процесса детоксикации ИАИ от ионов ТМ при дозировании шлама ВПУ в количестве 0,11 кг/кг при проведении пневматической аэрации, позволяющий повысить эффективность детоксикации ТМ: Cu – на 44,5 %; Cd – 70,3 %; Ni – 47,6 %; Pb – 71,6 %; Zn – 74,7 %; Cr – 35,3 % с получением рекультиванта многокомпонентных питательных грунтов, который является основой для прогнозной оценки поведения ТМ в системе «ИАИ – карбонатсодержащий отход».

6. Научно обоснована возможность термической утилизации ИАИ, шлама ВПУ и лигносульфоната технического (ЛСТ) в соотношении 9:1:3 (% масс.) путем изготовления ТРГ, теплота сгорания которых составляет 12,73 МДж/кг. Разработана технологическая схема с аппаратным оформлением предварительной очистки уходящих газов, образующихся при термической утилизации ТРГ, от твердых частиц.

7. На основе применения системы дифференциальных уравнений переноса теплоты, массы влаги и тонкодисперсных твердых частиц при прямотоке газа и пленки жидкости в цилиндрических контактных устройствах, где взаимодействие фаз учитывается объемными источниками и коэффициентами турбулентного обмена, разработан алгоритм расчета эффективности скруббера «мокрой» очистки и охлаждения запыленных газов с сепарационной эффективностью более 98,5 % при диаметре частиц более 3 мкм. Для разделения суспензии, образующейся после очистки газовых сред, на основе математического описания гравитационного механизма и турбулентной миграции частиц, разработан алгоритм расчета эффективности разделения загрязненных дисперсными частицами жидких сред с эффективностью не менее 99 % в комбинированном аппарате, состоящем из тонкослойной и флотационной секций.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационного исследования являются развитием концепции промышленного симбиоза в области совместной переработки отходов энергетики и систем водоотведения, на основании которых разработаны научно-технические и технологические решения, повышающие экологическую безопасность, и теоретическая основа для оптимизации работы систем управления промышленными отходами. На основании термодинамических характеристик установлен механизм физической адсорбции на ШМП, характеризующийся экзотермичностью и самопроизвольным протеканием процесса адсорбции ЛСН. Кинетика адсорбции ЛСН ШМП лимитируется стадией внутренней диффузии, что уточняет механизм

массопереноса и расширяет теоретические представления о транспорте сорбата в зерне ШМП. Выявлена зависимость между изменением значения показателя илового индекса, который свидетельствует об эффективном осаждении активного ила во вторичных отстойниках на очистных сооружениях, от дозы вводимого шлама ВПУ ТЭС. На основе анализа и обобщения экспериментальных данных установлена и научно обоснована зависимость процесса детоксикации ИАИ, загрязненного ТМ, от дозы вводимого шлама ВПУ и условий протекания процесса для получения рекультиванта. Представлен алгоритм и выполнены расчеты эффективности скруббера «мокрой» очистки запыленных газов с сепарационной эффективностью более 98,5 % при диаметре частиц более 3 мкм. Разработаны метод и алгоритм расчета эффективности разделения загрязненных дисперсными частицами жидких сред с эффективностью 99 % в комбинированном аппарате, состоящем из тонкослойной и флотационной секций.

Разработаны научно-технические и технологические решения локальной очистки сточных вод промышленных предприятий от сбросов повышенных концентраций АСПАВ на промышленных предприятиях и доочистки сточных вод для их отведения в водоем. Разработаны научно-технические решения по повышению седиментационных свойств и обезвреживанию ИАИ шламом ВПУ, включающие обработку смешанного осадка на центрифугах. Предложен способ утилизации ИАИ путем его предварительной сушки с последующим формированием ТРГ со связующим ЛСТ. Полученные ТРГ с теплотой сгорания $Q_p^H = 12,73$ МДж/кг могут использоваться в качестве альтернативного топлива в промышленности и энергетике. Разработан экологически безопасный и эффективный скруббер «мокрой» очистки, предназначенный для предварительной очистки дымовых газов от твердых частиц и их охлаждения для последующей очистки от других загрязняющих веществ. Использован методический подход, с помощью которого проведены расчеты технико-экономических показателей и оценка предотвращенного экологического вреда окружающей среде при применении предлагаемых технологий, обеспечивающих снижение выплат за негативное воздействие на окружающую среду. Предотвращенный экологический вред: водоему р. Кама от сброса сточных вод, загрязненных ПАВ в повышенной концентрации, составит 21,4 млн руб./год; атмосферному воздуху как компоненту природной среды – 12,02 млн. руб./год; почвам как объекту охраны природной среды – 453,7 тыс. руб./год. По результатам исследований получены патенты на изобретения, полезные модели, программы ЭВМ.

Достоверность исследований

Достоверность полученных данных обеспечивается использованием в экспериментальных исследованиях сертифицированных и поверенных средств измерения и контроля. Достоверность результатов математического моделирования обеспечивается корректностью применения используемого математического аппарата, с использованием фундаментальных законов сохранения и равновесия, моделей структуры потоков, теории турбулентной миграции частиц.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подкреплены аналитическими и экспериментальными методами доказательств достоверности, наглядно продемонстрированными в диссертационном исследовании. Подготовка, статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ очистки сточных вод от АСПАВ в статических условиях гранулированным сорбционным материалом на основе шлама ВПУ ТЭС, модифицированного парафином (ШМП), полученным введением нагретого до 65 °С парафина в количестве 30 % масс. в

шлам ВПУ с последующим охлаждением до температуры 25 °С, при сбросах загрязненных сточных вод с повышенной концентрацией.

2. Механизм физической адсорбции АСПАВ из сточных вод, характеризующийся экзотермичностью и самопроизвольным протеканием процесса на основании термодинамических характеристик процесса адсорбции ЛСН ШМП. Полученные кинетические характеристики процесса адсорбции.

3. Способ доочистки сточных вод с низкой концентрацией в динамическом режиме при пропускании их через аппарат с неподвижной загрузкой ШМП и характеристики: динамическая обменная емкость, коэффициент защитного действия слоя, позволяющие масштабировать результаты на промышленные адсорберы.

4. Способ обезвреживания избыточного активного ила от тяжелых металлов при дозировании шлама ВПУ в условиях проведения пневматической аэрации, позволяющий повысить эффективность детоксикации ТМ: Cu на 44,5 %; Cd – 70,3 %; Ni – 47,6 %; Pb – 71,6 %; Zn – 74,7 %; Cr – 35,3 % с получением рекультиванта многокомпонентных питательных грунтов, который является теоретической основой для разработки методов детоксикации различных органических отходов, загрязненных ТМ.

5. Зависимость снижения значения илового индекса от количества вводимого шлама ВПУ, ее аналитическое описание.

6. Способ термической утилизации ИАИ, шлама ВПУ и лигносульфоната технического (ЛСТ) в соотношении 9:1:3 (% масс.) путем изготовления ТРГ, теплота сгорания которых составляет 12,73 МДж/кг.

7. Способ экологически безопасной и эффективной предварительной очистки уходящих газовых сред от твердых частиц.

8. Математическая модель для расчета эффективности скруббера «мокрой» очистки запыленных газов, эффективности разделения загрязненных дисперсными частицами жидких сред (суспензии) в комбинированном аппарате, состоящем из тонкослойной и флотационной секций.

Личный вклад автора

1. Постановка и решение цели и задач исследования в разработке комплексного энергоресурсосберегающего подхода обеспечения экологической безопасности на промышленных предприятиях. Подготовка литературного обзора, отражающего степень проработанности темы исследования.

2. Руководство и непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований на лабораторных и стендовых установках, обобщение результатов экспериментальных исследований.

3. Разработка научно-технических решений по созданию циклов обращения с отходами теплоэнергетики и водоотведения на промышленных предприятиях для повышения экологической безопасности, энергоресурсоэффективности и экономичности производств. Разработка новых материалов: ШМП, ТРГ.

4. Разработка рекомендаций по дозированию шлама ВПУ с целью проведения процесса детоксикации ИАИ.

5. На основе применения математических моделей разработка алгоритмов расчета эффективности процессов очистки газовых сред от дисперсной фазы в скруббере с орошением водой, а также разделения суспензий в комбинированном аппарате.

6. Проведение технико-экономического обоснования и оценка предотвращенного экологического вреда при внедрении предлагаемых технологий.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.10.2. «Экологическая безопасность»:

п. 7. Разработка средств, технологий и методов ликвидации накопленного вреда окружающей среде;

п. 10. Разработка и совершенствование методов, технологий и средств снижения негативного воздействия антропогенной хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду;

п. 11. Создание и совершенствование энерго- и ресурсосберегающих методов и технологий эксплуатации объектов, совершенствование системы обращения с отходами на всех стадиях жизненного цикла.

Научные публикации

По теме диссертационного исследования опубликованы: 81 научная работа, в том числе 19 статей в изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и приравненных к ним (Scopus, Web of Science); 2 монографии; 10 РИД; 4 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель, 4 программы для ЭВМ; 14 статей в прочих научных журналах; 36 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций.

Апробация результатов исследования

Основные результаты исследований доложены и обсуждены на: всероссийской научно-образовательной конференции с международным участием «Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности – 2026» (Казань, 2026); международной научной конференции «Актуальные аспекты и перспективы развития современной биотехнологии» (Белгород, 2026); VII международной научной конференции «От обращения с отходами к управлению ресурсами» (Пермь, 2025); международной научной конференции Тинчуринские чтения – 2025 «Энергетика и цифровая трансформация» (Казань, 2025); международной научно-технической конференции «Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности» (Республика Узбекистан, Термез, 2025); международной научно-практической конференции «Наследие В.И. Вернадского и современные проблемы экологии» (Казань, 2025); XXIII международной научной конференции, посвященной сотрудничеству с союзными государствами «Химия и инженерная экология» (Казань, 2023); V всероссийской научно-практической конференции в рамках V всероссийского научно-общественного форума «Экологический форсайт» (Саратов, 2023) и др.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из восьми глав, введения, заключения, списка литературы из 399 источников и 7 приложений. Работа изложена на 343 страницах, включает 65 рисунков, 52 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность, цель и задачи диссертационной работы, методы решения поставленных задач, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность исследований, личный вклад автора.

В первой главе представлен литературный обзор существующих проблем, связанных с образованием отходов производства и подходы к их решению. Отмечена тесная взаимосвязь вопросов экологической безопасности и энергоресурсосбережения в процессе эксплуатации объектов промышленного и коммунального хозяйства, так как внедрение энергоресурсосберегающих технологий обеспечивает минимальное вовлечение материальных ресурсов и компонентов окружающей среды. Для организации экологически безопасной

экономики становится необходимым вторичное использование ресурсов и применение ресурсных и энергетических циклов на базе нескольких предприятий или производственных процессов.

Проблема накопления промышленных отходов в настоящее время представляет собой одну из угроз экологической безопасности в Российской Федерации. Отходы производства создают опасность нарушения устойчивости экосистем, что зачастую приводит к необратимым изменениям окружающей среды и оказывает негативное воздействие на здоровье населения.

Предприятия топливно-энергетического комплекса являются источниками значительного количества твердых промышленных отходов. При эксплуатации ВПУ на ТЭС образуется шлам, который выводится с продувкой. Складирование и хранение отхода на шламонакопителях сопряжено с рядом проблем. В настоящее время шлам ВПУ используется в качестве известкового удобрения, в строительстве в качестве наполнителя и т.д. Согласно сведениям об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП (отходы), в целом по Российской Федерации за 2023 год образовано 984 тыс. т отходов водоподготовки, из которых утилизировано только 3,5 %.

Избыточный активный ил (ИАИ), образующийся на биологических очистных сооружениях (БОС) в процессе очистки сточных вод, также является многотоннажным отходом промышленности, который может выступать в качестве вторичного материального и энергетического ресурса. Обращение с ИАИ состоит из двух этапов: обезвоживания и последующей утилизации. Для повышения влагоотдачи возможно введение алюмокалиевых квасцов, Al_2O_3 , глины, торфа и т. д. Для вовлечения ИАИ в качестве вторичного материального ресурса необходимо проводить его детоксикацию из-за повышенного содержания тяжелых металлов (ТМ). Для этого применяется обработка лимонной кислотой, $CaCl_2$ и пр. Обработанный ИАИ используется в сельском хозяйстве в качестве удобрения, в строительной индустрии и т.д. В 2023 году образовано 5,411 млн т осадка биологической очистки сточных вод, из которых на повторное применение (рециклинг) поступает всего 1,5 %.

В России из всех видов возобновляемых источников энергии биомасса имеет значительный потенциал. ИАИ рассматривается как энергетический ресурс для выработки биогаза, электроэнергии в биотопливных элементах, для получения гидроуглей и т. д. Важным компонентом является разработка экологически безопасных технологий термической утилизации, обеспечивающих очистку образующихся выбросов, особенно от твердых частиц.

Повторное вовлечение промышленных отходов в технологический цикл обеспечивает повышение экологической безопасности и энергоресурсоэффективности и соответствует стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Во второй главе представлены объекты, материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования выступали отходы промышленного и жилищно-коммунального секторов Республики Татарстан. Материалы исследования: шлам ВПУ ТЭС, ИАИ, связующие вещества.

В экспериментальных исследованиях использовали шлам Набережночелнинской ТЭЦ, образующийся при подготовке добавочной воды для конденсатно-питательного тракта в осветлителях. Шлам ВПУ отводится с продувкой на шламонакопители площадью 328,23 га и представляет собой суспензию бурого цвета влажностью $W = 60$ %. Химический состав шлама представлен в табл. 1.

Проводили сушку материала до $W = 3$ %. Шлам ВПУ – отход энергетики V класса опасности. Гранулометрический состав представлен в основном фракцией 0,09-0,5 мм (более 61 %).

Табл. 1. Химический состав шлама ВПУ

Минеральная часть							
Катионы	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Ni ²⁺	Cu ²⁺
%, масс.	66,12±0,32	17,15±0,18	0,72±0,02	0,81±0,13	0,07±0,001	0,043±0,003	0,064±0,001
Анионы	CO ₃ ²⁻		SiO ₃ ²⁻		OH ⁻		SO ₄ ²⁻
%, масс.	56,64±0,11		18,42±0,093		8,37±0,06		1,56±0,01
Органическая часть, 15 %							

Исследован ИАИ БОС ООО «Челныводоканал», представляющий хлопьевидную массу бурого цвета из большого числа многослойно расположенных бактериальных клеток, окруженных внеклеточным полимерным веществом (ВПВ). Определен гранулометрический состав ИАИ: частицы размером < 1 мм составили 98 %, 1-3 мм – 1,5-1,8 %, > 3 мм – 0,4-0,6 %. ИАИ – отход IV класса опасности. Физико-технические характеристики ИАИ: плотность обводненного ИАИ – 1211±15 кг/м³; зольность (на сухое вещество) – 12,2±0,05 % (масс.); влажность (после вторичных отстойников) – 99,2±0,2 % (масс.)

Гидробиологический анализ активного ила путем микроскопирования показал наличие видового разнообразия простейших; доминирование брюхоресничных (*Aspidisca turrita*, *Oxytricha pellionella*); кругоресничных (*Vorticella alba*, *Vorticella microstoma*) инфузорий, часто встречающихся коловраток (*Rotaria Rotatoria*, *Philodina*) и небольшого количества нематод; единично встречающихся жгутиконосцев и свободноплавающих инфузорий (*Litonotus*, *Amphileptus*).

Для получения достоверных данных все экспериментальные исследования проводились не менее чем в трех повторностях. Экспериментальные исследования проведены с использованием лабораторных установок и стендов. Для определения ТМ использованы спектрометр эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой Avio 500; масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой NEXion 300D фирмы «PerkinElmer Inc.»; теплоты сгорания – калориметрическая бомба АБК -1-В; CHNS-анализ проведен с использованием элементного анализатора EA-3000, Eurovector, S.p.A.; центрифугирование – на лабораторной центрифуге Elmi CM-6M.01; биотестирование – с использованием измерителя плотности суспензии ИПС-03, культиватора KBM-05; микроскопирование – на бинокулярном микроскопе Motis BA310LED. При проведении вычислительного эксперимента использовали компьютерное моделирование на языке программирования Python 3 с использованием библиотек NumPy; SciPy; Matplotlib.

