

На правах рукописи

ЗАКОЛЮКИНА Алина Маратовна

**ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ АММОНИЯ
И ФОСФАТОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМИ
ЗОЛОШЛАКОВЫМИ ОТХОДАМИ**

2.10.2. Экологическая безопасность (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»)

Научный руководитель – Короткова Татьяна Германовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар

Официальные оппоненты: Сапронова Жанна Ануаровна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная экология», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород

Салищева Олеся Владимировна, доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой «Общая и неорганическая химия», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет», г. Чита

Защита диссертации состоится 26 февраля 2026 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843) 519-42-58.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба направлять по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.03, Svetlana-zag@bk.ru.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



**Борисова Светлана
Дмитриевна**

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В результате увеличения численности городского населения в связи с вводом в эксплуатацию новых жилищных комплексов нагрузка на очистные сооружения (ОС) городских сточных вод (СВ) многократно выросла. Изношенные ОС не справляются с возросшим количеством загрязнений в городских стоках. Частично очищенные стоки сбрасываются в прилегающие водные объекты, нанося урон их экосистеме. Попадание ионов аммония (NH_4^+) и фосфатов (PO_4^{3-}) в водные объекты из СВ приводит к снижению биоразнообразия флоры и фауны гидросферы, повышению численности опасных бактерий, увеличению потребности в кислороде и вызывает эвтрофикацию. При взаимодействии человека с водной средой это может привести к серьезным инфекционным заболеваниям.

Одним из перспективных методов удаления NH_4^+ и PO_4^{3-} является сорбционный. Наибольшей поглотительной способностью обладают природные цеолиты. В связи с их ценностью в настоящее время для очистки СВ широко применяются отходы производства в нативном и модифицированном видах. К дешёвым сорбентам относятся золошлаковые отходы (ЗШО) предприятий теплоэнергетики, накопленные на золоотвалах, занимающих огромные территории. Для повышения сорбционной емкости ЗШО прокаливают при высоких температурах или подвергают гидротермальной обработке при добавлении различных растворов, в основном гидроксида натрия или калия. Имеющиеся в отечественной литературе данные по использованию модифицированных ЗШО для удаления NH_4^+ и PO_4^{3-} из СВ ограничены. Экспериментальные данные по статике процесса сорбции обрабатывают в основном изотермами Ленгмюра и Фрейндлиха, которые прогнозируют высокую эффективность извлечения поллютантов при малой их концентрации в доочищаемом водном растворе, что не всегда отвечает опытным данным. В этой связи актуальным является очистка СВ от NH_4^+ и PO_4^{3-} модифицированными золошлаковыми отходами.

Использование ЗШО предприятий теплоэнергетики в качестве сорбентов позволит сократить отчуждение территории, снизить риски заболеваемости людей, проживающих в жилой застройке вблизи золоотвалов и реализовать вторичное вовлечение отходов производства.

В соответствии с указом № 529 от 18.06.2024 г. одним из приоритетных направлений научно-технологического развития является «... сохранение и рациональное использование природных ресурсов», одной из наукоемких технологий – «Мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды...».

Исследования выполнены при финансовой поддержке Кубанского научного фонда (КНФ) в рамках научного проекта № МФИ-20.1/57 (грант КНФ) «Разработка экологически безопасных сорбентов для очистки ливневых стоков, содержащих фекально-бытовые и нефтяные загрязняющие вещества» (№ государствен-

Автор выражает благодарность за помощь при проведении экспериментальных исследований техническому руководителю Провайдера проверки квалификации ООО «Национальный Провайдер Межлабораторных Сличительных Испытаний» Бушумову Святославу Андреевичу

венной регистрации 122101000007-2) и в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ кафедры безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» 1.16.21-25 «Производственная безопасность и экологическая обстановка на предприятиях города и края» (№ государственной регистрации 221102100077.1).

Степень разработанности темы исследования. Применение ЗШО предприятий теплоэнергетики в качестве сорбентов для очистки СВ от NH_4^+ и PO_4^{3-} широко отражено в работах отечественных и зарубежных исследователей Li Z., Usman M.O., Yao Y., Zhang B., Wu D., Yuliany G., Zhao Y., Affandi K.A., Горбачевой Т.Т., Хантергаевой Г.И., Федоровой Н.В., Шафорост Д.А. и др.

Не удалось обнаружить анализ функциональной зависимости коэффициента распределения K_d и эффективности очистки E от начальной C_0 и равновесной C_e концентрации адсорбтива в растворе при статической сорбции.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы являются исследования очистки сточных вод от ионов аммония и фосфатов модифицированными золошлаковыми отходами Новочеркасской ГРЭС.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- установить экологическую безопасность ЗШО Новочеркасской ГРЭС по возможному влиянию радионуклидов на окружающую среду и организм человека;
- провести мониторинг состояния реки Кубань в черте г. Краснодара за период 2018-2022 гг. и выполнить количественный химический и микробиологический анализы отобранных проб;
- экспериментально исследовать статику и кинетику на модельных растворах и реальных СВ в широком диапазоне концентраций по установлению кривых зависимостей $K_d = f(C_e)$, $E = f(C_0)$, определению максимальной эффективности очистки E , %, модельных водных растворов и реальных СВ от NH_4^+ и PO_4^{3-} прокаленным сорбентом на основе ЗШО Новочеркасской ГРЭС;
- выполнить анализ изотерм адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина, Еловича и Дубинина-Радускевича на наличие экстремума функции $K_d = f(C_e)$, $E = f(C_0)$ с целью прогнозирования максимальной эффективности очистки СВ от NH_4^+ и PO_4^{3-} ;
- разработать способ получения цеолита для очистки СВ от NH_4^+ на основе прокаленного сорбента из ЗШО Новочеркасской ГРЭС, определить его физико-химические показатели и провести апробацию на модельных водных растворах и реальных СВ;
- предложить технологическую схему очистки СВ от NH_4^+ с применением цеолита из ЗШО и обосновать экономическую эффективность его использования.

Научная новизна. Выполнен анализ изотерм адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Еловича, Темкина и Дубинина-Радускевича на наличие экстремума функции $K_d = f(C_e)$, $E = f(C_0)$, полученного при обработке экспериментальных данных, что позволяет прогнозировать изменение эффективности очистки СВ в диапазоне начальных концентраций NH_4^+ от 5 до 300 мг/дм³ и PO_4^{3-} от 2 до 5000 мг/дм³ в растворе.

Экспериментально получены данные и определены условия получения цеолита для очистки СВ от NH_4^+ . Цеолит получен прокаливанием при 600 °С ЗШО Новочеркасской ГРЭС с последующей гидротермальной обработкой путем добавления 2 М раствора NaOH в соотношении 10 см³ на 1 г прокаленного сорбента, что привело к увеличению сорбционной емкости по отношению к NH_4^+ и снижению времени достижения фазового равновесия в растворе цеолит – NH_4^+ .

Теоретическая и практическая значимость.

Удельная эффективная активность ЗШО Новочеркасской ГРЭС составила $A_{\text{эфф}} = 235,3 \pm 21,4$ Бк/кг, что соответствует нормам экологической безопасности.

Проведенный мониторинг с 2018 г. по 2022 г. показателей качества воды реки Кубань выявил повышенные значения NH_4^+ , PO_4^{3-} и других поллютантов.

Экспериментально исследована статика и кинетика на модельных растворах и реальных СВ в системах NH_4^+ – прокаленный сорбент, PO_4^{3-} – прокаленный сорбент, NH_4^+ – цеолит. Определены константы изотерм Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина, Еловича и Дубинина-Радущкевича и моделей кинетики псевдопервого (Лагергрена), псевдвторого порядка (Хо и Маккея), диффузионной и Еловича.

Анализ изотерм адсорбции показал, что зависимости $K_d = f(C_e)$ и $E = f(C_0)$ на основе изотерм Темкина и Дубинина-Радущкевича имеют максимум при изменении концентраций адсорбтива в растворе, а на основе изотерм Ленгмюра, Фрейндлиха и Еловича являются монотонно убывающими во всем диапазоне концентраций адсорбтива в растворе.

Экспериментально подтвержден экстремум кривых зависимости $K_d = f(C_e)$ и $E = f(C_0)$ как функции от концентрации адсорбтива в растворе C_0 и C_e при очистке модельных водных растворов и реальной СВ от NH_4^+ и PO_4^{3-} в системах NH_4^+ – прокаленный сорбент, PO_4^{3-} – прокаленный сорбент, NH_4^+ – цеолит. Получено качественное согласование экспериментальных и расчетных данных по изотермам Темкина и Дубинина-Радущкевича.