В третьей главе исследовано повышение эффективности локальной очистки сточных вод по извлечению АСПАВ повышенной концентрации и их доочистки с применением различных подходов.

Сточные воды, направляемые на локальную очистную станцию (ЛОС) с ОАО «Камаз», представлены водами, образующимися на различных заводах предприятия: автомобильного завода, завода двигателей и т.д. В сточных водах присутствуют: взвешенные вещества, хлориды, сульфаты, NH⁴⁺, нефтепродукты, фосфаты, АСПАВ и прочие загрязняющие компоненты.

Технологическая схема ЛОС представлена на рис. 1. Проектная производительность очистных сооружений составляет 2300 тыс. м³/год, фактическая производительность – 37 % от проектной. Наблюдались периодические превышения нормативных значений для поступающих на ЛОС сточных вод по АСПАВ, концентрация которых повышалась до 48,3 мг/дм³.

В соответствии с установленными нормативами, концентрация АСПАВ, поступающих на БОС, не должна превышать 10 мг/дм³, при повышении фактического значения соответствовало 41,07±1,6 мг/дм³. Таким образом, для обеспечения надежной работы БОС и

обезвреживания сточных вод, загрязненных повышенными концентрациями АСПАВ, предлагается проводить адсорбционную очистку.

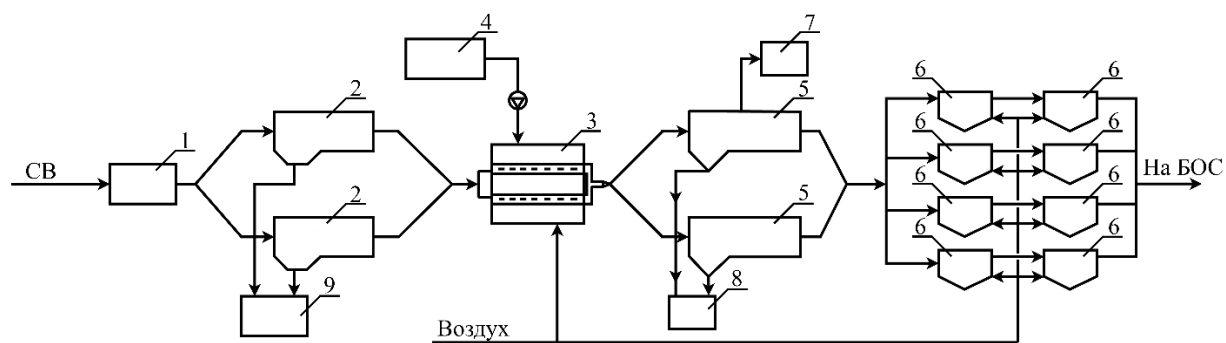


Рис. 1. Технологическая схема ЛОС:

1 – приемно-распределительная камера; 2 – песколоушки; 3 – смеситель; 4 – реагентное хозяйство; 5 – нефтеловушки; 6 – флотаторы; 7 – резервуар сбора всплывших нефтепродуктов; 8 – резервуар сбора осевших нефтепродуктов; 9 – бункер сбора песка.

В настоящее время существуют различные сорбционные материалы, в том числе из отходов, однако их производство в промышленных масштабах зачастую связано с трудоемкостью предварительной подготовки, химической активацией и повышенными энергетическими затратами на термическую обработку. Поэтому, в качестве доступного материала использован шлам ВПУ ТЭС.

Проведено исследование процесса адсорбции АСПАВ на осушенном шламе ВПУ ТЭС, сорбционная способность которого составляет 2,87 мг/г, что соответствует низкой эффективности очистки – 10,5 %. Водопоглощение осушенного шлама ВПУ составило $73,5 \pm 0,1$ %, шлак является гидрофильным материалом. Проведена модификация отхода с применением различных связующих: парафина (ШМП), воска пчелиного (ШМВ), стекла натриевого жидкого (ШМС), крахмала технического (ШМК).

Использование адсорбента в промышленных условиях включает: снижение перепада давления в адсорбере, простоту отстаивания, возможность регенерации материала. Подготовку материала проводили двумя способами: путем окатывания материала и методом продавливания гранул через формующую фильеру со связующими. Проведена оценка водопоглощения и растворимости полученных материалов (табл.2.)

Табл. 2. Технические характеристики сорбционных материалов

Сорбционный материал	ШМП	ШМВ	ШМС	ШМК
Водопоглощение, %	$0,01 \pm 0,002$	$0,2 \pm 0,01$	$0,1 \pm 0,02$	$43,3 \pm 0,08$
Растворимость в воде, (г/100 см ³)	$<0,1 \pm 0,003$	$<0,1 \pm 0,002$	$54 \pm 0,2$	$<0,1 \pm 0,005$

На основании результатов (табл. 2) ШМК не соответствует требуемым характеристикам (поглощает воду), а ШМС растворим (далее не использованы).

Исследована сорбционная способность, A , разработанных гранул по отношению к лаурилсульфату натрия (ЛСН). Проведена оценка влияния количества связующего (парафина), p , на эффективность очистки, Ξ (табл. 3).

Табл. 3. Изменение A и Ξ от добавленного связующего p

p , % масс.	15	20	25	30	35	40	50
A , мг/г	$8,6 \pm 0,03$	$14,2 \pm 0,01$	$20,5 \pm 0,01$	$22,1 \pm 0,02$	$18,6 \pm 0,04$	$16,1 \pm 0,04$	$10,8 \pm 0,02$
Ξ , %	31,8	53,1	74,2	81,6	69,7	57,3	39,5

Целесообразным является введение связующего в количестве 30 %. При более низких значениях поверхность недостаточно гидрофобна. При введении связующего в

количестве $> 30 \%$ (масс.) происходит заполнение пор сорбента, что приводит к снижению сорбционной емкости. На рис. 2 представлено распределение капли раствора ЛСН на ШМП. Значение краевого угла смачивания для ШМП $\theta = 122^\circ$, поверхность ШМП гидрофобна.

Изотермы адсорбции представлены на рис. 3 и по классификации Брунауэра-Эмметта-Теллера (БЭТ) относятся к I типу, свидетельствуют о мономолекулярной адсорбции. Сорбционная емкость ШМП составляет $22,1 \text{ мг/г}$, а ШМВ – $14,6 \text{ мг/г}$. По классификации Джайлса полученные изотермы адсорбции имеют форму изотерм L-типа и наблюдаются, когда взаимодействие между адсорбированными молекулами мало, а энергия активации не зависит от степени заполнения поверхности, что свидетельствует о высоком сродстве сорбента к сорбату.



Рис. 2. Распределение капли ЛСН на ШМП

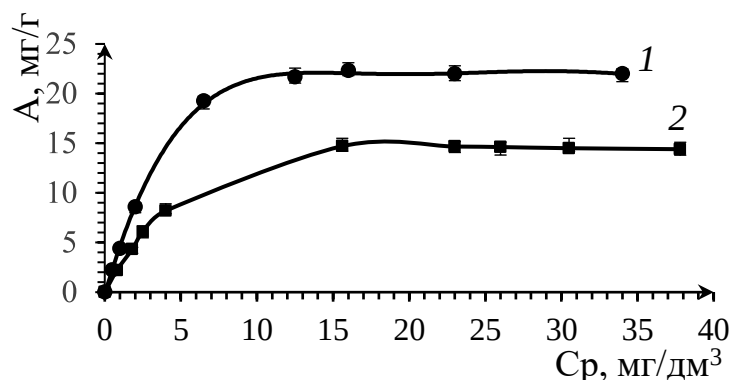


Рис. 3. Изотерма адсорбции АСПАВ:
1 – ШМП; 2 – ШМВ (при 20°C)

При контакте с ШМП взаимодействие реализуется с неполярной частью АСПАВ, адсорбционная емкость ШМВ ниже из-за наличия сложных эфиров жирных кислот и спиртов, создающих некоторую полярность. Для ШМП определены: адсорбционная емкость по метиленовому голубому – $149,34 \text{ мг/г}$; по йоду – $39,04 \%$; суммарный объем пор – $0,527 \text{ см}^3/\text{г}$. Экспериментальные значения обработаны с использованием классических уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха (рис. 4). Модель Ленгмюра на ШМП описывается зависимостью $A = 0,209/C_p + 7,356$; константа равновесия Ленгмюра $K_L = 35,19 \text{ дм}^3/\text{ммоль}$; предельная адсорбция $A_\infty = 0,136 \text{ ммоль/г}$; степень достоверности $R^2 = 0,995$. Модель Фрейндлиха на ШМП $A = 2,799 C_p^{0,55}$; константа равновесия Фрейндлиха $K_F = 2,799 \text{ дм}^3/\text{ммоль}$; степень достоверности $R^2 = 0,905$.

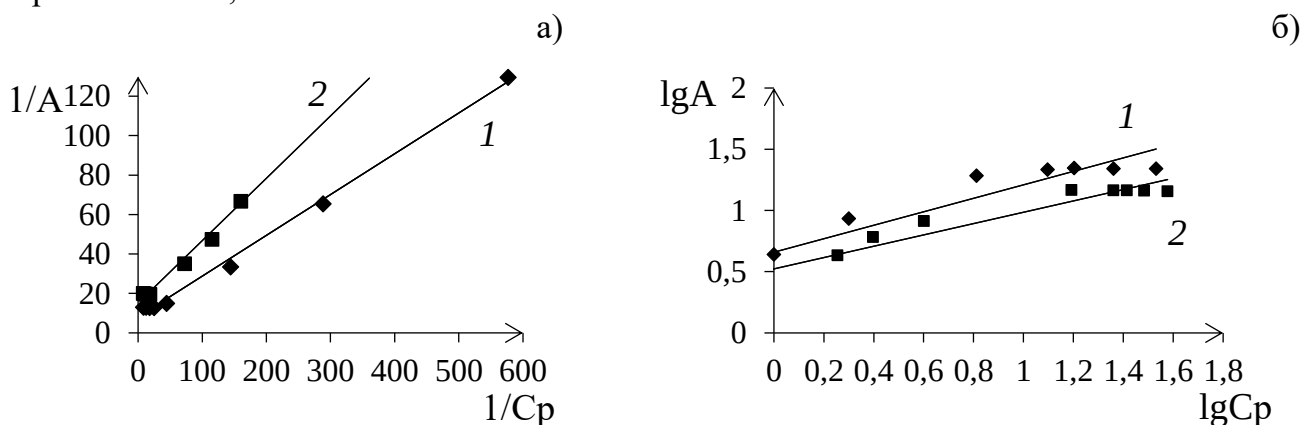


Рис.4. Изотермы адсорбции ЛСН в координатах линейного уравнения
а) Ленгмюра и б) Фрейндлиха: 1 – ШМП; 2 – ШМВ

Расчетное значение удельной поверхности ШМП по емкости монослоя из уравнения Ленгмюра – $52,24 \text{ м}^2/\text{г}$. Экспериментальные результаты обработаны с применением

уравнения Дубинина-Радушкевича, после его преобразования в $\ln A = \ln A_{\infty} - k\varepsilon^2$ получена изотерма (рис.5), где k – константа, связанная с энергией адсорбции; ε – потенциал Поляни. По модели определяется характеристическая свободная энергия адсорбции E , отражающая среднюю энергию взаимодействия молекулы адсорбата со стенками поры и суммарный объем микропор W_0 (табл. 4.). $W_0 = 0,039 \text{ см}^3/\text{г}$ (ШМП) и $W_0 = 0,022 \text{ см}^3/\text{г}$ (ШМВ) свидетель-

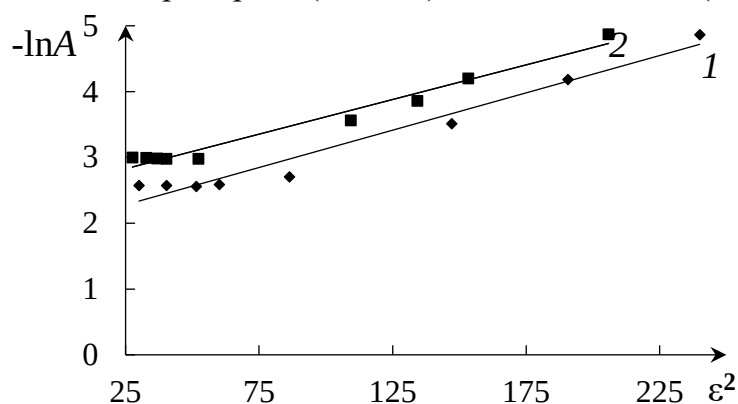


Рис.5. Изотермы адсорбции ЛСН в координатах линейного уравнения Дубинина-Радушкевича: 1 – ШМП; 2 – ШМВ.

ствуют о том, что материал имеет и мезопористую структуру. Необработанный шлам ВПУ является микропористым адсорбентом, однако, при модификации его поверхности парафином в процессе пропитки и последующего охлаждения происходит агрегация мелких частиц шлама, что приводит к образованию мезопор.

Проведена оценка термодинамических и кинетических характеристик сорбции АСПАВ ШМП. Исследован процесс адсорбции на ШМП

в статических условиях при температурах: 293 К, 303 К, 313 К, 323 К (рис. 6 а) и представлен в координатах уравнения Ленгмюра (рис. 6 б). Рассчитаны значения свободной энергии Гиббса по уравнению Гиббса-Гельмгольца. Построен график зависимости $\ln K_L$ от значения $1/T$ (рис. 7), по которому определяли энтальпию: $\Delta H^0 = -Rt \lg \alpha$, где R – универсальная газовая постоянная. Проведен расчет значений энтропии ΔS^0 при разных температурах (табл.5).

Табл. 4. Параметры уравнения Дубинина-Радушкевича

Параметр	ШМП	ШМВ
k , моль ² /кДж ²	0,0113	0,0105
A_{∞} , ммоль/г	0,1359	0,077
E , кДж/моль	6,65	6,9
W_0 , см ³ /г	0,039	0,022

Отрицательное значение изменения энтальпии, а также понижение адсорбционной способности при увеличении температуры свидетельствуют о том, что процесс адсорбции экзотермичен и является физическим по своей природе. Отрицательные значения энергии Гиббса свидетельствуют о самопроизвольном протекании процесса. С повышением температуры равновесие смещается в сторону десорбции.

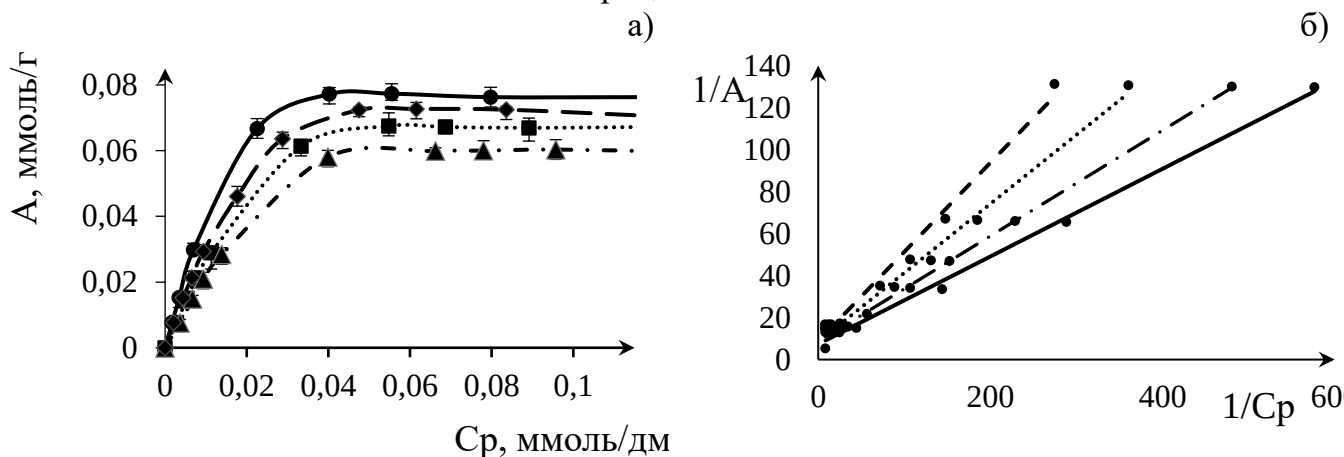


Рис.6. Изотермы адсорбции ЛСН ШМП при температуре: –293 К, – –303 К, · · ·313 К, – – 323 К (а) и в координатах линейного уравнения Ленгмюра (б)

Проведено экспериментальное определение кинетических зависимостей (рис. 8). Адсорбция ЛСН ШМП реализуется на 80-90 % в первые 40-50 мин.

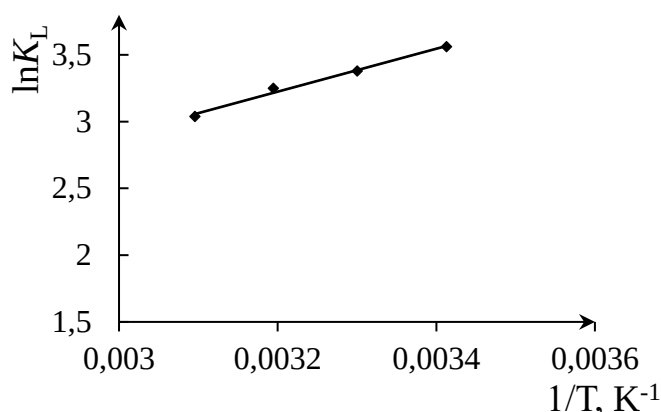


Рис. 7. Зависимость изменения $\ln K_L$ от обратной температуры

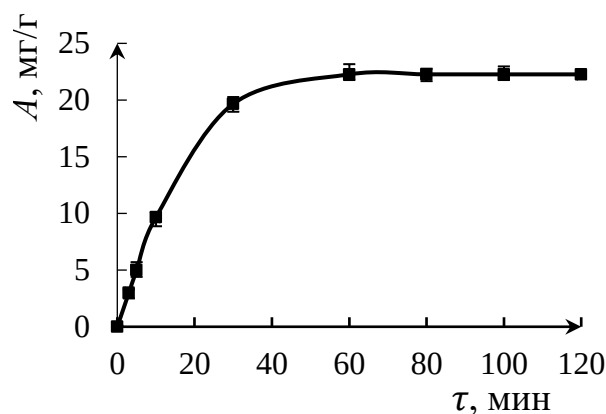


Рис. 8. Кинетическая кривая адсорбции ЛСН ШМП

Табл. 5. Термодинамические характеристики адсорбции ЛСН ШМП

Параметр	T, K			
	293	303	313	323
ΔH^0 , кДж/моль	-14,46			
ΔG^0 , кДж/моль	-8,67	-8,52	-8,45	-8,15
ΔS^0 , Дж/(моль·K)	-19,76	-19,64	-19,19	-19,52

В рамках модели Ленгмюра процесс адсорбции ЛСН ШМП рассматривается как обратимая реакция первого порядка: $-dA(\tau)/dt = k_1(C_0 - A(\tau)) - k_2A$, где C_0 , A – исходные количества веществ, моль/дм³; $A(\tau)$ – количество вещества, прореагировавшего на момент времени τ , моль/дм³; k_1 и k_2 – константы скоростей прямой и обратной реакции. Получены кинетические кривые при различных температурах (рис. 9). По рис. 10, на котором отражена зависимость $\ln(C_0 - C_\infty)/(C - C_\infty)$ по τ , определили эффективную константу скорости реакции k .

Логарифмические зависимости (рис. 10) имеют линейный вид, что подтверждает протекание адсорбции ионов в виде реакции первого порядка. При возрастании температуры происходит снижение констант скорости адсорбции, что свидетельствует о протекании физической адсорбции.

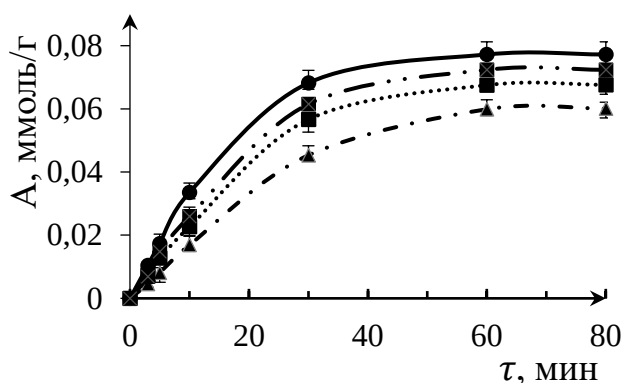


Рис. 9. Кинетические кривые адсорбции ЛСН ШМП при:
– 293K, ···– 303K, --- 313K, – – 323K

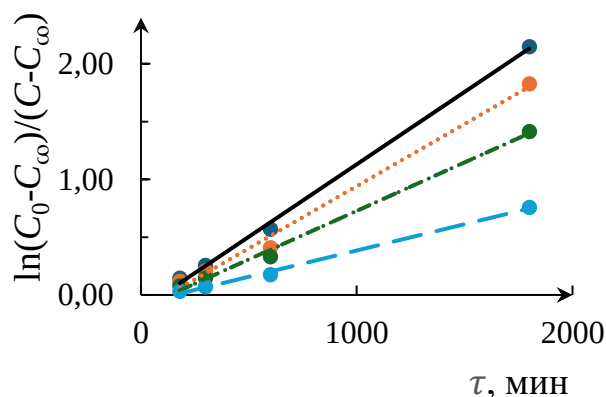


Рис. 10. Зависимость изменения $\ln(C_0 - C_\infty)/(C - C_\infty)$ по τ :
– 293 K, ···– 303 K, – – 313K, – – 323 K

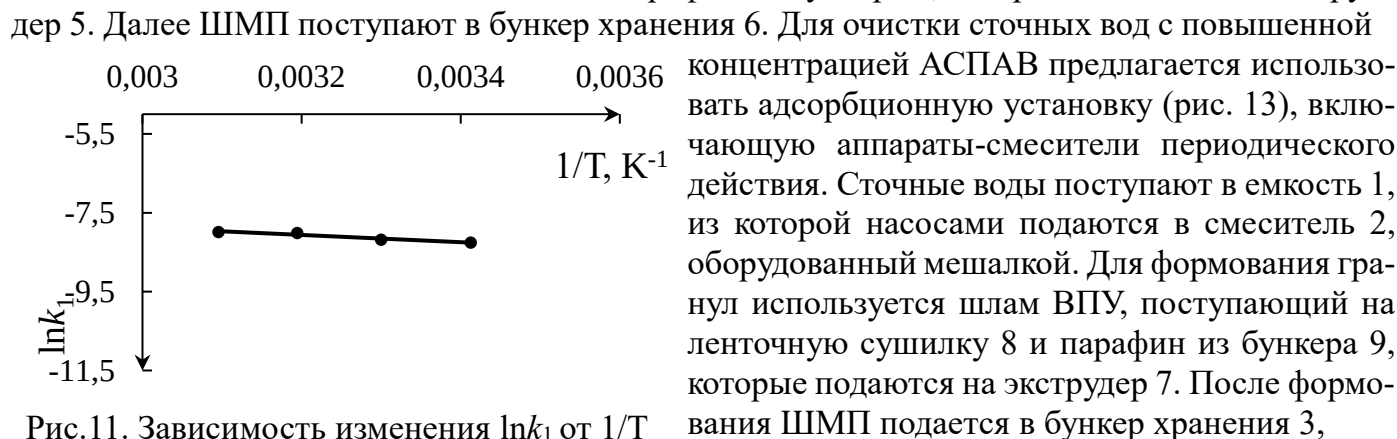
Значения k_1 и k_2 представлены в табл. 6. Для расчета энергии активации адсорбции построен график зависимости $\ln k_1$ от $1/T$, K⁻¹ (рис. 11) и проведен расчет по уравнению

Аррениуса: $k_1 = A \cdot e^{-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}}$, A – предэкспоненциальный множитель. Энергия активации

Табл. 6. Значения констант при различных температурах

Параметр	Т, К			
	293	303	313	323
$k, 10^{-3}, \text{с}^{-1}$	0,5	0,8	1,1	1,3
$k_1, 10^{-4}, \text{с}^{-1}$	2,6	2,8	3,3	3,4

адсорбции $E_{\text{акт}} = 7,64$ кДж/моль, что характерно для протекания физической адсорбции. Процесс производства ШМП представлен на рис. 12. Для формирования гранул используется шлам ВПУ, поступающий из шламонакопителя 1 на ленточную сушилку 2, направляемый в бункер сбора 3 и парафин из бункера 4, которые подаются на экструдер 5. Далее ШМП поступают в бункер хранения 6. Для очистки сточных вод с повышенной



а затем – в смеситель 2, где реализуется перемешивание ШМП и сточных вод. Далее смесь

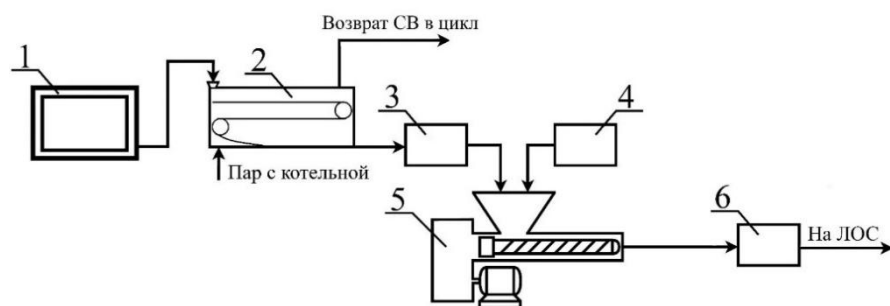


Рис.12. Технология производства ШМП:

- 1 – шламонакопитель; 2 – ленточная сушилка; 3 – бункер сбора осушенного шлама; 4 – бункер подготовки связующего; 5 – экструдер; 6 – бункер хранения.

поступает в отстойник 4, где происходит процесс разделения ШМП и очищенных вод. Отработанный ШМП отводится в бункер сбора 5 для регенерации паром в холодильнике 7, направляемый с котельной. Проведен расчет ленточной сушилки: массовый расход высушенного шлама – 0,23 кг/с; расход воздуха – 4 м³/с; площадь по-

верхности нагрева воздухоподогревателя – 149,5 м²; расход пара на сушку материала – 0,24 кг/с; площадь ленточной сушилки – 27,5 м². При очистке 2334 м³/сут сточных вод от АСПАВ концентрацией 45 мг/дм³ необходимо дозировать в аппараты с мешалкой ШМП в количестве 160,5 кг на 1 загрузку. Снижение адсорбционной способности ШМП после регенерации $\leq 3 \pm 0,1$ %. Технологические параметры работы смесителя представлены в табл. 7.

Выбор режима и аппаратного оформления процесса очистки сточных вод от АСПАВ зависит от конкретной задачи. В случае, если требуется доочистка сточных вод при невысоких концентрациях АСПАВ перед их спуском в водоем ($C \leq 0,1$ мг/дм³), то адсорбция реализуется в динамическом режиме в адсорбере. Использованы гранулы ШМП 3-6 мм, полученные методом окатывания. Насыпная плотность ШМП – $590 \pm 0,03$ кг/м³.

Экспериментальные исследования в динамическом режиме проводили в адсорбционной колонке при высоте загрузки 15 см. В колонку загрузили $m = 38,4$ г ШМП. На рис. 14 представлен график изменения концентрации АСПАВ, C , в зависимости от пропущенного

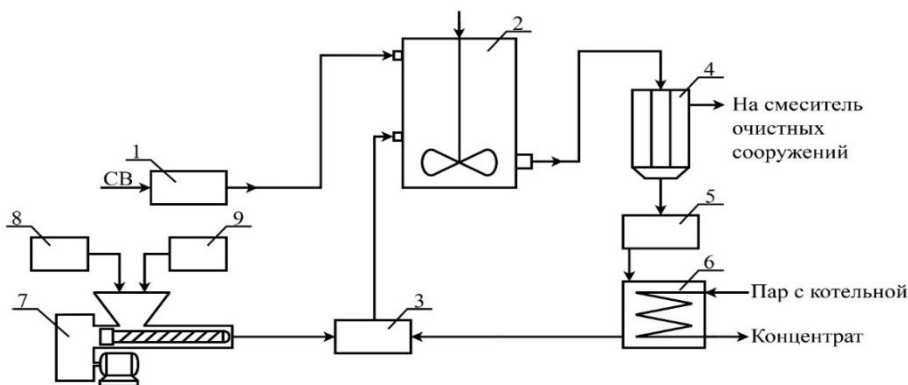


Рис. 13. Адсорбционная установка для очистки сточных вод от АСПАВ: 1 – приемная емкость сточных вод; 2 – смеситель; 3 – бункер хранения ШМП; 4 – отстойник; 5 – бункер сбора загрязненного ШМП; 6 – холодильник.

действия, ч. По зависимости на рис.15 определили $K = 220,2$ ч/м; $\tau_0 = 10,11$ ч. Процесс адсорбции в динамических условиях реализуется в колонном адсорбере с неподвижной загрузкой ШМП. Результаты расчета представлены в табл.8.

Табл.7. Параметры работы смесителя

Параметр	Значение
Тип перемешивающего оборудования	Лопастная мешалка
Обобщенный центробежный критерий Re	$50,19 \cdot 10^4$
Номинальная мощность, потребляемая мешалкой, Вт	302
Время пребывания в смесителе, мин	60
Масса ШМП на 1 смеситель, кг	26,75

Табл. 8. Результаты расчета адсорбера

Параметр	Значение
Диаметр адсорбера, м	3,5
Высота адсорбера, м	5
Критерий Рейнольдса	12,1
Гидравлическое сопротивление, Па	865,74
Объемный коэффициент массоотдачи, c^{-1}	0,0049
Масса ШМП на загрузку, кг	28 700

Для оценки лимитирующей стадии процесса использована диффузионная модель Бойда-Адамсона: $F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^m \frac{1}{n^2} e^{(-n^2 Bt)}$, где F – доля равновесной сорбции к моменту времени t , $F = A_t/A$, где A_t , A – сорбционная емкость в момент времени t и в состоянии равновесия, ммоль/г; n – количество извлекаемых веществ; B – кинетический

объема раствора, V . Динамическая сорбционная емкость – 5,91 мг/г; полная сорбционная емкость – 7,68 мг/г. Определение времени защитного действия слоя τ проводили по уравнению Н.А. Шилова: $\tau = KN - \tau_0$, где K – коэффициент защитного действия; N – высота загрузки ШМП, м; τ_0 – потеря времени защитного

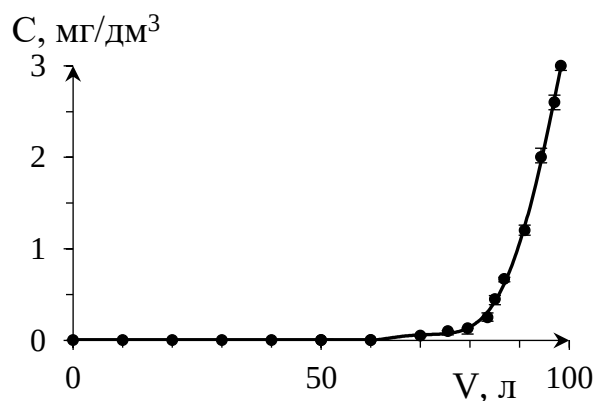


Рис. 14. Изменение концентрации АСПАВ C в зависимости от V

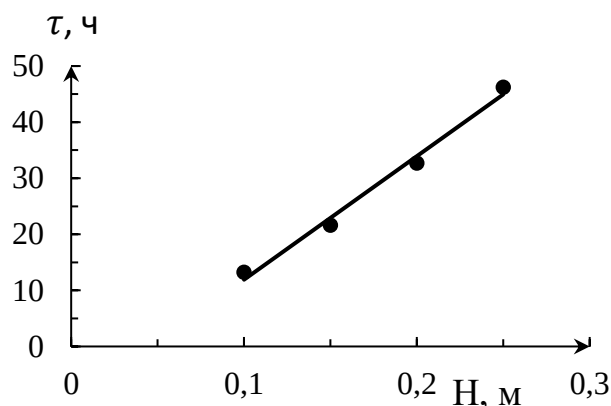


Рис. 15. Изменение τ от высоты Загрузки H ШМП

коэффициент, с^{-1} , $B = D\pi^2/r_0^2$, где D – коэффициент внутренней диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$; r_0 – радиус зерна ШМП, см ; Bt – безразмерный параметр.