Разработан способ получения цеолита для очистки водных растворов и СВ от NH_4^+ путем гидротермальной обработки прокаленного сорбента 2 М раствором гидроксида натрия. Определены его физико-химические показатели. Повышена эффективность очистки раствора от NH_4^+ по сравнению с прокаленным сорбентом. Цеолит исследован на модельных растворах и реальной СВ. Технологические и технические решения подтверждены патентом РФ на изобретение № 2829776. Себестоимость цеолита составляет 17,5 руб. за 1 кг.

Для доочистки СВ от NH_4^+ после биологической очистки предложена технологическая схема, включающая 3 ступени статической сорбционной очистки, где на 1-й и 2-й ступени в качестве сорбента используется цеолит из ЗШО, и на 1-й и 3-й – клиноптилолит. Стоимость очистки 1 м³ раствора с концентрацией NH_4^+ 40 мг/дм³ составляет 201 руб., размер предотвращенного экологического ущерба, причиненного сбросом 70 м³/сут., составляет 13103,5 тыс. руб./год.

Результаты испытаний цеолита на основе ЗШО Новочеркасской ГРЭС и технология его производства переданы ООО «Газпром трансгаз Краснодар» (Анапское ЛПУМГ), ООО «ССК Газрегион» (Лаборатория управления контроля

качества в Ленинградской области), АО «Анапа Водоканал».

Методология и методы исследования. Экспериментальные данные по статике и кинетике получены в аккредитованной в национальной системе аккредитации аналитической лаборатории ООО «Аналитическая лаборатория Кубани» (г. Краснодар) при использовании методик и методов контроля выполнения измерений по утвержденным РФ методикам ФР, РД, ПНД Ф, ГОСТ. Соответствие ЗШО Новочеркасской ГРЭС нормам радиационной безопасности проведено в испытательном лабораторном центре ООО «РусИнтеКо» (г. Краснодар). Цеолит получен в лаборатории кафедры безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «КубГТУ». Физико-химические показатели цеолита определены в испытательной лаборатории ООО «Сорбенты Кузбасса» (г. Кемерово). Научные подходы, выводы и рекомендации основаны на фундаментальных научных положениях и общепринятых теоретических закономерностях.

Достоверность результатов исследований. Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается большим количеством собственных экспериментальных данных, полученных по утвержденным РФ методикам и методам контроля выполнения измерений ФР, РД, ПНД Ф, ГОСТ и их сравнением с известными данными.

Положения, выносимые на защиту.

Анализ изотерм адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Еловича, Темкина и Дубинина-Радushкевича на наличие экстремума функции $K_d = f(C_e)$, $E = f(C_0)$, позволяющий прогнозировать изменение эффективности очистки СВ в широком диапазоне их начальных концентраций C_0 в растворе.

Способ получения цеолита из ЗШО Новочеркасской ГРЭС, результаты исследования его физико-химических и сорбционных свойств.

Результаты исследований статике и кинетике сорбции, полученные при обработке опытных данных на модельных водных растворах и реальных СВ в системах: NH_4^+ – прокаленный сорбент, PO_4^{3-} – прокаленный сорбент, NH_4^+ – цеолит.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на Международной научно экологической конференции «Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения» (г. Краснодар, 2021 г.); на международной научной конференции «Молодые исследователи – регионам» (Вологда, 2021 г.); на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой «Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных» (г. Омск, 2023г.); на Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Актуальные вопросы научно-технологического развития агропромышленного комплекса» (г. Махачкала, 2023 г.); на Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда «Передовые исследования Кубани» (г. Сочи, 2023 г., 2024 г.); на международном молодежном экологическом форуме (г. Кемерово, 2023 г.); на международной научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика»

(г. Кемерово, 2023 г.); на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей «Актуальные проблемы техносферной безопасности» (г. Ульяновск, 2024 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 научных работы, из них: 7 статей в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 статья в прочем издании и 12 работ в материалах конференций различного уровня, получен 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора. Составлен план исследования, выполнен мониторинг показателей качества воды в р. Кубань по 10-ти точкам отбора в черте г. Краснодара, проведены эксперименты на модельных и реальных смесях, разработан способ получения цеолита для очистки СВ от NH_4^+ , осуществлена математическая обработка данных по моделям статики и кинетики сорбции NH_4^+ , PO_4^{3-} , выполнен анализ изотерм адсорбции, разработана схема очистки СВ от NH_4^+ с применением цеолита из ЗШО и обоснована экономическая эффективность его использования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных выводов и результатов, списка использованных источников и приложений. Основной текст диссертации изложен на 210 страницах компьютерного текста, содержит 83 рисунка и 45 таблиц. Список использованных источников включает 129 наименований.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности 2.10.2. Экологическая безопасность по пунктам: 2) Исследования уровня воздействия на окружающую среду негативных факторов производственно-хозяйственной деятельности; 10) Разработка и совершенствование методов, технологий и средств снижения негативного воздействия антропогенной хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований. Сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе (обзор литературы) выполнен анализ загрязнения водных объектов на основе отечественной и зарубежной литературы. Выявлено ежегодное повышение загрязнения рек России. Река Кубань переведена в 4 класс разряда «а» «грязная». Рассмотрены применяемые сорбенты для очистки СВ от NH_4^+ и PO_4^{3-} , а также модели статики и кинетики сорбции.

Во второй главе приведены объекты и методы исследований. В качестве объектов исследований взят модифицированный прокаленный сорбент на основе ЗШО Новочеркасской ГРЭС (Ростовская область, п. Донской); модельные водные растворы, содержащие NH_4^+ и PO_4^{3-} ; СВ из стока в р. Кубань (г. Краснодар); цеолит, полученный путем гидротермальной обработки прокаленного сорбента. Методы исследований: хлориды РД 52.24.361-2008; азот нитритный РД 52.24.381-2006; азот нитратный РД 52.24.528-2012; ионы аммония ПНД Ф 14.1:2:4.262-10;

БПК₅ РД 52.24.420-2006; ХПК ПНД Ф 14.1:2:3.100-97; железо общее РД 52.24.358-2006; нефтепродукты РД 52.24.476-2007; фосфаты РД 52.24.382-2006; сульфаты РД 52.24.405-2005; взвешенные вещества ПНД Ф 14.1:2:4.254-09; ОКБ МУК 4.2.1884-04; ТКБ МУК 4.2.1884-04; колифаги МУК 4.2.1884-04.

Определена удельная активность естественных радионуклидов ЗШО, в Бк/кг: $^{40}\text{K} = 737,1$; $^{226}\text{Ra} = 95,32$; $^{232}\text{Th} = 59,45$; $^{137}\text{Cs} < 6$. Удельная эффективная активность составила $A_{\text{эфф}} = 235,3 \pm 21,4$ Бк/кг. Таким образом, применение сорбентов на основе ЗШО Новочеркасской ГРЭС является экологически безопасным с точки зрения возможного влияния радионуклидов на окружающую среду и организм человека ввиду их низкой суммарной удельной активности.

Емкость прокаленного сорбента и цеолита A , мг/г, по отношению к поллютантам вычислена с учетом порового объема сорбента

$$A = \frac{C_0V - [C(V - v_P m)]}{m} = \frac{(C_0 - C)V}{m} + C v_P, \quad (1)$$

где C_0 – начальная концентрация поллютанта в растворе, мг/дм³; C – текущая концентрация поллютанта в растворе после сорбции за определенный промежуток времени, мг/дм³; V – объем исходного раствора, дм³; m – масса сорбента, г; v_P – удельный поровый объем (для прокаленного сорбента $v_P = 0,506 \cdot 10^{-3}$ дм³/г).

Эффективность очистки E , %, от поллютантов определена путем отношения количества поллютанта, поглощенного сорбентом, к количеству поллютанта в исходном растворе, выраженного в процентах:

$$E = \frac{C_0V - (V - v_P m)C}{C_0V} \cdot 100 = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} + \frac{v_P m C}{C_0 V} \right) \cdot 100. \quad (2)$$

В третьей главе проведена эколого-химическая оценка состояния р. Кубань в условиях антропогенной нагрузки г. Краснодара за период с 2018 по 2022 годы. Карта исследований мест отбора проб приведена на рисунке 1.