Линейность зависимости Bt от t (рис. 16) является признаком внутридиффузионного лимитирования. Рассчитаны коэффициенты эффективной диффузии D_3 и массопроводности K в различных моменты времени адсорбции (табл. 9).

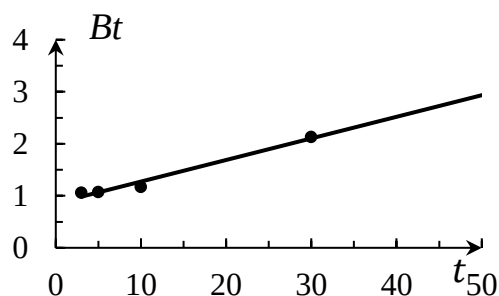


Рис. 16. Зависимость $Bt = f(t)$

Проведена оценка по диффузионному критерию Био: $Bi = \beta \cdot r_0^2 / K$. Расчетные значения $Bi \geq 588$, процесс является внутридиффузионным.

Табл. 9. Значения D_3 и K в различных моменты времени

$t, \text{с}$	180	300	600	1800
$D_3, \text{м}^2/\text{с}$	$1,91 \cdot 10^{-10}$	$4,34 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$
$K, \text{м}^2/\text{с}$	$5,2 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$5,19 \cdot 10^{-12}$	$1,05 \cdot 10^{-12}$

Математическое описание процесса физической адсорбции в динамических условиях сводится к системе уравнений (1)-(3):

$$\frac{\partial(a+\varepsilon C)}{\partial \tau} + w \frac{\partial C}{\partial x} = D_3 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \beta_o [a^*(C) - a], \quad (2)$$

$$a^* = \varphi(C), \quad (3)$$

где a и C – концентрация компонента в адсорбенте и сплошной фазе; ε – порозность слоя; w – средняя скорость сплошной среды; x – продольная координата; τ – время; β_o – коэффициент массопередачи.

Для решения системы уравнений заданы начальные условия ($\tau = 0$): $C(x, 0) = 0$; $0 \leq x \leq L$; $a(x, 0) = 0$; $0 \leq x \leq L$; граничные условия на входе: $x = 0$; $vC_0 = vC - D_3 \partial C / \partial x$; на выходе $x = L$; $\partial C / \partial x = 0$.

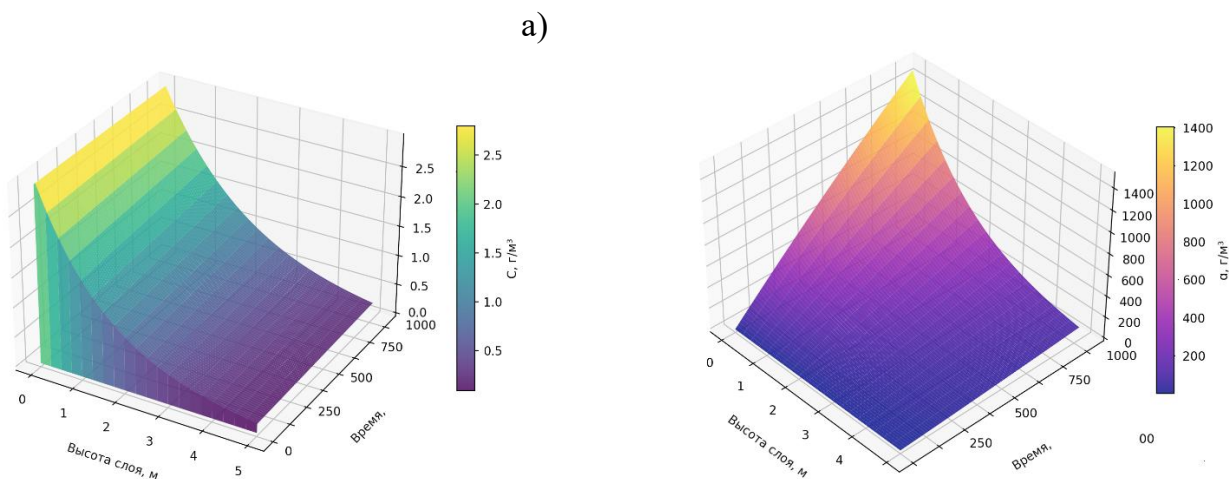


Рис. 17. Зависимость распределения концентрации ЛСН в потоке (а) и ШМП по высоте аппарата (б) и времени процесса

Для численного решения системы уравнений (1)-(3) разработана программа на языке программирования Python 3 с использованием библиотек NumPy, SciPy, Matplotlib. Получены зависимости распределения концентрации ЛСН в потоке (рис. 17 а) и по высоте аппарата (рис. 17 б) и времени адсорбции. Разработана технологическая схема узла адсорбционной доочистки (рис. 18) на ЛОС после флотаторов. Проведена оценка очищаемых водных

сред, которая свидетельствует об отсутствии привносимого вторичного загрязнения, а также биотестирование водной вытяжки ШМП на водорослях хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer)

и дафниях (*Daphnia magna* Straus), свидетельствующее об отсутствии токсичности исследуемых проб.

В четвертой главе представлены исследования по биосорбционной очистке сточных вод промышленных и коммунальных предприятий. На БОС в аэротенках происходит процесс биологической очистки загрязняющих веществ при контакте сточных вод с активным илом. Концентрация растворенного кислорода – 1,5-2 мг/дм³. Доза активного ила – 2,8-3,8 г/дм³. Ранее автором проведено исследование, направленное на использование шлама ВПУ в качестве сорбционного материала в процессе биологической очистки сточных вод в аэротенках. В модельном эксперименте использовали установку, воспроизводящую систему «аэротенк – вторичный отстойник». Показатели сточных вод, поступающих в опытный аэротенк:

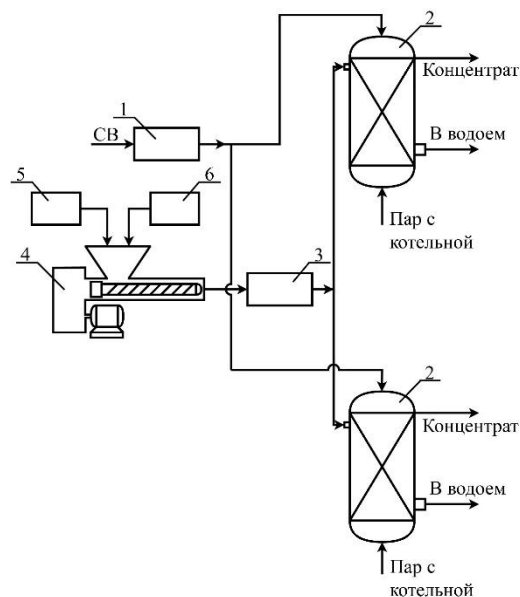


Рис. 18. Адсорбционный узел доочистки сточных вод от АСПАВ

- 1 – емкость сточных вод; 2 – адсорбер;
3 – бункер ШМП; 4 – экструдер; 5 – ленточная сушилка; 6 – бункер связующего.

ХПК = 335 мг О₂/дм³; БПК₅ = 101 мг О₂/дм³; С_{НН₄⁺} = 1,8 мг/дм³; С_{РО₄³⁻} = 0,7 мг/дм³. Экспериментально установлено, что наиболее эффективной является доза шлама в количестве 0,6 г/дм³, при которой происходит очистка до: ХПК = 29 мг О₂/дм³; БПК₅ = 1,5 мг О₂/дм³; С_{НН₄⁺} = 0,1 мг/дм³; С_{РО₄³⁻} = 0,18 мг/дм³. При микроскопировании активного ила вторичных отстойников исследован видовой состав, который показал наличие *Zooglea ramigera*. Между бактериальными клетками ила накапливается коллоидное рыхлое вещество, увеличивающее объем хлопьев.

Седиментационные показатели активного ила являются ключевыми параметрами для оперативного управления работой очистных сооружений. Седиментационный анализ ИАИ проводился по показателям: иловый индекс I (объем 1 г сухого ила, занимаемого через 30 мин отстаивания в 1 дм³) (рис. 19), концентрация взвешенных веществ (рис. 20) в зависимости от дозы (D) шлама ВПУ после осаждения во вторичных отстойниках в течении 2 ч.

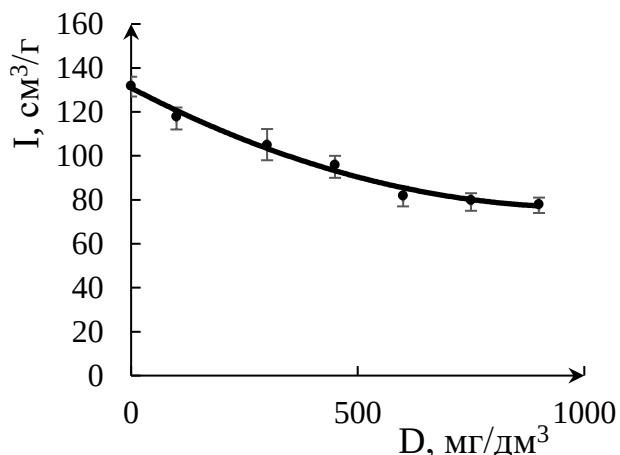


Рис. 19. Седиментационная кривая изменения I от D

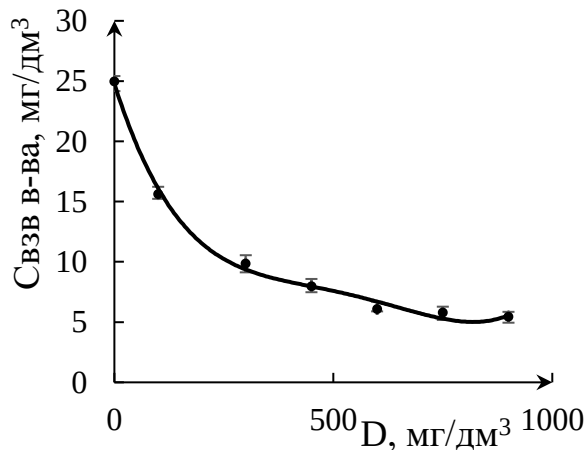


Рис. 20. Изменения концентрации взвешенных веществ от D

Эффективная работа БОС обеспечивается при $I = 60-90 \text{ см}^3/\text{г}$; в случае повышения показателя активный ил становится рыхлым, характеризуется низкой минерализацией. Бактериальные клетки и окружающее их ВПВ, как правило, являются отрицательно заряженными из-за наличия карбоксильной $-\text{COOH}$ группы в экзополисахаридах ВПВ и фосфатной $-\text{PO}_4^{3-}$ группой в клеточных стенках бактерий активного ила. При введении шлама ВПУ в условиях, характерных для аэротенков (слабокислая или нейтральная среда, присутствие CO_2) в воду попадают ионы Ca^{2+} , что способствует электростатическому взаимодействию между Ca^{2+} и $-\text{COOH}$; $-\text{PO}_4^{3-}$.

Введение шлама ВПУ уплотняет хлопья ИАИ и снижает объем осадка. Дозирование шлама ВПУ способствует формированию биологической пленки на его поверхности, что повышает седиментационные свойства ила, снижая значение илового индекса на 40 %, и обеспечивает повышение эффективности удаления взвешенных частиц из сточных вод на 76,3 %.

Изменение значения илового индекса от дозы шлама ВПУ количественно описывается расчетной зависимостью: $I = 130,2e^{-0,637D}$, где I – значение илового индекса, $\text{см}^3/\text{г}$; D – доза вводимого шлама, $\text{г}/\text{дм}^3$, полученной линеаризацией и применением метода наименьших квадратов. Относительная погрешность аналитического выражения не превышает 5 %.

В пятой главе представлено исследование по детоксикации ИАИ от ТМ для его использования в качестве рекультиванта. Выделяют две группы удобрений на основе осадков сточных вод: многокомпонентные питательные грунты для выращивания технических, кормовых культур (I группа) и рекультиванты для восстановления нарушенных земель, откосов, свалок (II группа).

Для оценки качества ИАИ, отводимого с БОС, проведены анализы атомно-эмиссионным и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами на содержание ТМ (табл. 10). Установлено превышение концентрации всех исследуемых ТМ, кроме Pb, относительно нормативных значений I группы удобрений: Cu на 10,6 %; Zn – 279,5 %; Cd – 4,5 %; Ni – 5,2 %; Cr – 30,8 %. Для II группы превышение концентрации ТМ не обнаружено.

Табл. 10. Концентрация ТМ в ИАИ и нормативные значения для рекультивантов на воздушную сухую навеску, $\text{мг}/\text{кг}$

Показатель	Cu	Cd	Ni	Zn	Pb	Cr
ИАИ	$146,1 \pm 1,49$	$2,09 \pm 0,01$	$84,2 \pm 0,71$	$835,62 \pm 1,41$	$82,03 \pm 1,28$	$117,76 \pm 1,24$
Группа I (удобрения)	132	2,0	80,0	220	130,0	90
Группа II (техногрунт)	750	15,0	200,0	1750	250,0	500

Проведен процесс детоксикации в присутствии шлама ВПУ в различных условиях. Выбор дозы (D) проводили по содержанию цинка, так как именно этот ТМ значительно превышает нормативные значения в ИАИ (рис. 21). Установлено, что при введении шлама ВПУ в количестве 0,11 $\text{кг}/\text{кг}$ процесс стабилизируется.

В качестве контрольного образца использовали исходную иловую суспензию (проба I), в которую дозировали шлам ВПУ в количестве 0,11 $\text{кг}/\text{кг}$ сухого вещества ИАИ и проводили процесс детоксикации в условиях пневматической аэрации (проба II) и механического перемешивания (проба III) в течении 2 ч (табл. 11). Пневматическая аэрация обеспечивает поддержание шлама ВПУ во взвешенном состоянии и равномерное распределение по объему иловой суспензии, что приводит к увеличению площади контакта и отсутствию «слепых» зон по всему объему. При механическом перемешивании образуются зоны, в которых детоксикация происходит слабее. При подаче сжатого воздуха через хлопья ИАИ проходят дисперсные пузырьки воздуха, которые обтекают их, не вызывая их механического разрушения. Подача кислорода способствует поддержанию метаболизма ИАИ.

Введение шлама ВПУ при пневматической аэрации позволяет получить рекультивант, удовлетворяющий требованиям I группы. При низких концентрациях ТМ в СВ возможно проводить механическое перемешивание. Таким образом, происходит перераспределение ТМ из биомассы ИАИ в надиловую воду и в минеральную часть шлама. Ca^{2+} конкурирует с ТМ за сорбционные центры на поверхности клеток микроорганизмов ИАИ, вытесняя в надиловую воду. ТМ образуют комплексы с продуктами жизнедеятельности бактерий и ВПП.

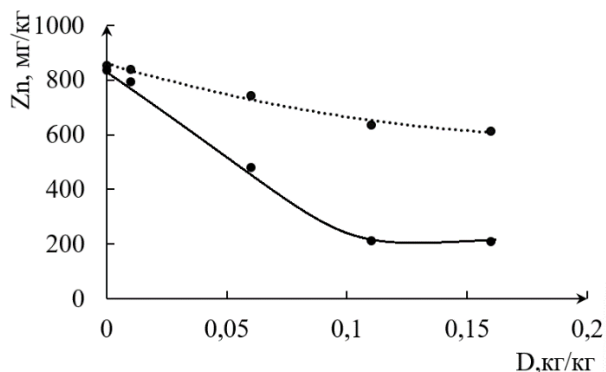


Рис. 21. Изменение содержания Zn от введенной дозы (D) шлама ВПУ:
— пневматическая аэрация;
— — — механическое перемешивание.

Результаты изменения концентрации ионов ТМ (Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+} , Cu^{2+}) в надиловой воде во времени представлены на рис. 22 (а-г).