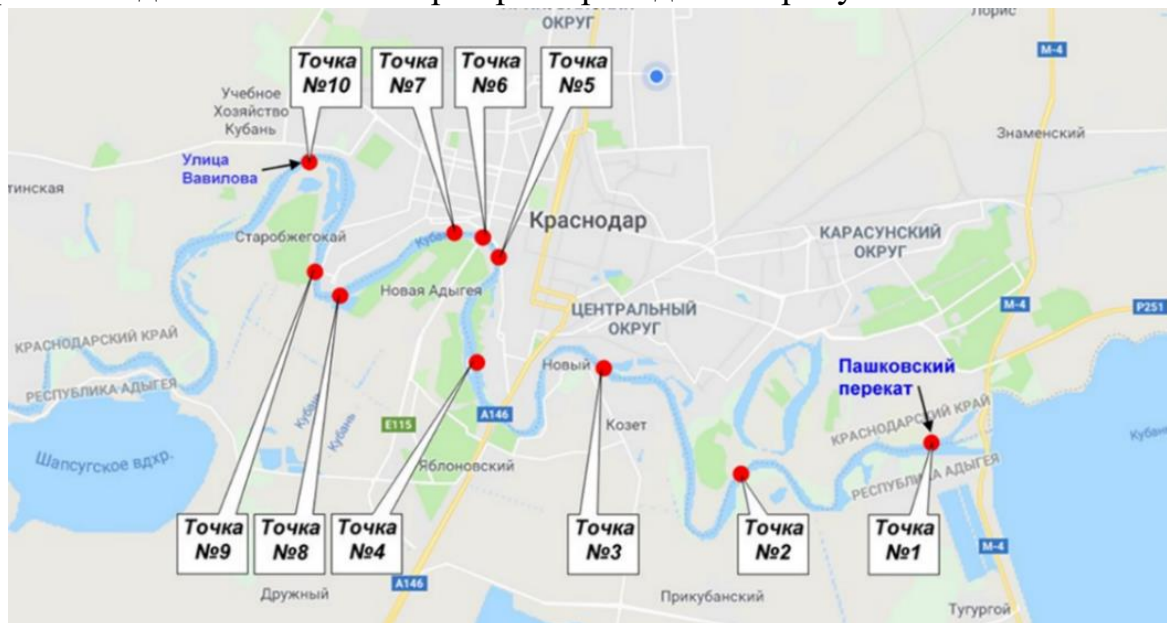


Рисунок 1 – Карта мест отбора проб из р. Кубань в черте г. Краснодара

Вдоль побережья реки Кубань в черте г. Краснодара выбрано 10 точек по направлению течения реки: 1 – вход в г. Краснодар; 2 – поселок Прикубанский,

3 – поселки Козет и Новый; 4 – после нефтеперерабатывающего завода АО «КНПЗ-КЭН»; 5 – 500 метров выше по течению от стока в р. Кубань; 6 – сток в р. Кубань в районе Тургеневского моста; 7 – 500 метров после стока; 8, 9 – дачные участки и аул Старобжегокай; 10 – выход из города. Выполнен количественный химический и микробиологический анализы проб по 14 показателям загрязняющих веществ: хлориды, азот нитритный, азот нитратный, NH_4^+ , PO_4^{3-} , БПК₅; ХПК; железо общее, нефтепродукты, сульфаты, взвешенные вещества, ОКБ, ТКБ, колифаги. Проведенные экспериментальные исследования показателей качества воды р. Кубань (рисунок 2) выявили сильное антропогенное влияние на водный объект прибрежных предприятий и жилищных комплексов.

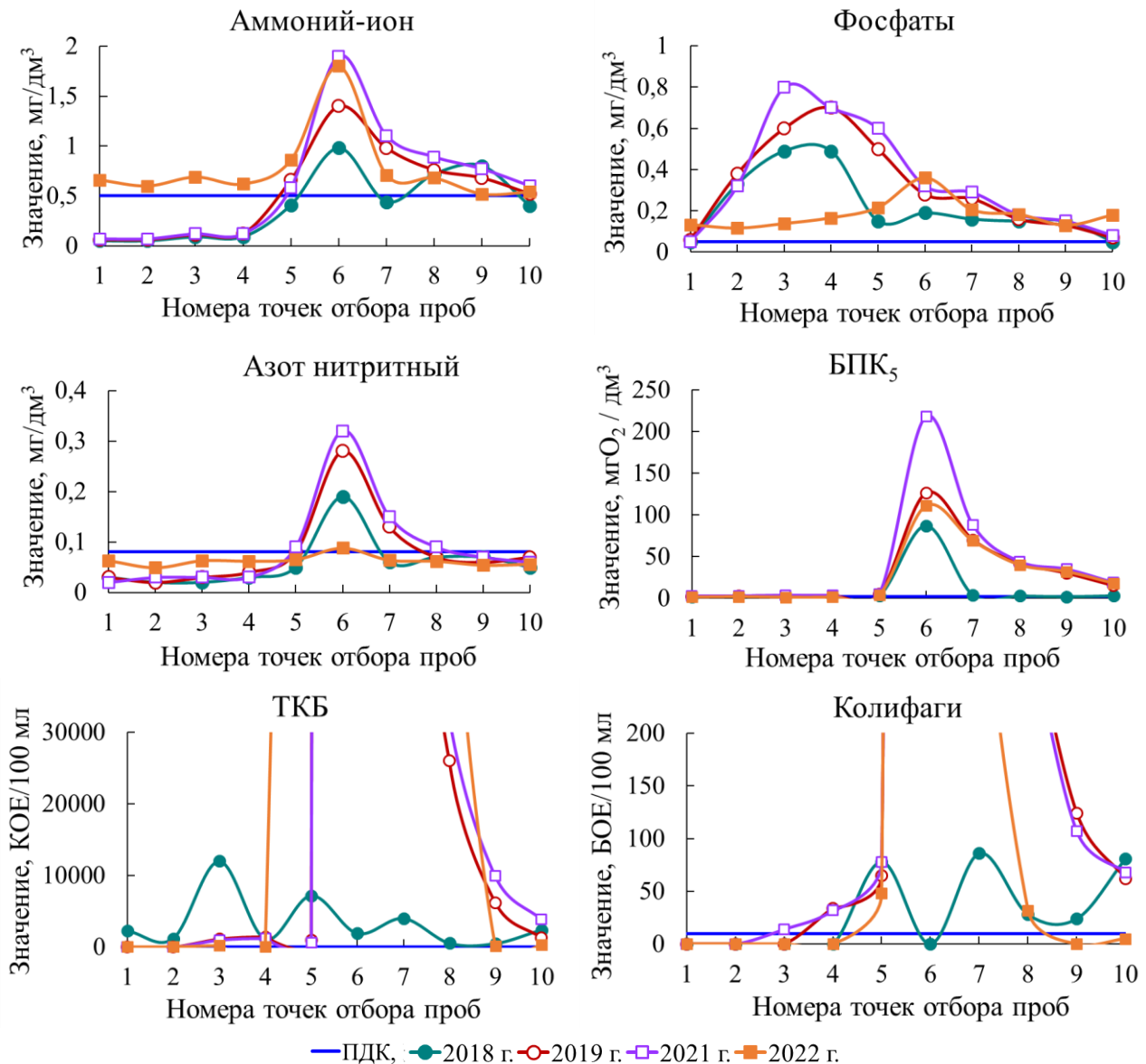


Рисунок 2 – Результаты исследований образцов воды, отобранных в черте г. Краснодара

Наличие NH_4^+ и PO_4^{3-} в водных объектах рыбохозяйственного значения приводит к увеличению в них патогенных микроорганизмов, поэтому они выбраны в качестве исследуемых поллютантов. На первом этапе применен сорбент, модифицированный путем сушки ЗШО Новочеркасской ГРЭС с последующим прокаливанием в течение 30 мин при температуре 600 °С (прокаленный сорбент).

Бушумовым С.А. определены физико-химические показатели прокаленного сорбента: насыпная плотность – 0,666 г/см³, зольность – 99,5%, суммарный объем пор – 0,506 см³/г, истираемость – 8,5 %, влажность – менее 1 % и установлено, что ЗШО Новочеркасской ГРЭС отвечает V классу опасности. На втором этапе исследован цеолит для очистки водных растворов и СВ от NH₄⁺, полученный путем гидротермальной обработки прокаленного сорбента.

В четвертой главе приведены экспериментальные исследования статистики и кинетики сорбционной очистки водных растворов и СВ от NH₄⁺, PO₄³⁻ прокаленным сорбентом из ЗШО. Статика сорбции NH₄⁺ из модельных растворов и СВ проведена при дозах сорбента 1, 2 и 5 г на 50 см³ раствора при изменении C₀ от 5 до 300 мг/дм³ (таблица 1). Параметры сорбции: температура $t=25\pm 2$ °С, частота вращения магнитной мешалки $\nu = 200$ об/мин, рН 7, время контакта $\tau = 180$ мин.

Таблица 1 – Исследование фазового равновесия NH₄⁺ – прокаленный сорбент

C ₀ , мг/дм ³	C _e , мг/дм ³	A _e , мг/г	E, %	C _e , мг/дм ³	A _e , мг/г	E, %	C _e , мг/дм ³	A _e , мг/г	E, %
	Масса сорбента 1 г/50 см ³			Масса сорбента 2 г/50 см ³			Масса сорбента 5 г/50 см ³		
5	3,83	0,0603	24,12	2,65	0,0601	48,07	0,298	0,0472	94,34
20	13,97	0,3079	30,86	8,16	0,3000	60,03	0,534	0,1949	97,46
30	22,67	0,3786	25,21	15,82	0,3615	48,34	1,670	0,2842	94,72
50	40,50	0,4952	19,83	32,88	0,4449	35,57	9,387	0,4110	82,18
100	86,44	0,7199	14,44	74,25	0,6807	27,25	30,43	0,7113	71,11
200	184,6	0,8604	8,62	169,1	0,8583	17,17	103,7	1,0140	50,76
300	283,7	0,9622	6,39	266,6	0,9709	12,94	196,6	1,1336	37,80

Методом линеаризации здесь и далее определены константы изотерм адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Еловича, Темкина и Дубинина-Радускевича. Важным параметром физической адсорбции при термодинамическом равновесии является K_d , который рассматривают в качестве меры адсорбируемости компонента. K_d согласно ГОСТ 32630-2014 называют также константой фазового равновесия, K_d представляет собой отношение равновесной величины адсорбции A_e к равновесной концентрации адсорбтива в растворе после сорбции C_e и является функцией температуры, давления и состава равновесных фаз.

$$K_d = \frac{A_e}{C_e}. \quad (3)$$

На рисунке 3 приведена зависимость $A_e = f(C_e)$ при $m = 5$ г/50 см³. Выявлен максимум K_d (рисунок 4) и E (рисунок 5) при $C_0 = 20$ мг/дм³.

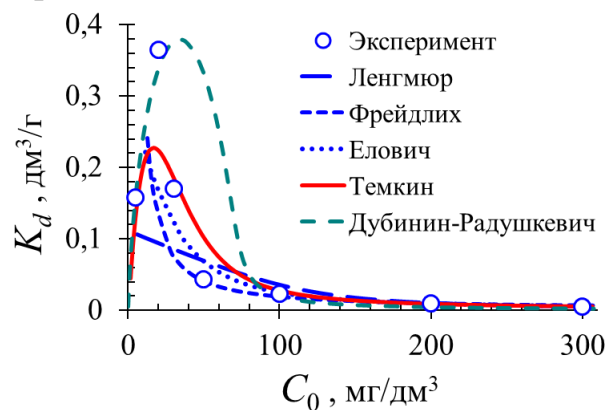
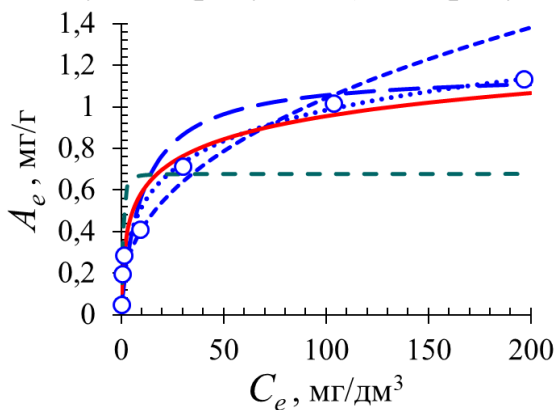


Рисунок 3 – Зависимость $A_e = f(C_e)$ ($m = 5$ г/50 см³) Рисунок 4 – Зависимость $K_d = f(C_0)$ ($m = 5$ г/50 см³)

Величина C_0 определена следующим образом: по значению C_e по уравнению изотермы адсорбции вычислено A_e ; K_d по уравнению (3); E – по уравнению (2); C_0 – из уравнения (1).

Качественное описание экспериментальных данных получено по изотермам Темкина и Дубинина-Радушкевича. Изотермы Ленгмюра, Фрейндлиха и Еловича прогнозируют высокое значение E водных растворов при малых значениях C_0 .

Форма кривых на рисунке 5 идентична графическим зависимостям рисунка 4, что объясняется пропорциональностью величин E и K_d , C_e и C_0 . Прокаленный сорбент наиболее эффективен при небольших концентрациях NH_4^+ в растворе, которые наблюдаются в реальных СВ.

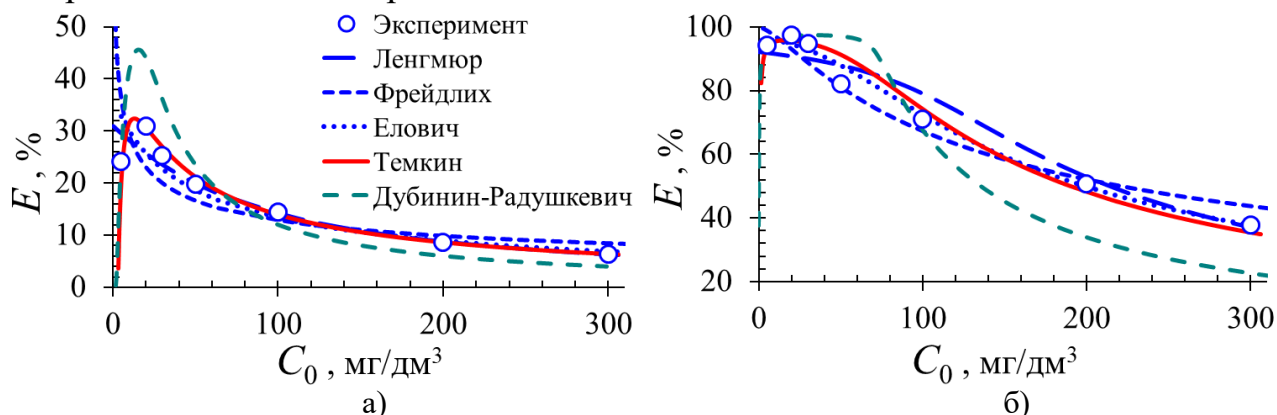


Рисунок 5 – Зависимость E , %, от C_0 , мг/дм³, для дозы сорбента: а) 1 г/50 см³; б) 5 г/50 см³

Выполнены исследования кинетики NH_4^+ – прокаленный сорбент для C_0 в модельных растворах 5, 20, 50 и 100 мг/дм³ для $\tau = 10, 30, 60, 90, 150$ и 180 мин, $v = 200$ об/мин, pH 7. Доза сорбента m принята равной 1, 2 и 5 г на $V = 50$ см³ модельного раствора. В таблице 2 приведены результаты для $m = 2$ г/50 см³.

Таблица 2 – Исследования кинетики NH_4^+ – прокаленный сорбент ($m = 2$ г/50 см³)

τ , мин	C , мг/дм ³	A , мг/г	E , %	C , мг/дм ³	A , мг/г	E , %
$C_0 = 5$ мг/дм ³				$C_0 = 20$ мг/дм ³		
10	4,797	0,0075	5,99	19,104	0,0321	6,41
30	4,160	0,0231	18,49	15,940	0,1096	21,91
60	3,242	0,0456	36,48	12,465	0,1948	38,94
90	2,899	0,0540	43,19	10,338	0,2469	49,35
120	2,713	0,0586	46,85	8,523	0,2911	58,25
150	2,666	0,0597	47,76	8,212	0,2996	59,77
180	2,650	0,0601	48,07	8,160	0,3000	60,03
$C_0 = 50$ мг/дм ³				$C_0 = 100$ мг/дм ³		
10	47,975	0,0749	5,99	97,592	0,1096	4,38
30	44,552	0,1586	12,70	88,257	0,3380	13,53
60	37,394	0,3339	26,73	80,736	0,5226	20,90
90	35,372	0,3839	30,69	78,921	0,5670	22,68
150	33,971	0,4177	33,43	75,550	0,6490	25,98
120	33,193	0,4370	34,96	74,772	0,6681	26,74
180	32,882	0,4449	35,57	74,253	0,6807	27,25

Методом линеаризации здесь и далее определены константы уравнений кинетики Лагергрена, Хо и Маккея, диффузионной и Еловича. На рисунке 6 приведены расчетные кинетические кривые и экспериментальные данные по моделям Лагергрена и Хо и Маккея для $m = 2$ г/50 см³. Все рассмотренные модели имеют

высокий коэффициент детерминации R^2 . Модель Лагергрена наилучшим образом описывает экспериментальные данные по кинетике сорбции NH_4^+ прокаленным сорбентом для всех доз сорбента.