Табл. 11. Содержание ТМ при детоксикации шлагом ВПУ

С _{ТМ} , мг/ кг	Проба осадка		
	I	II	III
Cu	146,1±1,49	81,26±1,04	102,58±1,15
Cd	2,09±0,01	0,62±0,01	1,51±0,01
Ni	84,2±0,71	44,02±0,78	70,10±1,14
Pb	82,03±1,28	23,27±0,45	61,04±0,74
Zn	835,62±1,41	211,17±1,93	637,42±2,08
Cr	117,76±1,24	76,21±1,15	92,24±0,88

с частичным возможным осаждением в виде $\text{Cu}(\text{OH})_2$ и попаданием в водную среду. В надиловой воде концентрация Cd^{2+} , Pb^{2+} не определяется. Причиной этого может выступать деструкция органических комплексов Cd^{2+} , Pb^{2+} под действием шлама ВПУ с последующим осаждением в виде CdCO_3 и PbCO_3 . После введения шлама ВПУ отсутствовали негативные последствия для микрофлоры активного ила. При микроскопировании отсутствуют морфологические изменения, микроорганизмы остались жизнеспособными при постоянной численности. Поэтому детоксицированный ИАИ возможно направить на БОС для очистки сточных вод или использовать в качестве вторичного ресурса.

Проведен анализ ИАИ после детоксикации путем прямого поверхностного посева разведения суспензии на поверхность среды Эндо для оценки количества бактерий группы кишечной палочки (БГКП). При микроскопировании отсутствовали патогенные микроорга-

Комплексные соединения с Ca^{2+} являются более стабильными, чем органические лиганды. Возможно осаждение в виде карбонатов, гидроксидов на поверхности шлама ВПУ. ТМ способны включаться в кристаллическую решетку CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$. На поверхности шлама ВПУ присутствуют функциональные группы гуминовых веществ ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ и пр.), способные образовывать устойчивые связи с ТМ и труднорастворимые комплексы.

ТМ из биологически доступной формы частично переходят в инертную, прочно связанную минеральную форму, в составе шлама ВПУ, и частично выводятся в надиловую воду.

В надиловую воду поступают Ni^{2+} , Zn^{2+} , так как комплексные соединения этих ТМ легко разрушаются шлагом ВПУ с переходом в карбонатные/гидрокарбонатные формы и надиловую воду. Ионы Cr^{6+} при изменении pH в сторону слабощелочной среды (pH = 8,3) попадают в надиловую воду из-за разрушения нестабильных комплексов хрома с органическими веществами ИАИ. При введении шлама ВПУ происходит разрушение комплексов меди с органическими веществами и перераспределение в другие растворимые формы (органические хелаты, коллоидные растворы, гидроксокомплексы)

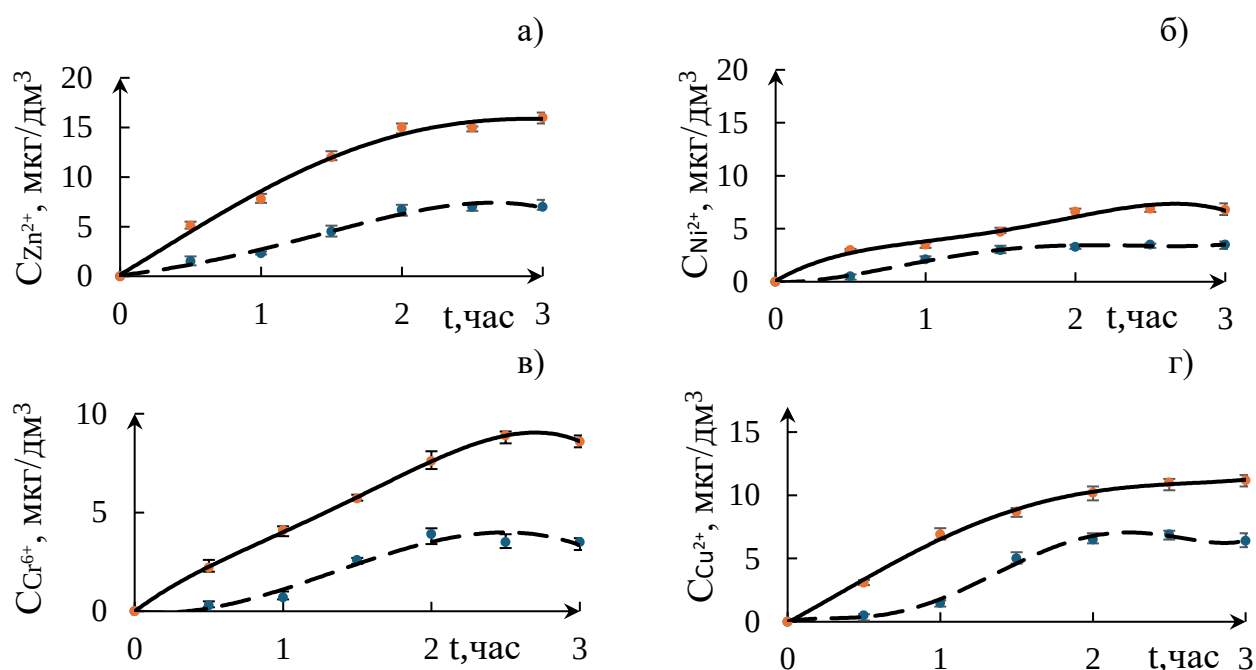


Рис. 22. Кинетическая кривая изменения концентрации Zn^{2+} (а); Ni^{2+} (б); Cr^{6+} (в); Cu^{2+} (г) в надиловой воде при:

— пневматической аэрации; ——— механическом перемешивании

низмы, яйца гельминтов и цисты кишечных патогенных простейших, жизнеспособные личинки и куколки синантропных мух. Сравнительная оценка санитарно-бактериологических и санитарно-паразитологических показателей качества ИАИ с нормативными значениями для рекультивантов I и II группы осадков приведена в табл. 12.

Табл. 12. Сравнительная оценка санитарных показателей качества ИАИ

Показатель	Норматив для группы		Проба	
	I	II	II	III
БГКП, кл./г	100	1000	90	450
Патогенные микроорганизмы, кл./г	Отсутствует		Отсутствует	
Яйца геогельминтов и цисты кишечных патогенных простейших, экз./кг	Отсутствует		Отсутствует	

Бактериологическая опасность ИАИ, обработанного шламом ВПУ ТЭС, не обнаружена. Предлагается проводить детоксикацию ИАИ в цехе при его модернизации (рис. 23). Подача шлама ВПУ осуществляется из бункера хранения 1. Детоксикация проводится в смесителе 2 при пневматической аэрации. Осадок отводится на центрифуги и вывозится грузовым транспортом на собственные нужды предприятия либо поступает на упаковку в биг-беги по 800-1000 кг в качестве потребительского продукта.

Проведена оценка класса опасности необработанного и детоксицированного ИАИ расчетным и экспериментальным путем. Установлено снижение суммарного индекса опасности К с 2,15 до 0,93, что свидетельствует о снижении антропогенной нагрузки. Снижается вероятность миграции ТМ в грунтовые воды и почву, так как снижение К достигнуто за счет компонентов с высокой подвижностью и токсичностью (например, Cd).

В результате экотоксикологических исследований на двух тест-объектах: ракообразных *Daphnia magna* Str. и рыбах *Poecilla reticulata* Pet. установлено, что отходы и надиловые воды не оказывают острого токсического действия.

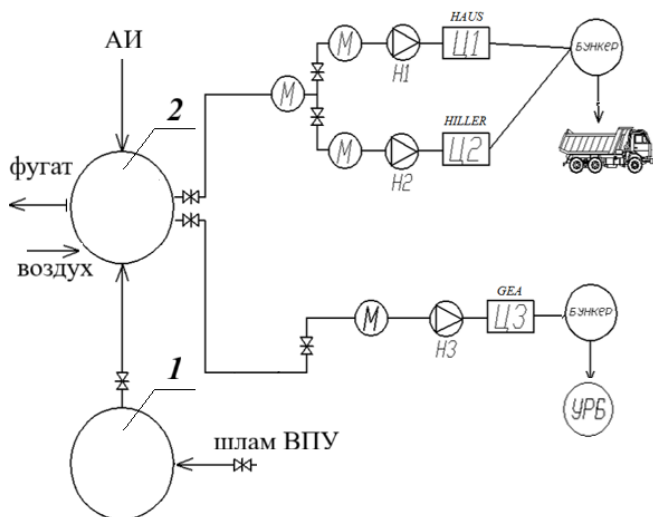


Рис. 23. Технологическая схема детоксикации ИАИ шламом ВПУ

1 – бункер хранения шлама ВПУ;

2 – смеситель; М – мацератор; Ц – центрифуга;

Н – насос; УРБ – узел разгрузки бигбегов.

позволяет достичь требуемого $I_{ц}$ за счет разрыва коллоидных систем ИАИ и выхода гидратно-связанной влаги. Нарушается агрегативная устойчивость ИАИ, что повышает влагоотдачу

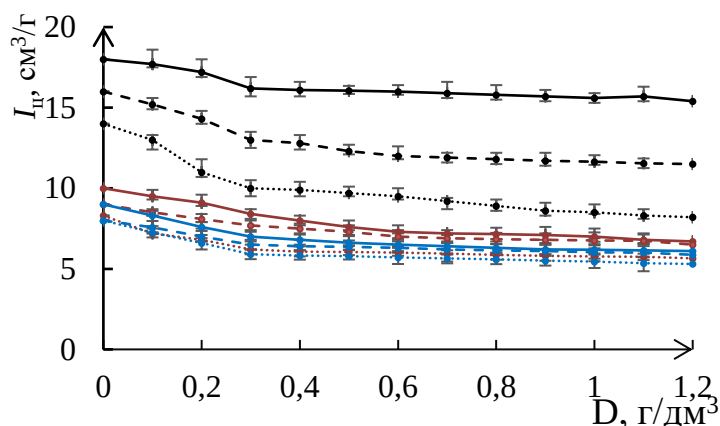


Рис. 24. Зависимость $I_{ц}$ от вводимой дозы шлама (D):

(черная) – 500 об/мин, (оранжевая) – 1000 об/мин,

(синяя) – 1500 об/мин;

— 1 мин, --- 2 мин, -.-.- 3 мин

расход фугата – 2156,6 м³/сут; количество центрифуг – 3 шт. Осадок $W \approx 52\%$ направляется на осушку и формование ТРГ диаметром 5-7 мм с применением связующих: ЛСТ и крахмала технического (рис. 26).

Проведено определение технических характеристик и calorиметрически определены теплоты сгорания ТРГ (табл. 13). Выбраны ТРГ с ЛСТ, так как они имеют более высокое значение теплоты сгорания – 12,73 МДж/кг, сравнимое с теплотой сгорания торфа. Проведен элементный CHNS-анализ ТРГ с ЛСТ (% масс.): $C^p = 30,1 \pm 0,03$; $H^p = 2,952 \pm 0,006$; $S^p = 1,108 \pm 0,005$; $N^p = 1,246 \pm 0,008$.

Проведено биотестирование водной вытяжки золы после сжигания ТРГ на водорослях хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) и дафниях (*Daphnia magna* Straus), свидетельствующее о том, что зола не оказывает токсического действия.

В шестой главе исследуется вопрос энергетического использования топливных рециклинг-гранул (ТРГ) ИАИ с применением шлама ВПУ ТЭС и предварительной очистки уходящих газов от твердых частиц.

Многотоннажный отход БОС, образующийся в количестве 17,06 т/сут, после обезвоживания рассматривается как потенциальный энергетический ресурс. Проведено центрифугирование неуплотненного ИАИ и шлама ВПУ. Оценку степени обезвоживания проводили по индексу центрифугирования $I_{ц} = V_y / (V_0 \cdot C)$, где V_y и V_0 – объем уплотненного и исходного ИАИ, см³. Удовлетворительным значением принято $I_{ц} \leq 6 - 8$ (рис. 24). Центрифугирование в течение 1 мин со скоростью 1000 об/с ИАИ при обработке 0,6 г/дм³ шлама ВПУ позво-

ляет достичь требуемого $I_{ц}$ за счет разрыва коллоидных систем ИАИ и выхода гидратно-связанной влаги. Нарушается агрегативная устойчивость ИАИ, что повышает влагоотдачу осадка, твердая фаза легко отделяется от фугата. Использовали экспресс-метод, основанный на капиллярном поглощении влаги ИАИ фильтровальной бумагой (рис. 25), предложенный проф. Б.С. Ксенофоновым. При введении шлама получен более высокий подъем столба жидкости за счет перехода влаги гидратных оболочек ИАИ в свободную влагу.

Произведен расчет параметров работы осадительной центрифуги типа HAUS DDE 5342, установленной в цехе механической осушки. Массовый расход осадка с одной центрифуги – 11,4 т/сут; объемный

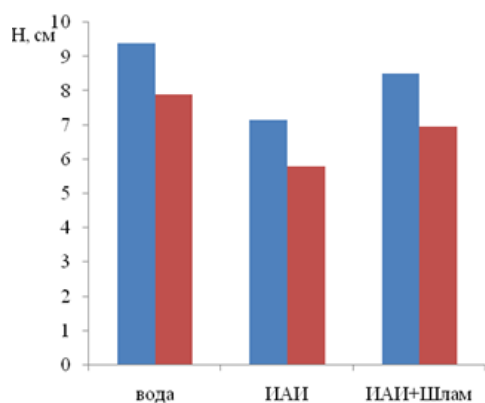


Рис. 25. Водоотдача ИАИ и шлама ВПУ на фильтре «синяя» ($d = 2-3$ мкм) и «белая» ($d = 8-12$ мкм) лента



Рис. 26. ТРГ:
1 – связующее ЛСТ; 2 – крахмал

Табл. 13. Характеристики ТРГ

Образцы со связующими	Крахмал (22 % масс.)	ЛСТ (22 % масс.)
Влажность, %	$4,8 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,1$
Насыпная плотность, кг/м ³	$828 \pm 0,5$	$788 \pm 0,5$
Зольность, %	$29,2 \pm 0,2$	$27,9 \pm 0,1$
Цвет золы	серый	серо-коричневый
Прочность на истирание, %	$0,5 \pm 0,001$	$0,1 \pm 0,002$
Теплота сгорания, кДж/кг	11965	12732

Технология подготовки ТРГ представлена на рис. 27. Перемешивание, предварительное обезвоживание, сушка, формирование отходов осуществляется в аппаратах 3-6.



Рис. 27. Технологическая схема подготовки ТРГ:

1 – бункер хранения шлама ВПУ; 2 – накопитель ИАИ; 3 – бункер перемешивания осадка; 4 – декантер; 5 – ленточная сушилка; 6 – экструдер; 7 – бункер хранения ТРГ

Далее ТРГ направляются на термическую утилизацию в промышленности. Для этого могут быть использованы вращающиеся печи цементных производств или топки с «кипящим» слоем энергетических котлов. При массовом расходе ТРГ 1035 кг/ч объемный расход дымовых газов составит 1,39 м³/с. Рассчитан максимальный размер уносимых из топочного устройства частиц – 0,33 мм.

Газовые выбросы с дисперсной фазой подаются на систему предварительной золоочистки и охлаждения, представленную на рис. 28. Загрязненные газовые среды поступают на пленочный скруббер 1 для выделения твердых частиц и частичного охлаждения газов, после чего направляются на доочистку. В скруббере 1 образуется нагретая суспензия, подаваемая в водно-водяной теплообменник 2 и разделяемая в комбинированном аппарате 3. Отвод продуктов осуществляется в бункер сбора дисперсной фазы 4. Дисперсная фаза может утилизироваться в строительстве. При среднем удельном расходе тепла 3300 МДж/т за счет

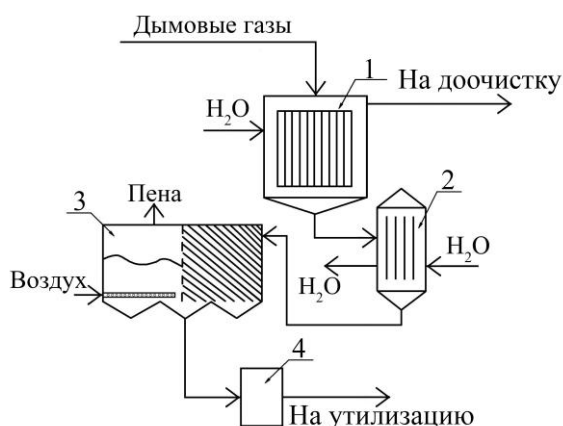


Рис. 28. Технологическая схема предварительной золоочистки и охлаждения дымовых газов:

- 1 – скруббер очистки газов; 2 – теплообменник; 3 – аппарат разделения суспензии; 4 – бункер сбора дисперсной фазы

В скруббере газы контактируют с водой, образуя пену. Пену и воздух направляют в аппарат разделения суспензии. В аппарате разделения суспензии дисперсная фаза направляется в бункер сбора дисперсной фазы. Из бункера дисперсная фаза направляется на утилизацию.