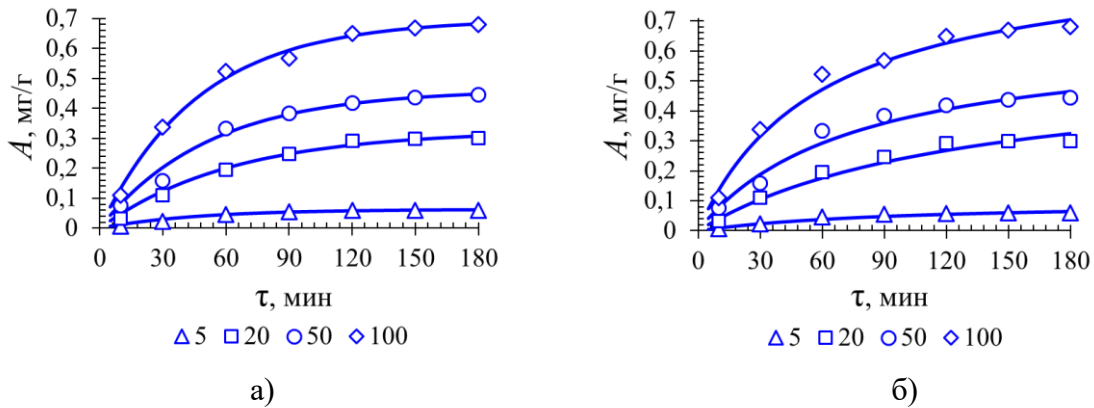


Рисунок 6 – Расчетные кинетические кривые и экспериментальные данные ($m = 2 \text{ г/50 см}^3$) NH_4^+ – прокаленный сорбент по моделям: а) Лагергрена; б) Хо и Маккея

Из стока в р. Кубань отобрана проба СВ и определено в ней содержание NH_4^+ , которое составило $C_0 = 21 \text{ мг/дм}^3$. Исследована кинетика сорбции для каждой дозы сорбента 0,5, 2, 3 и 5 г на 50 см^3 раствора в течение 10, 30, 60, 90, 120, 150 и 180 мин. Определены константы уравнений Лагергрена, Хо и Маккея, Еловича. Лучшее описание кинетики сорбции NH_4^+ получено по модели Лагергрена.

Для проверки наличия максимума функций $K_d = f(C_0)$, $E = f(C_0)$ проведено экспериментальное исследование статистики сорбции в широком диапазоне начальных C_0 концентраций PO_4^{3-} . Концентрация PO_4^{3-} в модельных растворах составляла $C_0 = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 2000, 5000 \text{ мг/дм}^3$; $m = 1, 2$ и 5 г на 50 см^3 раствора, $t = 25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (таблица 3).

Определены параметры сорбции: $v = 200 \text{ об/мин}$, $\text{pH } 7$, $\tau = 120 \text{ мин}$. Получено, что для малых C_e лучшее описание дает изотерма Дубинина-Радускевича (рисунок 7 а), при больших $C_e > 35 \text{ мг/дм}^3$ – изотерма Темкина. Выявлен максимум функциональной зависимости $E = f(C_0)$ (таблица 3) и $K_d = f(C_0)$ (рисунок 7, б). С ростом C_0 величина E сначала возрастает, затем снижается. Наибольшие значения E получены при C_0 от 10 до 35 мг/дм^3 , что соответствует реальным СВ.

Таблица 3 – Исследование фазового равновесия PO_4^{3-} – прокаленный сорбент

C_0 , мг/дм^3	C_e , мг/дм^3	A_e , мг/г	E , %	C_e , мг/дм^3	A_e , мг/г	E , %	C_e , мг/дм^3	A_e , мг/г	E , %
	Масса сорбента 1 г/50 см^3			Масса сорбента 2 г/50 см^3			Масса сорбента 5 г/50 см^3		
2	0,145	0,0928	92,80	0,072	0,0482	96,48	0,063	0,0194	97,00
5	0,187	0,2405	96,30	0,112	0,1223	97,80	0,104	0,0490	98,03
10	0,242	0,4874	97,60	0,134	0,2465	98,68	0,104	0,0990	99,01
20	0,561	0,9742	97,22	0,178	0,4954	99,13	0,107	0,1990	99,50
50	11,29	1,9446	77,65	0,287	1,2436	99,44	0,123	0,4990	99,77
100	38,96	3,0689	61,44	0,644	2,4830	99,37	0,132	0,9989	99,88
200	118,4	4,1300	41,39	37,74	4,0783	81,51	0,154	1,9986	99,93
300	214,7	4,3698	29,17	100,4	5,0368	67,21	0,181	2,9989	99,94
500	412,0	4,6044	18,43	280,4	5,6301	45,06	67,16	4,3631	87,25
1000	910,7	4,9258	9,85	768,6	6,1718	24,70	391,22	6,2874	62,86
2000	-	-	-	1762,7	6,8196	13,65	1350,4	7,1791	35,90
5000	-	-	-	-	-	-	4415,1	8,0829	16,17

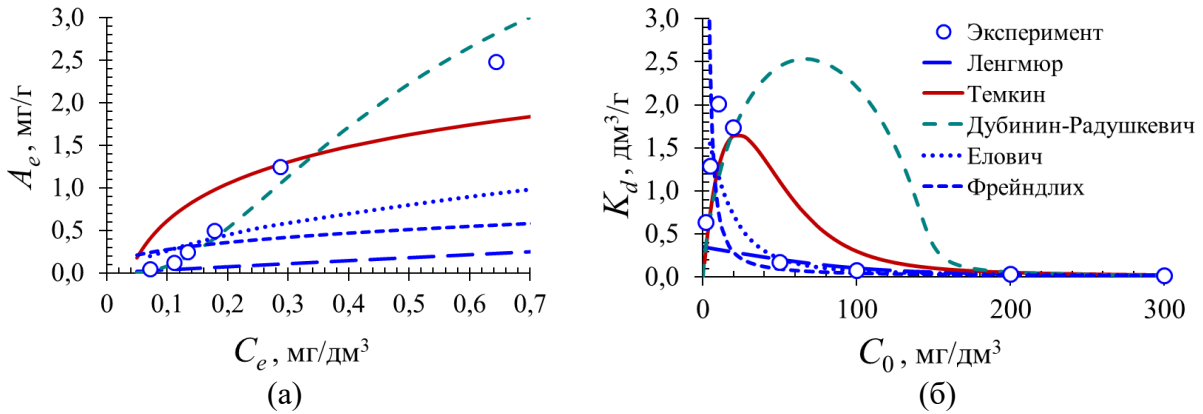


Рисунок 7 – Зависимости: а) $A_e = f(C_e)$ при $m = 2$ г/50 см³; б) $K_d = f(C_0)$ при $m = 1$ г/50 см³

Кинетика сорбции PO_4^{3-} проведена для модельных растворов: $C_0 = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 300$ мг/дм³; $m = 1, 2$ и 5 г на 50 см³ раствора, $v = 200$ об/мин, рН 7, $t = 25 \pm 2$ °С. На рисунке 8 приведены расчетные кривые и экспериментальные данные по моделям Лагергрена и Хо и Маккея для C_0 , в мг/дм³: 2, 5, 10 и 20. Лучшее описание получено по модели Хо и Маккея для всех начальных концентраций PO_4^{3-} . Положение кривых свидетельствует о быстрой кинетике процесса, что позволяет рассматривать прокаленный сорбент как гомогенную систему.

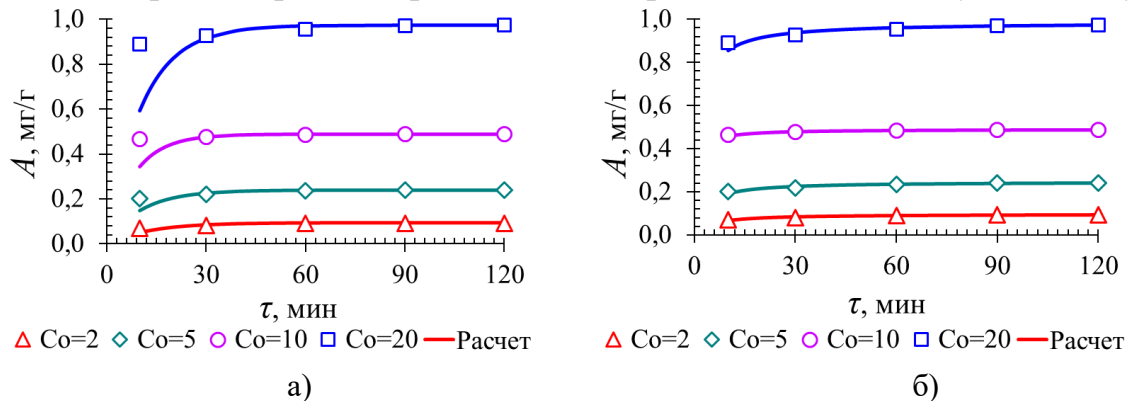


Рисунок 8 – Зависимость $A = f(\tau)$ при значениях C_0 , в мг/дм³: 2, 5, 10 и 20:

а) модель Лагергрена; б) модель Хо и Маккея

Из стока в р. Кубань отобрана проба СВ и определено в ней содержание PO_4^{3-} , $C_0 = 12,2$ мг/дм³. Исследована кинетика сорбции PO_4^{3-} прокаленным сорбентом при $t = 25 \pm 2$ °С; $V = 50$ см³. Параметры сорбции: $v = 200$ об/мин, рН 7, $\tau = 120$ мин. Сравнение E в зависимости от m для модельных растворов и реальной СВ приведено на рисунке 12. Кривая эффективности для СВ с концентрацией $C_0 = 12,2$ мг/дм³ расположена выше кривой эффективности для модельных растворов с $C_0 = 10$ мг/дм³. Чем больше C_0 , тем больше E при равных условиях.