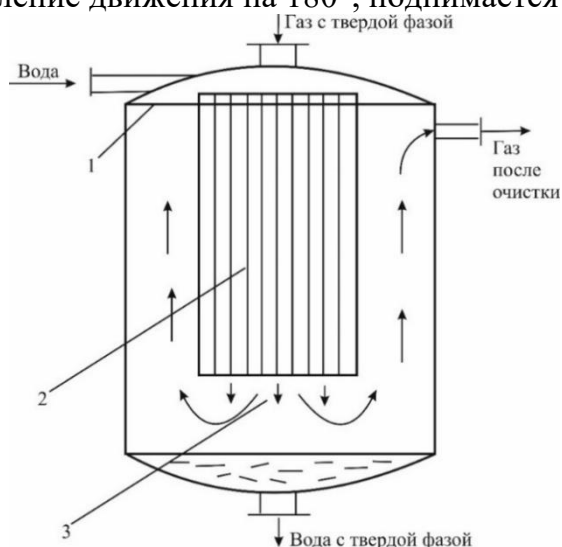


Рис. 29. Схема аппарата «мокрой» очистки газов:

- 1 – боковой штуцер; 2 – прямоточные элементы; 3 – инерционная зона.

Газовый поток с дисперсной фазой поступает в аппарат через верхний патрубок, где через боковой штуцер подается вода, распределяемая по поверхности вертикальных трубок в виде нисходящей пленки и перемещающаяся с газовым потоком в нижнюю часть, где за счет силы инерции оседает с уловленной дисперсной фазой и выводится через нижний патрубок. Очищенный поток газа меняет направление движения на 180°, поднимается в верхнюю часть и выводится через боковой штуцер.

В математическом описании рассматриваются одновременно протекающие процессы осаждения дисперсных частиц и охлаждения уходящих газов. При охлаждении газа при контакте с водой практически все сопротивление переносу теплоты и массы сосредоточено в газовой фазе.

На основе применения аналогии Льюиса $\alpha_g/\beta_g = \rho_g c_{pg}$, где c_{pg} – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К), α_g – коэффициент теплоотдачи в газовой фазе, Вт/(м²·К); ρ_g – плотность газа, кг/м³; а также выражения для энтальпии газа $I_g = (c_{pg} + c_{rp}x)T_g + rx$, где c_{rp} – удельная теплоемкость водяного пара, Дж/(кг·К); r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; x – влагосодержание газа, кг/кг, поток теплоты записывается в форме:

$$Q = G(I_{гн} - I_{гк}) = \beta_x F \Delta I_{г,ср}, \quad (4)$$

$$M = G(C_n - C_k) = u_t \rho_g F \Delta C_{ср}, \quad (5)$$

где u_t – коэффициент скорости турбулентной миграции частиц, м/с; C_n, C_k – начальная, конечная концентрации частиц, кг/кг; ΔC_{cp} – средняя движущая сила переноса частиц, кг/кг.

Выражения (4) и (5) записаны для условия идеального вытеснения газа и жидкости. Для определения реальной эффективности охлаждения и очистки газов от тонкодисперсной фазы можно использовать различные подходы, математические модели и полуэмпирические выражения.

При расчете пленочного аппарата для процесса совместного тепломассообмена и сепарации дисперсной фазы использованы одномерные дифференциальные уравнения переноса с эффективными коэффициентами турбулентной диффузии, теплопроводности и турбулентной диффузии частиц. При применении модели Д. Тейлора двумерное уравнение конвективной диффузии сведено к одномерному через коэффициент эффективной диффузии, который при турбулентном режиме движения сплошной среды записывается в виде уравнения $D_{эф.г} = bu_*R_э$, где u_* – динамическая скорость, м/с, связанная с касательным напряжением трения $\tau_{ст}$ в форме $u_* = \sqrt{\tau_{ст}/\rho_г}$; тогда $D_{эф.г} = R_э b \sqrt{\tau_{ст}/\rho_г}$; $R_э$ – эквивалентный радиус канала, м; b – эмпирический коэффициент (для цилиндрического канала $b \approx 10,0$). Тогда система одномерных уравнений переноса теплоты, массы влаги и дисперсной фазы:

$$\rho_г w_г \frac{dI_г}{dz} = \lambda_{эф.г} \frac{dT_г}{dz^2} + \beta_x a_v (I_г - I_г^*), \quad (6)$$

$$\rho_ж u_ж c_{рж} \frac{dT_ж}{dz} = \lambda_{эф.ж} \frac{dT_ж}{dz^2} - \beta_x a_v (I_г - I_г^*), \quad (7)$$

$$I_г = (c_{рг} + c_{рп}x)T_г + rx, \quad (8)$$

$$w_г \frac{dx}{dz} = D_{эф.г} \frac{d^2x}{dz^2} + \beta_г a_v (x - x^*), \quad (9)$$

$$w_г \frac{dC_ч}{dz} = D_{эф.ч} \frac{d^2C_ч}{dz^2} + u_t a_v (C_ч - C_{гр}), \quad (10)$$

где z – вертикальная координата, м; $I_г$ – энтальпия газа, Дж/кг; $T_г$ – температура газа, °C; $I_г^*$ – энтальпия газа на линии насыщения, Дж/кг (при $T_ж$ и $\varphi = 100\%$), где φ – относительное влагосодержание; a_v – удельная межфазная поверхность, м²/м³; $a_v = 4/(d_o - 2\delta_{пл})$; $\rho_ж$ – плотность жидкости, кг/м³; $c_{рж}$ – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·K); x – влагосодержание, кг/кг; x^* – влагосодержание на линии насыщения ($T_ж$ и $\varphi = 100\%$), $\beta_x, \beta_г$ – коэффициенты массоотдачи, кг/(м²·с) и м/с; u_t – коэффициент скорости турбулентной миграции частиц, м/с; $C_ч$ – концентрация частиц, кг/кг; $C_{гр}$ – концентрация частиц на межфазной поверхности, кг/кг ($C_{гр} = 0$, т.к. частица перешла в жидкую фазу и покинула газовую); $D_{эф.г}$ – эффективный коэффициент диффузии в газовой фазе, м²/с; $D_{эф.ч}$ – эффективный коэффициент диффузии частиц, м²/с; $\lambda_{эф.г}$ и $\lambda_{эф.ж}$ – эффективные коэффициенты теплопроводности в газовой и жидкой фазах, Вт/(м·K).

Между эффективными коэффициентами известна связь:

$$\lambda_{эф.г} = D_{эф.г} \rho_г c_{рг}; \lambda_{эф.ж} = D_{эф.ж} \rho_ж c_{рж}; D_{эф.ч} = \frac{D_{эф.г}}{1 + \omega_E \tau_p}, \quad (11)$$

где ω_E – частота энергоемких пульсаций, с⁻¹; τ_p – время релаксации частиц, с.

Эффективный коэффициент диффузии в волновой пленке можно вычислить по известному выражению:

$$D_{эф.ж} = \nu_ж + 0,17 \cdot 10^{-4} \nu_ж^{1/6} (Re_{пл}^{0,5} - Re_{вол}^{0,5}), \quad (12)$$

где $Re_{вол} \approx 20$ – число Рейнольдса начала волнообразования пленки.

Коэффициент массоотдачи (число Шервуда) в газовой фазе получен на основе трехслойной модели турбулентного пограничного слоя. Коэффициент сопротивления находится

при известном из эксперимента перепаде давления в канале по выражению Дарси-Вейсбаха, а динамическая скорость из уравнения баланса сил:

$$\xi_{\text{оп}} = \frac{2d_3 \Delta P_{\Gamma}}{H \rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}, u_* = w_{\Gamma} \sqrt{\xi_{\text{оп}}/8}. \quad (13)$$

Для расчета безразмерной скорости турбулентной миграции частиц $u_t^+ = u_t/u_*$ применяются выражения: при $\mu_p^2 \tau^+ \leq 16,6$ $u_t^+ = 7,25 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\tau^+}{1 + \omega_E \tau_p} \right)^2$; при $\mu_p^2 \tau^+ > 16,6$ $u_t^+ = 0,2$, где безразмерный параметр $\mu_p = 1/(1 + \omega_E \tau_p)^{0,5}$; частота энергоемких пульсаций $\omega_E = u_*/(0,05d_3)$; время релаксации $\tau_p = d_4^2 \rho_{\text{ч}}/(18\rho_{\Gamma} \nu_{\Gamma})$, безразмерное время релаксации $\tau^+ = \tau_p u_*^2/\nu_{\Gamma}$.

Для численного решения системы уравнений (6)-(10) записаны граничные условия: на входе: $T_{\Gamma} = T_{\Gamma, \text{вх}}; T_{\text{ж}} = T_{\text{ж, вх}}; x = x_{\text{вх}}; C_{\text{ч}} = C_{\text{ч, вх}}$; на выходе: $dT_{\Gamma}/dz = 0; dT_{\text{ж}}/dz = 0; dx/dz = 0; dC_{\text{ч}}/dz = 0$.

Начальная энтальпия газа $I_{\text{н}}$ зависит от температуры газа $T_{\text{гн}}$ и влагосодержания $x_{\text{н}}$ и находится по известному выражению $I_{\text{н}} = (c_{\text{рг}} + c_{\text{рп}} x_{\text{н}}) T_{\text{гн}} + r x_{\text{н}}$. Таким образом, для расчета полей температур $T_{\Gamma}(z)$, $T_{\text{ж}}(z)$ и влагосодержания $x(z)$ решается система уравнений (6)-(10). На каждом шаге итераций в зависимости от полученных профилей $T_{\Gamma}(z)$ и $T_{\text{ж}}(z)$ уточняются теплофизические свойства газа и жидкости. Результаты расчетов представлены в табл. 14.

С точки зрения энергозатрат и температуры охлаждения газа наиболее предпочтительной является скорость газа в трубке $w_{\Gamma} = 20$ м/с, однако, при этом число трубок и диаметр аппарата будет больше, чем при $w_{\Gamma} = 35$ м/с. Диаметр внутреннего корпуса с трубками при числе трубок $n = 88$ составит 0,4 м, диаметр наружного корпуса – 1,15 м. Скорость газа в кольцевом сечении между корпусами принята $w_{\text{к}} = 1,0$ м/с, чтобы исключить унос дисперсной фазы из нижней части аппарата в верхнюю. При $q_{\text{ж}} = 1,13$ м³/(м·ч) и $n = 88$ расход воды равен $1,82 \cdot 10^{-3}$ м³/с или 6,55 м³/час.

Табл. 14. Результаты расчетов скруббера очистки газов

Параметр	Значение	
Скорость газа, м/с	20	35
Удельный расход воды в трубке, м ³ / (м·ч)	1,13	
Объемный расход воды, м ³ /ч	6,55	3,72
Массовый расход газа в трубке, кг/с	$6,23 \cdot 10^{-3}$	0,011
Температура газа на выходе из аппарата, °С	66,5	80
Температура воды на выходе из аппарата, °С	28,3	32,6
Число трубок, шт	88	50
Перепад давления, Па	2700	6100
Мощность на подачу газа в аппарат, кВт	1,63	3,73

Расчет профиля концентрации аэрозольных частиц уравнения (10) указывает на довольно высокую эффективность сепарации $\eta = (C_{\text{н}} - C_{\text{к}})/C_{\text{н}}$, которая при $w_{\Gamma} = 20$ м/с и $q_{\text{ж}} = 1,13$ м³/(м·ч) и $H = 1,0$ м составляет для частиц с средним диаметром $d_{\text{ч}} = 3$ мкм, $\eta = 0,985$; для $d_{\text{ч}} = 2$ мкм, $\eta = 0,62$; для $d_{\text{ч}} = 1,5$ мкм, $\eta = 0,27$ и для $d_{\text{ч}} = 1$ мкм, $\eta = 0,06$.

Получено, что при $d_{\text{ч}} > 3$ мкм практически все частицы улавливаются жидкой фазой, $\eta = 0,985$. На рис. 30 приведена зависимость эффективности сепарации от диаметра частиц. Из решения уравнения (10) установлено, что как при увеличении скорости газа, так и плотности орошения, эффективность сепарации очень мелких частиц (1-2 мкм) существенно повышается, однако, при этом происходит значительный рост гидравлического сопротивления орошаемого канала и увеличение мощности на подачу газа. Поэтому целесообразно

проводить очистку газа в аппарате с прямотоком фаз при скорости газа в трубках $w_r = 20$ м/с. При этом мощность на подачу газа с учетом всех гидравлических сопротивлений аппарата составляет около $N_w = 2$ кВт.

После аппарата «мокрой» очистки газов для очистки загрязненной воды разработан комбинированный аппарат разделения суспензий, содержащий секцию тонкослойного отстаивания и секцию флотационной очистки (рис. 31). В секции тонкослойного отстаивания расположены плоские параллельные пластины под углом 45° - 60° , на которых осаждаются более крупные частицы суспензии. Во второй секции флотационной очистки удаляются мелкие частицы, не осевшие в зоне гравитационного осаждения.

Частицы, поступающие в секцию тонкослойного отстаивания, имеют различную дисперсность $d_{\text{ч}} = 1$ -330 мкм, поэтому, по размерам частиц, проведена оценка критерия: $Re_{\text{ч}} = u_{\text{ос}} \cdot d_{\text{ч}} / \nu_{\text{ж}}$, где $u_{\text{ос}}$ – скорость осаждения частицы, м/с.

При $Re_{\text{ч}} < 1$ режим движения ламинарный, скорость движения частицы рассчитывается по формуле Стокса. При $Re_{\text{ч}} > 1$ режим движения переходный, тогда $u_{\text{ос}}$:

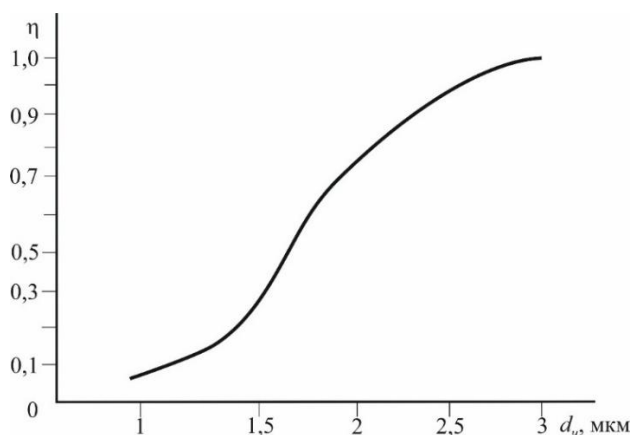


Рис. 30. Зависимость η от $d_{\text{ч}}$ при $w_r = 20$ м/с, $q_{\text{ж}} = 1,13$ м³/ (м·ч) и $H = 1,0$ м

$$u_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\rho_{\text{ж}}} g \frac{d_{\text{ч}}}{\xi}}, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м²/с²; ξ – коэффициент сопротивления: $\xi = 24/Re_{\text{ч}} + 4Re_{\text{ч}}^{-1/3}$. В результате расчетов установлено, что для $d_{\text{ч}} = 165$ -330 мкм характерен переходный режим $Re_{\text{ч}} > 1$; для $d_{\text{ч}} < 165$ мкм – ламинарный.

При инерционном осаждении частиц локальная эффективность инерционного осаждения частиц на пузырек записывается в известной форме:

$$\eta_u = \left(\frac{St}{St + 0,35} \right)^2, \quad (15)$$

где St – число Стокса.

В результате расчетов получена зависимость изменения скорости оседания частиц от их диаметра. Для определения профиля концентрации частиц по длине флотационной секции возможно использовать однопараметрическую диффузионную модель с объемным источником оседающих на пузырьки частиц в виде:

$$u_{\text{ж}} dC/dz = D_{\text{п}} d^2C/dz^2 + ja_v/\rho_{\text{ж}}, \quad (16)$$

где $u_{\text{ж}}$ – средняя скорость жидкости, м/с; C – концентрация частиц, кг/кг; z – продольная координата, м; a_v – удельная поверхность пузырей, м²/м³; j – удельный поток массы оседающих частиц на пузырьки, кг/м²·с; $D_{\text{п}}$ – коэффициент продольного переме-

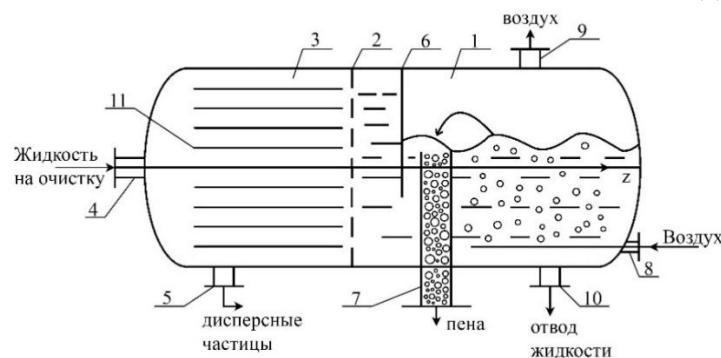


Рис. 31. Комбинированный аппарат

1 – секция флотации; 2 – перфорированная перегородка; 3 – секция тонкослойного отстаивания; 4,5 – патрубки для входа жидкости и вывода дисперсных частиц; 6 – перегородка; 7 – выход пены; 8 – вход воздуха; 9 – патрубок выхода воздуха; 10 – отвод очищенной жидкости; 11 – пластины тонкослойного отстойника (ось z – направление движения жидкости).
шивания, м²/с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Для определения эффективности флотации частиц, которые полностью или с некоторой инерционностью увлекаются турбулентными пульсациями среды, из аппроксимации (16) в виде ячеечной модели получено выражение:

$$\eta_T = 1 - (1 + (6\beta_d \phi_T H / d_{\text{п}} u_{\text{ж}}))^{-1}, \quad (17)$$

где H – длина секции, м; $d_{\text{п}}$ – диаметр пузыря, м; β_d – коэффициент средней скорости турбулентной миграции частиц, м/с, который записывается с погрешностью $\pm 12\%$ в виде:

$$\beta_d = 0,3[v_{\text{ж}} g \omega_T (1 - \phi_T)^2]^{0,25} (1 + \omega_E \tau_p)^{-1}, \quad (18)$$

где $\omega_E = u_* / 0,1R$ – частота энергоемких пульсаций, м/с; $\tau_p = 4r_{\text{ч}}^2 |\Delta\rho| / 18\mu_{\text{ж}}$ – время релаксации частицы, с; ϕ_T – среднее газосодержание слоя, м³/м³.

По выражениям (17) и (18) вычисляется эффективность флотации в зависимости от механизмов осаждения частиц на пузырек. Общая эффективность флотации находится по:

$$\eta_{\text{фл}} = 1 - (1 - \eta_T)(1 - \eta_u). \quad (19)$$

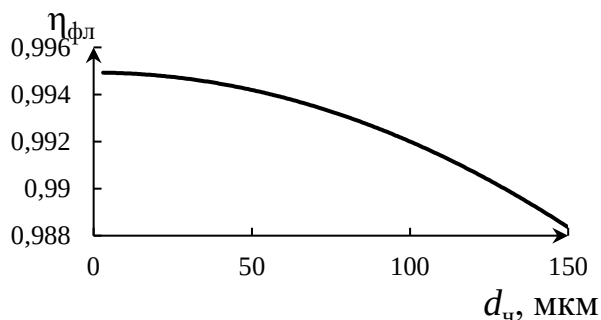


Рис. 32. Изменение $\eta_{\text{фл}}$ от $d_{\text{ч}}$ при $d_{\text{п}} = 0,0069$ м

$u_* = 0,0044$ м/с; $\omega_E = 2097,2$ с⁻¹.

С учетом того, что площадь, занимаемая барботерами, составляет 10 %, и $V_T = 6,3 \cdot 10^{-6}$ м³/с; тогда $d_{\text{п}} = 0,0069$ м. Проведен расчет эффективности флотации для частиц, увлекаемых турбулентными пульсациями среды путем расчета коэффициентов средней скорости турбулентной миграции частиц различного диаметра (≤ 150 мкм) по (18). Рассчитано $\phi_T = 0,19$;

В результате расчета времени релаксации капель и значений коэффициента средней скорости турбулентной миграции определены значения эффективности флотации частиц, увлекаемых турбулентными пульсациями, от их диаметра (рис. 32). В табл. 15 представлены результаты расчета комбинированного аппарата разделения суспензий.

Табл. 15. Результаты расчета комбинированного аппарата разделения суспензий

Секция тонкослойного отстаивания		Флотационная секция	
Размер осаждаемых частиц, мкм	150-330	Средний диаметр пузыря, мм	6,9
Поверхность осаждения, м ²	150	Размер флотируемых частиц, мкм	3-150
Удельная поверхность пластин, м ² /м ³	49	Перепад давления на барботаже, Па	9954
Скорость течения жидкости, м/с	0,0023	Мощность на подачу газа, кВт	2,0
Время пребывания в аппарате, с	1661	Время пребывания в аппарате, с	435
Диаметр аппарата, м	1,0	Длина секции, м	1,0
Длина секции, м	3,8		

В восьмой главе приведены технико-экономическое обоснование и расчет предотвращенного экологического вреда при внедрении технологий адсорбционной очистки сточных вод ШМП, детоксикации ИАИ и термической утилизации. Адсорбционная очистка сточных вод ШМП рентабельна. Себестоимость очистки сточных вод от АСПАВ ШМП составляет 3,78 руб./м³; себестоимость ШМП – 51,47 руб./кг. Срок окупаемости – 0,5 года. Экономический эффект от предлагаемой технологии – 14,56 млн руб./год. Предотвращенный экологический вред водоему р. Кама от сброса сточных вод, загрязненных ПАВ, составит 21,42 млн руб./год.

Обоснована экономическая эффективность технологии детоксикации ИАИ при модернизации цеха механической осушки. При реализации 100 т отхода выручка от ИАИ как почвогрунта – 220 тыс. руб./год. Срок окупаемости технологии – 2 года 1 месяц.

Экономический эффект технологии – 200 тыс. руб./год. Суммарный предотвращенный экологический вред, причиненный почвам, составляет 453,7 тыс. руб./год.

Технология термической утилизации ТРГ в цементных печах является целесообразной, срок окупаемости составит 1 год 2 месяца. Суммарный предотвращенный экологический вред воздуху в стоимостной оценке составит 12,02 млн руб./год. Себестоимость ТРГ – 7,16 тыс. руб./т. Экономический эффект от внедрения технологии – 8,58 млн руб./год (в ценах на начало 2026 года).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации согласно поставленным цели и задачам разработаны научно-технические и технологические решения системы комплексной утилизации отходов энергетики и жилищно-коммунального хозяйства для повышения экологической безопасности и эффективности при их использовании в качестве вторичных материальных ресурсов.

1. На основе изотерм адсорбции научно обоснован способ очистки сточных вод от АСПАВ в статических условиях гранулированным сорбционным материалом на основе шлама ВПУ ТЭС, модифицированного парафином (ШМП), полученном введением нагретого до 65 °С парафина в количестве 30 % масс. в шлам ВПУ с последующим охлаждением до температуры 25 °С, при сбросах загрязненных сточных вод с концентрацией ≤ 45 мг/дм³;

2. Экспериментально установлен механизм физической сорбции АСПАВ из сточных вод на основании термодинамических характеристик процесса адсорбции ЛСН ШМП: энтальпия процесса адсорбции -14,46 кДж/моль, что свидетельствует об экзотермичности процесса; отрицательное значение стандартной энергии Гиббса -8,67 кДж/моль, свидетельствующее о самопроизвольном протекании процесса адсорбции. Исследованы кинетические характеристики процесса адсорбции. Энергия активации адсорбции составляет 7,64 кДж/моль. Рассчитаны константы адсорбционного равновесия по модели Ленгмюра, наиболее точно описывающее процесс. Характеристическая свободная энергия адсорбции ЛСН ШМП составляет 6,65 кДж/моль.

3. Исследована и экспериментально подтверждена возможность доочистки сточных вод от АСПАВ (при концентрации ≤ 3 мг/дм³) при пропускании сточных вод через неподвижный слой ШМП, динамическая сорбционная емкость которого составляет 5,91 мг/г, коэффициент защитного действия 220,2 ч/м, до значений НДС.

4. На основе результатов экспериментальных исследований научно обоснована способность шлама ВПУ повышать седиментационные свойства активного ила за счет снижения значения илового индекса путем электростатического взаимодействия между Ca^{2+} и COOH и PO_4^{3-} . Определена доза шлама ВПУ 0,6 мг/дм³, способствующая снижению показателя илового индекса на 40 % и получена аналитическая зависимость. Исследована и экспериментально подтверждена закономерность, связывающая дозу вводимого шлама 0,6 мг/дм³ с концентрацией взвешенных веществ, которая снижается на 76,3 %.

5. На основании атомно-эмиссионного и масс-спектрального с индуктивно связанной плазмой методов анализа обоснован механизм процесса детоксикации ИАИ от ионов ТМ при дозировании шлама ВПУ в количестве 0,11 кг/кг при проведении пневматической аэрации, позволяющий повысить эффективность детоксикации ТМ: Cu на 44,5 %; Cd – на 70,3 %; Ni – на 47,6 %; Pb – 71,6 %; Zn – 74,7 %; Cr – 35,3 %, с получением рекультиванта многокомпонентных питательных грунтов. Проведена оценка санитарно-бактериологических и санитарно-токсикологических показателей детоксицированного ИАИ, которая показала, что ИАИ, обработанный шламом ВПУ при различных условиях, возможно использовать в качестве рекультиванта I и II группы. В результате проведенной детоксикации ИАИ является экологически безопасным продуктом, который можно использовать в качестве почвогрунта, а также в качестве вторичного материального ресурса.

6. Исследован процесс обезвоживания ИАИ путем центрифугирования отхода совместно с шламом ВПУ. Дозирование шлама ВПУ в количестве 0,6 г/дм³ способствует разрыву коллоидных систем и повышенному выходу гидратно-связанной влаги ИАИ, а также нарушению агрегативной устойчивости ИАИ, что способствует повышению влагоотдачи.

7. Научно обоснована возможность термической утилизации ИАИ, совместно со шламом ВПУ и ЛСТ путем изготовления ТРГ, теплота сгорания которых составляет 12,73 МДж/кг, в соотношении 9:1:3 (% масс.) в топливосжигающих установках: вращающихся печах цементных производств или топках с «кипящим» слоем энергетических котлов. Определен максимальный размер уносимых взвешенных частиц, который составляет 0,33 мм. Разработана экологически безопасная система очистки дымовых газов, позволяющая проводить предварительную очистку от взвешенных частиц.

8. Представлена математическая модель и разработан алгоритм расчета эффективности скруббера «мокрой» очистки запыленных газов с сепарационной эффективностью более 98,5 % при диаметре частиц более 3 мкм при условии охлаждения очищаемого газа. Для разделения суспензии, образующейся после очистки газовых сред, разработан комбинированный аппарат, состоящий из тонкослойной и флотационной секций и алгоритм расчета эффективности разделения загрязненных дисперсными частицами жидких сред эффективностью 99 % при диаметре частиц более 3 мкм.

9. Разработанные технологии, вовлекающие отходы производства как вторичные материальные и энергетические ресурсы, являются экономически целесообразными. Срок окупаемости предлагаемых технологий не превышает 2,5 года. Себестоимость очистки сточных вод от АСПАВ ШМП составляет 3,78 руб./м³. Себестоимость ШМП – 51,47 руб./кг; ТРГ – 7,16 тыс. руб./т.

10. Предотвращенный экологический вред: водоему р. Кама от сброса сточных вод, загрязненных АСПАВ в повышенной концентрации, составит 21,42 млн руб./год; причиненный воздуху в стоимостной оценке при внедрении технологии термической утилизации ТРГ составит 12,02 млн руб./год; почвам – 453,7 тыс. руб./год.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

*в изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации и приравненных к ним (Scopus, Web of Science)*

1. Исследование механизма адсорбционной очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ модифицированным отходом энергетики для снижения антропогенного воздействия на окружающую среду / **Р. Я. Исхакова**, Л. А. Николаева // Теоретическая и прикладная экология. – 2026. – № 2. – С. 145-155. – DOI 10.25750/1995-4301-2026-2-145-155.

2. Адсорбционная очистка сточных вод промышленных предприятий от анионных поверхностно-активных веществ в динамических условиях с применением отхода энергетики // **Р. Я. Исхакова**, А. И. Салимов // Современные проблемы гражданской защиты. – 2026. – № 2 (59). – С. 159-167. – DOI 10.48612/ntp/nth2-zuv2-emb2.

3. Обезвреживание избыточного активного ила шламом энергетики / **Р. Я. Исхакова**, Д. И. Черникова // Безопасность труда в промышленности. – 2026. – № 2. – С. 7-12. – DOI <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2026-2-7-12>

4. Разработка сорбционных материалов для очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ с применением различных связующих / **Р. Я. Исхакова** // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 8. – С. 45-51. – DOI 10.24000/0409-2961-2025-8-45-51.

5. Очистка сточных вод, содержащих смазочно-охлаждающие вещества, с применением шлама энергетики в качестве реагента / **Р. Я. Исхакова**, Д. И. Черникова // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 5. – С. 75-81. – DOI 10.24000/0409-2961-2025-5-75-81.

6. Извлечение поверхностно-активных веществ с применением сорбционных материалов на основе отхода энергетики / **Р. Я. Исхакова**, А.Г. Лаптев // Теоретические основы химической технологии – 2025. – Т. 59. – № 3. – С. 34-43. – DOI 10.7868/S3034605325030049.
7. Совершенствование метода очистки газовых выбросов при термической утилизации осадков и отходов промышленных предприятий/ **Р. Я. Исхакова**, А.Г. Лаптев// Современные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 4 (57). – С. 138-147. – DOI 10.48612/ntp/8x15-3un5-mza6.
8. Разработка технологии доочистки сточных вод от поверхностно-активных веществ/ **Р.Я. Исхакова**, Л.А. Николаева // Экология и промышленность России – 2025. – Т. 29. – № 11. – С. 4-9. – DOI 10.18412/1816-0395-2025-11-4-9.
9. Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила / **Р. Я. Исхакова**, А. И. Нургалиев // Безопасность техногенных и природных систем. – 2024. – Т. 8. – № 2. – С. 26-36. – DOI 10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36.
10. Possibility of utilizing waste activated sludge as a renewable energy source/ **Regina Iskhakova**, Olga Soloveva, Albert Iskhakov, and Arthur Nurgaliev// E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 480. – PP. 02027. – DOI 10.1051/e3sconf/202448002027.
11. Определение эффективности комбинированного аппарата разделения эмульсий / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, **Р. Я. Исхакова** // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2022. – Т. 65. – № 5. – С. 112-120. – DOI 10.6060/ivkkt.20226505.6544.
12. Removal of Anionic Synthetic Surfactants from Petrochemical Enterprises Wastewater Using Carbonate Sludge / L. A. Nikolaeva, **R. Y. Iskhakova**, D. R. Mansurov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57. – No. 5-6. – P. 493-498. – DOI 10.1007/s10556-021-00964-3.
13. The waste-to-energy technology of the energy sector / L. A. Nikolaeva, **R. Ya. Iskhakova** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1089. – No. 1. – P. 012041. – DOI 10.1088/1757-899x/1089/1/012041.
14. Integrated Wastewater Treatment for a GRES / L. A. Nikolaeva, **R. Y. Iskhakova** // Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 66. – No. 8. – P. 587-592. – DOI 10.1134/S004060151908007X.
15. Mathematical Modeling of Wastewater Treatment by Adsorption of Petroleum Products / L. A. Nikolaeva, **R. Y. Iskhakova** // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – Vol. 55. – No. 1-2. – P. 68-75. – DOI 10.1007/s10556-019-00583-z.
16. Adsorption of industrial wastewater from oil products with application of mathematical modeling / L. A. Nikolaeva, **R. Y. Iskhakova** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 288. – P. 012017. – DOI 10.1088/1755-1315/288/1/012017.
17. Improving the Efficiency of Wastewater Biological Treatment at Chemical Plants / L. A. Nikolaeva, A. G. Laptev, **R. Y. Iskhakova** // Water Resources. – 2018. – Vol. 45. – No. 2. – P. 231-237. – DOI 10.1134/S0097807818020136.
18. Complex use of waste in wastewater and circulating water treatment from oil in heat power stations / L. A. Nikolaeva, **R. Y. Iskhakova** // Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 64. – No. 6. – P. 458-463. – DOI 10.1134/S0040601517060040.
19. Wastewater treatment of industrial enterprises using carbonate sludge / L. A. Nikolaeva, A. G. Laptev, **R. Ya. Iskhakova** // Nature Environment and Pollution Technology. – 2015. – Vol. 14. – No. 4. – P. 947-950.