В пятой главе для выявления причин качественного несоответствия положения экспериментальных точек по статике сорбции зависимостей $K_d = f(C_e)$, $E = f(C_0)$ расчетным кривым по изотермам адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Еловича и качественного согласования по изотермам Темкина и Дубинина-Радужкевича выполнен анализ изотерм адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Еловича, Темкина и Дубинина-Радужкевича на наличие экстремума функции $K_d = f(C_e)$, $E = f(C_0)$. Анализ уравнения (3) для изотерм Ленгмюра, Фрейндлиха, Еловича показал, что с возрастанием C_e , а, следовательно, и C_0 , величина K_d

является монотонно убывающей функцией во всем диапазоне концентраций. В этом случае E при малых значениях C_0 стремится к 100 %, что не согласуется с собственными опытными данными и данными других исследователей.

Уравнение для расчета K_{dT} , $\text{дм}^3/\text{г}$, по изотерме Темкина

$$K_{dT} = \frac{RT}{C_e B_T} \ln(k_T C_e) \quad (4)$$

где B_T – константа Темкина, $\text{Дж} \cdot \text{г}/(\text{моль} \cdot \text{мг})$; k_T – константа Темкина, $\text{дм}^3/\text{мг}$; $R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T – температура, К .

Уравнение для расчета K_{dDR} , $\text{дм}^3/\text{г}$, по изотерме Дубинина-Радускевича

$$K_{dDR} = \frac{A_m}{C_e} \exp \left(-k_{DR} \left[RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \right]^2 \right). \quad (5)$$

где A_m – максимальное значение величины адсорбции, $\text{мг}/\text{г}$; k_{DR} – константа Дубинина-Радускевича, $\text{моль}^2/\text{кДж}^2$; ε – потенциал Поляни, $\text{кДж}/\text{моль}$; R – универсальная газовая постоянная $R = 8,314 \cdot 10^{-3} \text{ кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T – температура, К .

Производные функций

$$\frac{dK_{dT}}{dC_e} = \frac{\frac{RT}{B_T} [1 - \ln(k_T C_e)]}{C_e^2} \quad (4)$$

$$\frac{dK_{dDR}}{dC_e} = \frac{A_m \left(2 k_{DR} (RT)^2 \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) - C_e - 1 \right)}{e^{k_{DR} (RT)^2 \ln^2 \left(\frac{C_e+1}{C_e} \right)} \cdot C_e^2 (C_e + 1)}. \quad (5)$$

Проведенный анализ уравнений (4) и (5) показал наличие корня функции, при котором производная dK_d/dC_e равна 0. Обе функции меняют знак с плюса на минус, что является достаточным для существования максимума функций $K_{dT} = f(C_e)$, $K_{dDR} = f(C_e)$ и $K_{dT} = f(C_0)$, $K_{dDR} = f(C_0)$. Для всех экспериментальных данных по статике сорбции построены функциональные зависимости dK_d/dC_e и определены корни функций, показано качественное согласование теоретических зависимостей и экспериментальных данных. На основе анализа сделан вывод о прогнозировании максимума E и K_d по изотермам Темкина и Дубинина-Радускевича.

В шестой главе для повышения сорбционной емкости по NH_4^+ разработан способ получения цеолита для очистки СВ от NH_4^+ , определены его физико-химические показатели (таблица 4), себестоимость, проведены исследования на модельных водных растворах и реальных СВ, и предложена технологическая схема доочистки СВ от NH_4^+ .

Таблица 4 – Физико-химические показатели цеолита из ЗШО

Показатель	Значение
Внешний вид	Порошок коричневого цвета
Насыпная плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	0,590
Суммарный объем пор по воде, $\text{см}^3/\text{г}$	0,94
Массовая доля воды, %	8,71
Прочность на истирание, %	51,1
Массовая доля золы, %	81,9
Адсорбционная активность по метиленовому-синему, $\text{мг}/\text{г}$	8,8
Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	42

Цеолит получен путем гидротермальной обработки 2 М раствором гидроксида натрия в соотношении 10 см³ на 1 г подготовленного прокаленного сорбента из ЗШО Новочеркасской ГРЭС. Сделан вывод, что гидротермальная обработка прокаленного сорбента способствует повышению сорбционной емкости цеолита. Статическая сорбция в системе цеолит – NH₄⁺ проведена при $m = 1, 2$ и 5 г на $V = 50$ см³ раствора при изменении C_0 от 2 до 2000 мг/дм³ (таблица 5).

Таблица 5 – Экспериментальные исследования фазового равновесия в системе цеолит – NH₄⁺ для модельных смесей при $t = 25 \pm 2$ °С

C_0 , мг/дм ³	C_e , мг/дм ³	A_e , мг/г	E , %	C_e , мг/дм ³	A_e , мг/г	E , %	C_e , мг/дм ³	A_e , мг/г	E , %
	Доза сорбента 1 г/50 см ³			Доза сорбента 2 г/50 см ³			Доза сорбента 5 г/50 см ³		
2	0,187	0,091	90,81	0,138	0,047	93,38	0,116	0,019	94,73
5	0,275	0,236	94,61	0,180	0,121	96,53	0,128	0,049	97,67
10	0,355	0,483	96,52	0,223	0,245	97,86	0,119	0,099	98,92
20	0,795	0,961	96,10	0,321	0,492	98,45	0,132	0,199	99,40
50	16,78	1,677	67,08	0,688	1,234	98,68	0,352	0,497	99,36
100	57,54	2,176	43,54	11,14	2,231	89,28	0,344	0,997	99,69
200	150,9	2,599	25,99	98,34	2,635	52,68	0,856	1,992	99,61
300	248,4	2,813	18,74	195,2	2,804	37,39	33,95	2,693	89,75
500	446,3	3,100	12,41	391,5	3,079	24,64	211,9	3,080	61,60
1000	-	-	-	887,5	3,645	14,59	701,0	3,649	36,49
2000	-	-	-	-	-	-	1691,3	4,677	23,39

Определены параметры сорбции: $\nu = 200$ об/мин, pH 7, $\tau = 90$ мин. При массе цеолита 1, 2 и 5 г величины K_d и E имеют максимум, который с ростом дозы цеолита сдвигается в сторону больших C_0 . Обработка данных проведена по изотермам Темкина и Дубинина-Радускевича. В области малых C_0 от 0 до 60 мг/дм³ лучшее описание дает изотерма Дубинина-Радускевича (рисунок 9 а), при C_0 свыше 150 мг/дм³ предпочтение отдано изотерме Темкина (рисунок 9 б). Выявлены максимумы функций $E = f(C_0)$ (рисунок 10) и $K_d = f(C_e)$ (рисунок 11).