Монографии

20. Николаева Л.А., **Исхакова Р.Я.** Экологические аспекты утилизации твердых промышленных отходов. Казань: КГЭУ, 2015. – 120 с.
21. **Исхакова Р.Я.** Комплексная переработка отходов водоснабжения и водоотведения промышленных и коммунальных предприятий. Казань: Вестфалика, 2026. – 96 с.

Объекты интеллектуальной собственности

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689728 Российская Федерация. Программа расчета констант изотермы адсорбции Ленгмюра: № 2025688123: заявл. 17.10.2025; опубл. 30.10.2025 / **Р. Я. Исхакова**, А. Р. Исхаков; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

23. Патент № 2831578 С1 Российская Федерация, МПК C02F 11/18, B09B 3/40. Система термической переработки осадков биологической очистки сточных вод: № 2024111427: заявл. 25.04.2024 : опубл. 09.12.2024 / **Р. Я. Исхакова**, Л. А. Николаева; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615021 Российская Федерация. Программа расчета эффективности вихревого сепаратора: № 2023613639: заявл. 20.02.2023 : опубл. 09.03.2023 / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, **Р. Я. Исхакова** ; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613417 Российская Федерация. Расчет тонкослойного отстойника: № 2022612471: заявл. 25.02.2022: опубл. 14.03.2022 / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, **Р. Я. Исхакова**; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

26. Патент на полезную модель № 206192 U1 Российская Федерация, МПК C02F 9/00. Комбинированный аппарат разделения эмульсий: № 2021111546: заявл. 22.04.2021: опубл. 30.08.2021 / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, **Р. Я. Исхакова**; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021612418 Российская Федерация. Расчет длины физического насадочного коагулятора эмульсий: № 2021611573: заявл. 10.02.2021: опубл. 17.02.2021 / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, **Р. Я. Исхакова**; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

28. Патент № 2633762 С1 Российская Федерация, МПК C10L 5/48, C10L 5/14, C10L 5/40. Способ получения топливных гранул: № 2016149026: заявл. 13.12.2016: опубл. 18.10.2017 / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова**, Г. М. Зарипова; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

29. Патент № 2606989 С Российская Федерация, МПК C02F 3/02, C02F 1/28. Устройство адсорбционно-биологической очистки сточных вод промышленных предприятий: № 2015118805: заявл. 19.05.2015 : опубл. 10.01.2017 / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова**; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

30. Патент № 2443636 С1 Российская Федерация, МПК C02F 3/00, C02F 1/28, B01J 20/24. Применение шлама, образующегося на водоподготовительной установке ТЭС, в качестве сорбента при биологической очистке сточных вод: № 2010122769/10: заявл. 03.06.2010: опубл. 27.02.2012 / Л. А. Николаева, А. В. Сотников, **Р. Я. Недзвецкая (Исхакова)**; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

31. Патент на полезную модель № 115777 U1 Российская Федерация, МПК C02F 9/14. Система биологической очистки сточных вод промышленных предприятий : № 2011144998/05 : заявл. 07.11.2011: опубл. 10.05.2012 / Л. А. Николаева, **Р. Я. Недзвецкая (Исхакова)**; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Публикации в прочих изданиях и материалы конференций

32. Обработка избыточного активного ила отходом энергетики для получения рекультиванта / **Р. Я. Исхакова** // Актуальные аспекты и перспективы развития современной биотехнологии: сборник докладов II Международной научной конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2026. – С. 282-286.

33. Биосорбционная очистка сточных вод и детоксикация избыточного активного ила / **Р. Я. Исхакова** // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 11. – С. 23-31.

34. Моделирование очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ сорбционными материалами на основе отходов установок водоподготовки / А. Г. Лаптев, **Р. Я. Исхакова** // Вестник Технологического университета. – 2025. – Т. 28. – № 5. – С. 110-115. – DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_5_110.

35. Исследование кинетики процесса адсорбции ПАВ с использованием отхода энергетики, модифицированного связующим / **Р. Я. Исхакова**, А. Г. Лаптев // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации : сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции. – Белебей: ФГБОУ ВО СамГТУ, 2025. – С. 180-182.

36. Исследование процесса сорбционной очистки сточных вод от анионных ПАВ модифицированным отходом энергетики / **Р. Я. Исхакова** // Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности: сборник статей международной научно-технической конференции. – Термез: ТГПИ, 2025. – С. 528-540.

37. Обезвреживание активного ила биологических очистных сооружений отходом энергетики / **Р. Я. Исхакова**, Д. И. Черникова // Актуальные аспекты и перспективы развития современной

биотехнологии: сборник докладов II Международной научной конференции – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 261-263.

38. Исследование сорбционной очистки сточных вод от анионных ПАВ как метода обеспечения экологической безопасности / **Р. Я. Исакова**, А. И. Салимов // Устойчивая энергетика как драйвер развития предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: материалы круглого стола. – Казань: КГЭУ, 2025. – С. 58-62.

39. Очистка сточных вод отходом энергетики / **Р. Я. Исакова**, Д. И. Черникова // Тинчуринские чтения - 2025 «Энергетика и цифровая трансформация»: сборник статей Международной молодежной научной конференции. – Казань: КГЭУ, 2025. – С. 812-816.

40. Совместная переработка осадков сточных вод и отходов энергетики / **Р. Я. Исакова** // Наследие В.И. Вернадского и современные проблемы экологии. – 2025. – № 1. – С. 317-323.

41. Подходы к извлечению тяжелых металлов из осадков сточных вод / **Р. Я. Исакова**, Д. И. Черникова // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: сборник научных трудов VI Всероссийской научно-практической конференции «Экологический форсайт». – Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2024. – С. 124-127.

42. Применение сорбционных материалов в устранении загрязнений окружающей среды / **Р. Я. Исакова**, Г. Р. Салихова // Актуальные проблемы техносферной безопасности: сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей. – Ульяновск: УлГТУ, 2024. – С. 149-151.

43. Детоксикация избыточно активного ила как основного компонента биологической очистки сточных вод / **Р. Я. Исакова**, Д. И. Черникова // Химия и инженерная экология - XXIV: Сборник трудов международной научной конференции (школа молодых ученых), посвященной Году научно-технологического развития в Республике Татарстан. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2024. – С. 21-23.

44. Энергетическая утилизация избыточного активного ила биологических очистных сооружений / **Р. Я. Исакова** // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: международная молодежная научная конференция. – Казань: КГЭУ, 2024. – С. 620-622.

45. Современные способы обезвреживания активного ила / **Р. Я. Исакова**, А. И. Нургалиев // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIIT 2023: Сборник трудов XI международной научно-технической конференции. – Тольятти: ELPIIT, 2023. – С. 141-143.

46. Адсорбционная очистка газовых выбросов отходом производства от оксидов азота / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исакова** // Наука и техника в газовой промышленности. – 2023. – № 1(93). – С. 99-106.

47. Математические модели разделения гетерогенных сред в тонкослойных отстойниках при различных режимах / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, **Р. Я. Исакова** // Вода: химия и экология. – 2023. – № 7. – С. 39-49. – DOI 10.58551/20728158_2023_7_39.

48. Очистка сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ с использованием отхода энергетики в качестве вторичного материального ресурса / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исакова**, А. В. Травникова, А. И. Нургалиев // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2023. – № 1. – С. 120-128. – DOI 10.25558/VOSTNII.2023.22.56.011.

49. Повышение эффективности обезвреживания избыточного активного ила / **Р. Я. Исакова**, А. И. Нургалиев // Химия и инженерная экология - XXIII : сборник трудов международной научной конференции. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 19-21.

50. Утилизация осадков биологической очистки сточных вод муниципальных предприятий / **Р. Я. Исакова**, А. И. Нургалиев // Экологические проблемы промышленных городов: сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции. – Саратов: ООО «Амирит», 2023. – С. 30-32.

51. Обезвреживание и детоксикация избыточного активного ила биологических очистных станций промышленных предприятий / **Р. Я. Исакова**, Д. Э. Ибатуллина // Актуальные аспекты и

перспективы развития современной биотехнологии: сборник докладов Всероссийской научной конференции с международным участием. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 3-5.

52. Математическое моделирование процессов тепломассообмена в газожидкостных средах / Е. А. Лаптева, **Р. Я. Исхакова** // Математическое моделирование в теплоэнергетике: сборник докладов молодежной научной конференции. – Москва: ОАО «Всероссийский Теплотехнический научно-исследовательский институт», 2023. – С. 47-51.

53. Утилизация отхода теплоэнергетики в качестве сорбционного материала для повышения качества очистки сточных вод от АСПАВ / **Р. Я. Исхакова**, А. И. Нургалиев // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции. – Саратов: ООО «Амирит», 2023. – С. 81-84.

54. Усовершенствование технологии очистки сточных вод предприятия энергетической отрасли / Л. Р. Ахметшина, **Р. Я. Исхакова** // Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы Международной молодежной научной конференции. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – Т.1. – С. 637-639.

55. Оценка эффективности очистки сточных вод предприятия нефтехимии / А. С. Лактионов, **Р. Я. Исхакова** // Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы Международной молодежной научной конференции. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – Т.1. – С. 661-663.

56. Определение поверхности осаждения дисперсной фазы в тонкослойном отстойнике / А. Г. Лаптев, **Р. Я. Исхакова** // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2022. – № 2. – С. 86-92. – DOI 10.25558/VOSTNI.2022.39.49.009.

57. Использование отхода энергетики в качестве вторичного материального ресурса для очистки сточных вод / **Р. Я. Исхакова**, А. В. Травникова // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: материалы Международной научной конференции. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 168-172.

58. Способы очистки сточных вод, образующихся после мойки автомобильного транспорта / А. И. Хайрутдинова, **Р. Я. Исхакова** // Тинчуринские чтения - 2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: сборник статей по материалам конференции. – Казань: КГЭУ, 2022. – Т.1. – С. 523-525.

59. Численное моделирование эффективности тонкослойных отстойников / **Р. Я. Исхакова** // Тинчуринские чтения - 2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: сборник статей по материалам конференции. – Казань: КГЭУ, 2022. – Т.1. – С. 700-703.

60. Интенсификация очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ / **Р. Я. Исхакова**, Е. А. Лаптева // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: сборник докладов Международной научной конференции. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 101-105.

61. Пиролиз как эффективный метод утилизации промышленных и бытовых отходов / **Р. Я. Исхакова**, А. В. Травникова // Химия и инженерная экология - XXI: сборник трудов Международной научной конференции (школа молодых ученых). – КАИ. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2021. – С. 140-142.

62. Возможность применения отхода водоподготовки при предварительной адсорбционной очистке сточных вод промышленных предприятий / **Р. Я. Исхакова**, Л. А. Николаева // Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – Казань: КНИТУ, 2021. – С. 206-211.

63. Моделирование эффективности разделения эмульсий в комбинированном аппарате / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, **Р. Я. Исхакова** // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 12. – С. 33-37. – DOI 10.52348/2712-8873_ММТТ_2021_12_33.

64. Экологические пути восстановления природных вод озера большое голубое с использованием карбонатного шлама / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова** // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки,

материаловедение, химия и биотехнология: сборник докладов Международной научно-технической конференции. – Алушта-Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 351-357.

65. Повышение эффективности центрифугирования осадков сточных вод / **Р. Я. Исхакова** // Научные исследования молодых ученых: сборник статей II Международной научно-практической конференции. – Пенза: «Наука и Просвещение», 2020. – С. 46-49.

66. Повышение надежности эксплуатации систем очистки сточных вод Кармановской ГРЭС / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова** // Химия и инженерная экология - XX : Сборник трудов международной научной конференции (школа молодых ученых). Казань: ИП Сагиева А.Р., 2020. – С. 79-82.

67. Использование карбонатного шлама как адсорбционного материала при очистке сточных вод нефтехимических производств от АСПАВ / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова**, Д. Р. Мансуров // Нефть и газ: технологии и инновации: материалы Национальной научно-практической конференции. Тюмень: ТИУ, 2020. –Т. III. – С. 71-73.

68. Очистка сточных вод Кармановской ГРЭС с использованием отхода теплоэнергетики / **Р. Я. Исхакова** // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: Всероссийская научная конференция. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – Т.2. – С. 55-60.

69. Комплексная технология утилизации шлама водоподготовки и очистки сточных вод Кармановской ГРЭС / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова** // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕLPIT 2019: сборник трудов VII международного экологического конгресса. – Самара-Тольятти: АНО «Изд-во Самарского Научного Центра», 2019. – Т.5. – С. 103-107.

70. Математическое описание адсорбционной очистки сточных вод промышленных предприятий / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова** // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды: материалы докладов Международной научно-технической конференции. – Алушта: БГТУ им.В.Г. Шухова, 2018. – Т. III. – С. 92-97.

71. Энерго- и ресурсосбережение при использовании избыточного активного ила в качестве альтернативного топлива / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова**, Г. М. Зарипова, А. Р. Исхаков // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 13-15(225-227). – С. 134-143. – DOI 10.15518/isjaee.2017.13-15.134-143.

72. Энергосберегающая технология переработки избыточного активного ила как альтернативного топлива / **Р. Я. Исхакова**, Г. М. Зарипова, А. Р. Исхаков // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017: сборник статей научно-практической конференции с международным участием. – Севастополь: СГУ, 2017. – С. 559-561.

73. Адсорбционная очистка как эффективный метод обезвреживания сточных вод / **Р. Я. Исхакова**, А. Р. Исхаков // Проблемы и инновационные решения в области инженерного обеспечения экологической и промышленной безопасности урбанизированных территорий: материалы научного симпозиума. – Самара, Тольятти: АНО «Изд-во Самарского Научного Центра». – 2017. –Т. 6.– С. 106-111.

74. Исследование адсорбционной очистки сточных вод промышленных предприятий карбонатным шламом ТЭС / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова**, А. Р. Исхаков // Молодой ученый. – 2017. – № 47(181). – С. 35-38.

75. Энерго- и ресурсосбережение при использовании избыточного активного ила в качестве альтернативного топлива / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова**, Г. М. Зарипова, А. Р. Исхаков // International Scientific Journal Life and Ecology. – 2017. – № 1-2(7-8). – С. 139-140.

76. Утилизация и переработка избыточного активного ила биологических очистных сооружений предприятий нефтехимического комплекса / **Р. Я. Исхакова**, Г. М. Зарипова // Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии: материалы IX международной научно-практической конференции. – Нижнекамск: ПАО «Нижнекамскнефтехим», 2016. – С. 231-232.

77. Enhancement of biological treatment of petrochemical industry wastewater /L. A. Nikolaeva, **R. Ia. Iskhakova** //Water supply and sanitary technique.– 2016. –No. 11.–P.50-55.

78. Повышение эффективности механического обезвоживания избыточного активного ила / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова**, Г. М. Зарипова // Вода: химия и экология. – 2016. – № 10(100). – С. 47-51.
79. Математическое описание адсорбционно-биологической очистки сточных вод / Л. А. Николаева, А. Р. Исхаков, **Р. Я. Исхакова** // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 8. – № 12. – С. 114-117.
80. Исследование кинетики биосорбционной очистки сточных вод промышленных предприятий шламом ХВО ТЭС / Л. А. Николаева, **Р. Я. Исхакова** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 6(86). – С. 21-23.
81. Purification of effluent waters from industrial enterprises using a biosorption technology / L. A. Nikolaeva, **R. Y. Nedzvetskaya** // Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 59. – No. 3. – P. 258-260. – DOI 10.1134/S0040601512010090.

Подписано в печать 01.10.2026. Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100. Заказ № 0110/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: +7(843)292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