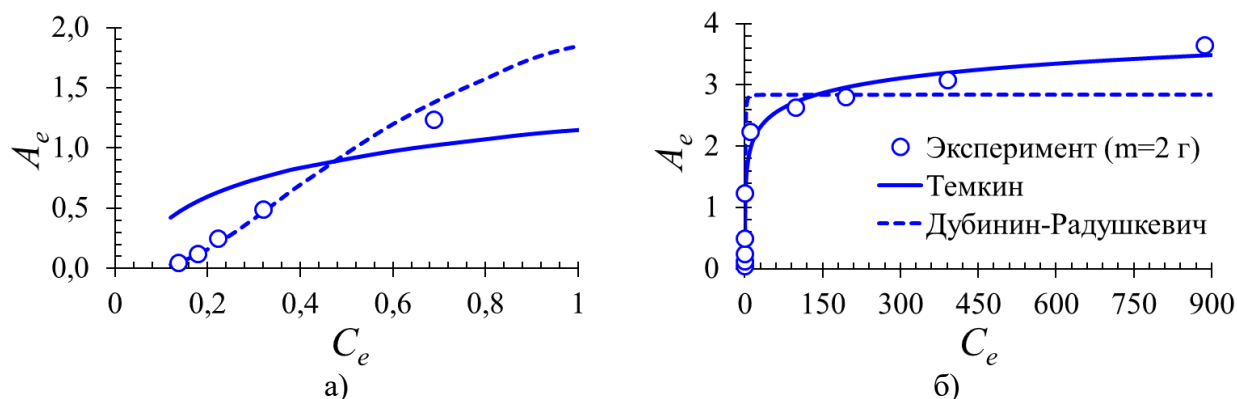
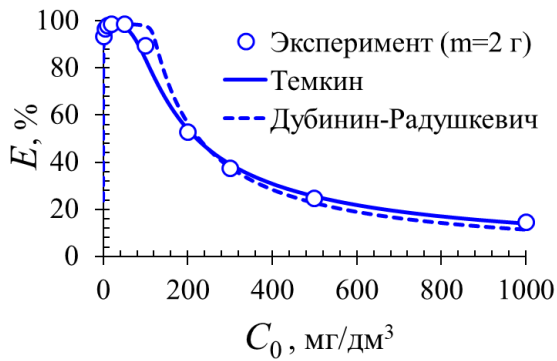
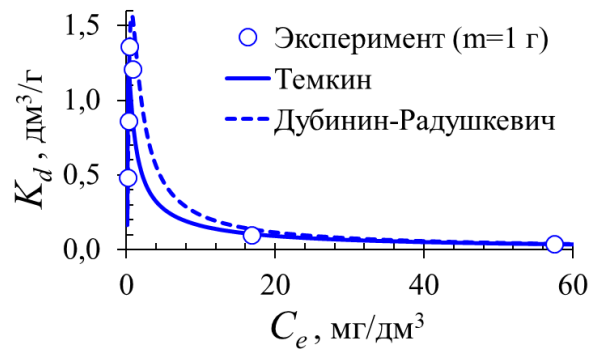
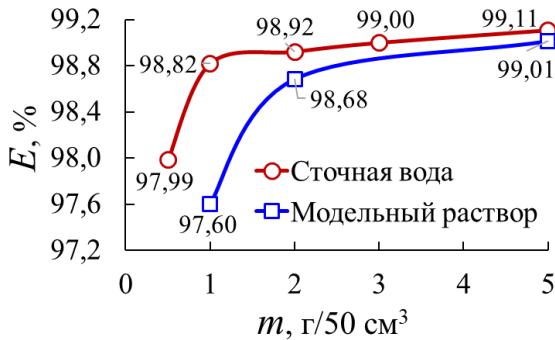
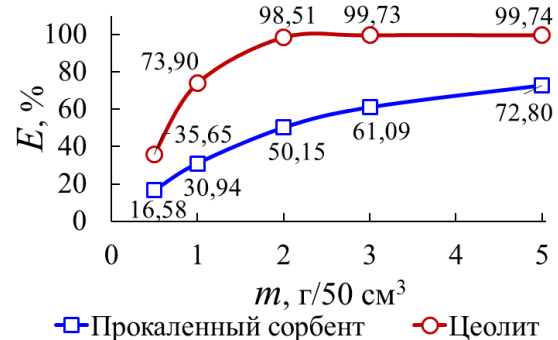
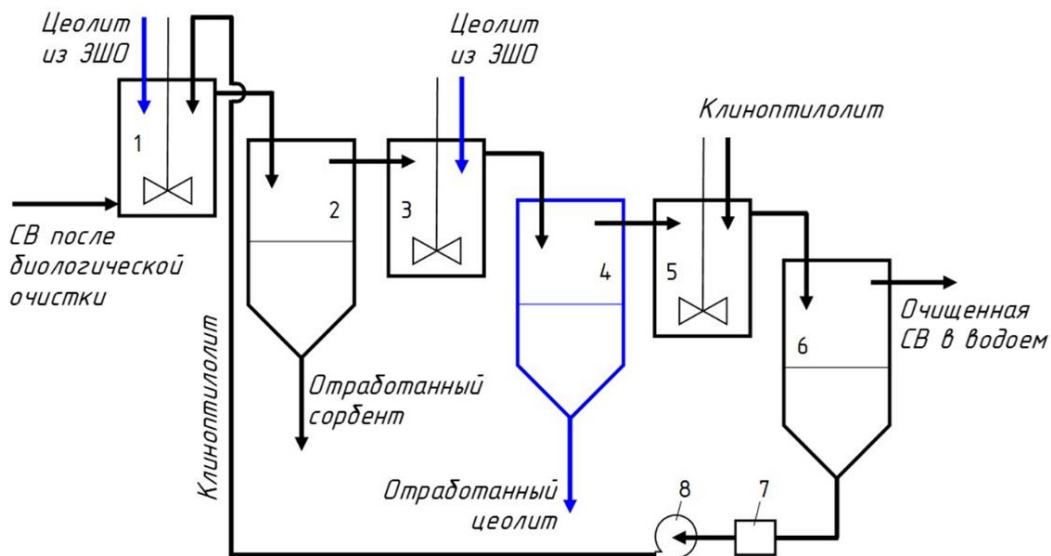


Рисунок 9 – Изотермы Темкина и Дубинина-Радускевича для дозы цеолита 2 г/50 см³: а) C_e от 0 до 1 мг/дм³; б) C_e от 0 до 900 мг/дм³

Получено качественное согласование теории и эксперимента для обеих изотерм. Для определения E очистки от NH₄⁺ цеолитом из реальных СВ проведены отборы образцов воды из стока в р. Кубань. Цеолит показал более высокую E очистки от NH₄⁺ для модельных растворов (для всех исследуемых концентраций C_0) и реальной СВ (при $C_0 = 45,27$ мг/дм³ в СВ) по сравнению с прокаленным сорбентом (при $C_0 = 21$ мг/дм³ в СВ) (рисунок 13).

Рисунок 10 – $E = f(C_0)$ для $m = 2 \text{ г/50 см}^3$ Рисунок 11 – $K_d = f(C_e)$ для $m = 1 \text{ г/50 см}^3$ Рисунок 12 – $E = f(m)$ для модельных растворов PO_4^{3-} – прокаленный сорбент при $C_0 = 10 \text{ мг/дм}^3$ и СВ при $C_0 = 12,2 \text{ мг/дм}^3$ Рисунок 13 – Сравнение эффективности очистки СВ от NH_4^+ прокаленным сорбентом и цеолитом

Для доочистки СВ от NH_4^+ после биологической очистки предложена технологическая схема (рисунок 14). Очистка от NH_4^+ включает 3 ступени статической сорбционной очистки. На 1-й и 2-й ступени в качестве сорбента используется цеолит из ЗШО, показавший высокую эффективность очистки в области концентраций NH_4^+ от 10 до 30 мг/дм³, а на 1-й и 3-й – клиноптилолит. На доочистке использован клиноптилолит, имеющий большую сорбционную емкость.



1, 3, 5 – смеситель; 2, 4, 6 – отстойник; 7 – сборник сорбента, 8 – насос

Рисунок 14 – Схема очистки СВ от ионов аммония

Стоимость очистки 1 м³ раствора с концентрацией NH_4^+ 40 мг/дм³ – 201 руб. Обоснована экономическая эффективность использования цеолита из ЗШО для очистки СВ от NH_4^+ . Себестоимость цеолита составляет 17,5 руб. за 1 кг. Размер

предотвращенного экологического ущерба, причиненного сбросом 70 м³/сут. с концентрацией NH₄⁺ 40 мг/дм³, составляет 13103,5 тыс. руб. в год.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведены исследования эффективности очистки модельных водных растворов и СВ от NH₄⁺ и PO₄³⁻ модифицированными ЗШО Новочеркасской ГРЭС.

Определена удельная активность естественных радионуклидов ЗШО, в Бк/кг: ⁴⁰K = 737,1; ²²⁶Ra = 95,32; ²³²Th = 59,45; ¹³⁷Cs <6. Удельная эффективная активность составила $A_{эфф} = 235,3 \pm 21,4$ Бк/кг. Применение сорбентов на основе ЗШО Новочеркасской ГРЭС является экологически безопасным ввиду их низкой суммарной удельной активности.

Проведен мониторинг состояния реки Кубань по 10 точкам в черте города Краснодара за период 2018-2022 гг. На основе количественного химического и микробиологического анализов отобранных проб установлено значительное превышение ПДК по NH₄⁺, PO₄³⁻ и другим поллютантам, что связано с неудовлетворительной очисткой сбрасываемых стоков в р. Кубань.

Экспериментально исследована статика и кинетика на модельных растворах и реальных СВ в системах NH₄⁺ – прокаленный сорбент, PO₄³⁻ – прокаленный сорбент. Выявлен максимум зависимостей $E = f(C_0)$ и $K_d = f(C_0)$ при C_0 от 5 до 300 мг/дм³ для NH₄⁺ – прокаленный сорбент и от 2 до 5000 мг/дм³ для PO₄³⁻ – прокаленный сорбент.

Выполнен анализ изотерм адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Еловича, Темкина и Дубинина-Радускевича на наличие экстремума функции $K_d = f(C_e)$, $E = f(C_0)$. Показано, что зависимости $K_d = f(C_e)$ и $E = f(C_0)$ на основе изотерм Ленгмюра, Фрейндлиха и Еловича являются монотонно убывающими во всем диапазоне концентраций адсорбтива в растворе, а на основе изотерм Темкина и Дубинина-Радускевича имеют максимум в области исследуемых концентраций адсорбтива в растворе.

Экспериментально подтвержден максимум зависимостей $E = f(C_0)$ и $K_d = f(C_0)$ для раствора NH₄⁺ – цеолит в диапазоне начальных концентраций NH₄⁺ от 2 до 2000 мг/дм³ в растворе.

Разработан способ получения цеолита путем гидротермальной обработки прокаленного сорбента из ЗШО Новочеркасской ГРЭС для очистки СВ от NH₄⁺ (патент РФ на изобретение № 2829776). Физико-химические показатели цеолита: насыпная плотность 0,590 г/см³; суммарный объем пор по воде 0,94 см³/г; массовая доля воды 8,71 %; прочность на истирание 51,1 %; массовая доля золы 81,9 %; адсорбционная активность по метиленовому-синему 8,8 мг/г; удельная площадь поверхности 42 м²/г. Цеолит показал более высокую эффективность очистки от NH₄⁺ на модельных водных растворах и реальной СВ по сравнению с прокаленным сорбентом. Себестоимость цеолита составляет 17,5 руб. за 1 кг.

Для доочистки СВ от NH₄⁺ после биологической очистки СВ предложена технологическая схема с применением цеолита и клиноптилолита, и обоснована экономическая эффективность использования цеолита. Стоимость очистки 1 м³ раствора с концентрацией NH₄⁺ 40 мг/дм³ – 201 руб. Размер предотвращенного экологического ущерба, причиненного сбросом 70 м³/сут. с концентрацией NH₄⁺ 40 мг/дм³ составляет 13103,5 тыс. руб./год.

Результаты испытаний цеолита на основе ЗШО Новочеркасской ГРЭС и технология его производства переданы ООО «Газпром трансгаз Краснодар» (Анапское ЛПУМГ), ООО «ССК Газрегион» (Лаборатория управления контроля качества в Ленинградской области), АО «Анапа Водоканал».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, включенных в международные базы цитирования SCOPUS и Web of Science:

1. Korotkova, T. G. Study of the efficiency of water treatment from ammonium ions by a calcined sorbent from ash-and-slag waste / T. G. Korotkova, **A. M. Zakolyukina**, S. A. Bushumov // Теоретическая и прикладная экология. – 2023. – № 4. – С. 99-109. *WoS, Scopus*
2. Короткова, Т.Г. Исследование адсорбционного равновесия в системе ионы аммония–прокаленный сорбент из золошлаковых отходов теплоэнергетики / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2023. – № 2 (Т. 13). – С. 291-303. *Chemical abstracts, WoS*
3. Короткова, Т. Г. Применение моделей кинетики для исследования скорости сорбции в системе ионы аммония – прокаленный сорбент / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2024. – № 1 (Т.14). – С. 6-18. *Chemical abstracts, WoS*
4. Короткова, Т.Г. Применение прокаленного сорбента из золошлаковых отходов предприятий теплоэнергетики для очистки сточных вод / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина**, В. И. Демин // Химия в интересах устойчивого развития. – 2024. – № 2(Т. 32). – С. 248-254. *WoS*
5. Короткова, Т.Г. Удаление фосфатов из водных растворов с помощью статической сорбции на золошлаковом сорбенте. Анализ коэффициентов распределения на основе изотерм адсорбции / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Журнал физической химии. – 2024. – № 10(Т. 98). – С. 97-109. *WoS, Scopus*
6. Короткова, Т.Г. Применение адсорбента на основе золошлаковых отходов предприятий теплоэнергетики для удаления ионов аммония / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Журнал прикладной химии. – 2024. – № 11-12 (Т. 97). – С. 783-794. *WoS, Scopus*
7. Короткова, Т. Г. Кинетика сорбции фосфатов сорбентом из золошлаковых отходов / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2025. – № 3 (Т.15). – С. 423-432. *Chemical abstracts, WoS*

В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

8. Короткова, Т. Г. Показатели качества воды вдоль побережья реки Кубань города Краснодара / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 177-185. *K1*
9. Короткова, Т. Г. Анализ состояния реки Кубань в черте города Краснодара на основе частного отбора проб поверхностных природных вод / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 3. – С. 62-69. *K2*

Статья в прочих изданиях:

10. Короткова, Т. Г. Анализ состояния рек России / Т. Г. Короткова, **A. М. Заколюкина** // Научные труды КубГТУ. – 2018. № 11. – С. 49-60.

Материалы конференций:

11. **Заколюкина, А.М.** Анализ экологического состояния реки Кубани / **A. М. Заколюкина**, А. А. Левчук // Сб. матер. междун. науч. экол. конф. «Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения». – КубГАУ, 2021. – С. 514-516.

12. **Заколюкина, А. М.** Мониторинг показателей качества воды реки Кубань в пределах города Краснодара / **А. М. Заколюкина** // Матер. междуна. науч. конф. «Молодые исследователи – регионам». – Вологда, 2021. – С. 418-420.
13. **Заколюкина, А. М.** Загрязнение водного биологического объекта / **А. М. Заколюкина**, Т. Г. Короткова // Матер. Всерос. науч.-практ. конф. (с междуна. участием) «Актуальные вопросы научно-технологического развития агропромышленного комплекса». – Махачкала. 2023. ФГБНУ «ФАНЦ РД». – С. 729-733.
14. **Заколюкина, А. М.** Мониторинг показателей качества стока в реку Кубань / **А. М. Заколюкина** // Сб. матер. VII междуна. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой «Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных». – Омск : СибАДИ, 2023. – С. 292-295.
15. **Заколюкина, А. М.** Определение эффективности очистки сточных вод при проведении лабораторных исследований на сорбентах / **А. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Сб. матер. VII междуна. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой «Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных». – Омск : СибАДИ, 2023. – С. 296-299.
16. Бушумов, С. А. Исследование сорбционных свойств сорбентов из золошлаковых отходов по очистке воды от нефтепродуктов и ионов аммония / С. А. Бушумов, **А. М. Заколюкина**, А. С. Данильченко, Т. Г. Короткова // Сб. матер. «Передовые исследования Кубани». – Краснодар: Кубанский научный фонд, 2023. – С. 62-67.
17. **Заколюкина, А. М.** Применение сорбента из золошлаковых отходов теплоэнергетики для очистки сточных вод от ионов аммония и фосфатов / **А. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов, А. С. Данильченко, Т. Г. Короткова // Сб. матер. «Передовые исследования Кубани». – Краснодар: Кубанский научный фонд, 2024. – С. 177-183.
18. **Заколюкина, А. М.** Влияние нефтеперерабатывающего завода на показатели качества водного объекта / **Заколюкина А. М.** // Матер. VII международного молодежного экологического форума. – Кемерово: КузГТУ, 2024. – С. 0108.1-0108.4.
19. **Заколюкина, А. М.** Применение изотермы Темкина для описания фазового равновесия в системе ионы аммония – сорбент из золошлаковых отходов теплоэнергетики / **А. М. Заколюкина** // Сб. матер. VIII междуна. науч.-практ. конф. «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Кемерово: КузГТУ, 2024. – С. 143.1-143.5.
20. Короткова, Т. Г. Удаление ионов аммония из бытовых сточных вод и стоков агропромышленных предприятий / Т. Г. Короткова, **А. М. Заколюкина** // Сб. науч. трудов VI междуна. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей «Актуальные проблемы техносферной безопасности». – Ульяновск: УГТУ, 2024. – С. 157-160.
21. **Заколюкина, А. М.** Влияние селитебных территорий поселкового типа на реку Кубань в черте города Краснодара / **А. М. Заколюкина** // Матер. III междуна. науч.-практич. конф. «Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений». – Кемерово : КузГТУ, 2024. – С. 410.1-410.4.
22. Короткова, Т.Г. Очистка сточных вод от аммоний-ионов и фосфатов / Т. Г. Короткова, **А. М. Заколюкина** // Сб. статей по материалам XX междуна. науч.-практ. конф. «Гражданская оборона и природно-технические системы». – Воронеж: Воронежский ГТУ, 2024. – С. 153-156.

Патент на изобретение

23. Патент РФ на изобретение № 2829776 В01J 20/30 Способ получения цеолита из золошлаковых отходов / Т. Г. Короткова, **А. М. Заколюкина**, С. А. Бушумов // Патентообладатель ФГБОУ ВО «КубГТУ». Заявка № 2024107339 от 21.03.2024. Оpubл.: 5.11.2024 Бюл. № 31.

Подписано в печать 18.12.2025.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Гарнитура Times New Roman.
Печать цифровая. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,17. Тираж 100 экз.
Заказ № 2996.

Отпечатано в типографии издательства «Экоинвест»
350072, г. Краснодар, ул. Зиповская, 9
Тел. +7 (918) 433-19-96
Е-mail: ecoinvest@mail.ru
<http://publishprint.ru>