

На правах рукописи



Бабилов Олег Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ИОНИТНЫХ
ФИЛЬТРОВ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ТЭС
НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА**

Специальность: 2.4.5. – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автономная распределенная энергетика и химия» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»
Филимонова Антонина Андреевна

Официальные оппоненты: **Очков Валерий Федорович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теоретических основ теплотехники им. В.П. Вукаловича (ТОТ) ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Ларин Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Химия и химические технологии в энергетике» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск**

Защита состоится «15» декабря 2026 года в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224, тел. 8(843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Ионитные водоподготовительные установки являются неотъемлемой частью энергетических комплексов России, обеспечивая производство химически обессоленной воды для питания паровых котлов на тепловых электрических станциях. Технология ионитной водоподготовки успешно применяется в энергетике более 80 лет, что подтверждает ее технологическую надежность, универсальность, способность обеспечивать глубокую степень обессоливания при изменяющемся составе исходной воды, а также высокую эффективность при очистке турбинного конденсата. Одним из главных эксплуатационных недостатков ионообменной технологии является перерасход химических реагентов на стадии регенерации, что приводит к увеличению объема высокоминерализованных сточных вод. Так, годовое потребление природной воды только для Нижнекамской ТЭЦ-1 составляет порядка 13 млн тонн, а объем сточных вод превышает 4,5 млн тонн, что требует значительных экономических затрат на нейтрализацию и утилизацию. Применяемые на сегодняшний день методы регенерации ионитных фильтров не позволяют одновременно достичь максимального качества восстановления обменной емкости ионита и минимального расхода используемых реагентов. Важной и актуальной научно-технической задачей в условиях цифровизации энергетической отрасли является совершенствование технологии регенерации ионитных фильтров с использованием междисциплинарного подхода. Объединяя современные технические решения в области водоподготовки с методами математического моделирования, вычислительной гидродинамики и машинного обучения возможно осуществить переход от жестко регламентированного выбора параметров регенерации к научно-обоснованной цифровой системе управления ионитными водоподготовительными установками (ВПУ). Такой подход позволит достичь целей энерго- и ресурсосбережения и уменьшить вредное воздействие на окружающую среду.

Степень научной разработанности проблемы

Современные направления совершенствования ионообменной технологии включают применение схем противоточной регенерации фильтров, использование ионитов с улучшенными характеристиками, оптимизацию конструкции фильтров и создание малосточных схем. Значительный вклад в развитие противоточных технологий и модернизацию ионитных ВПУ внесли Рябчиков Б.Е., Очков В.Ф., Юрчевский Е.Б., Балаев И.С., Громов С.Л., Жадан А.В., Ларин А.Б., Веселовская Е.В., Фейзиев Г.К. и другие исследователи. Существенный вклад в области математического моделирования ионного обмена и ионитных фильтров внесли Голованчиков А.Б., Натарева С.В., Чичиров А.А., Лапшин Н.А., Груздев А.Н., а также зарубежные авторы Chr. Boyadjiev, Shafeeyan M.S., Lizarralde I., Gomes C.P., Zhang J. С развитием технологий суперкомпьютерного моделирования для исследования структуры потоков в ионитных фильтрах все чаще применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD), представленные в работах Dixon A.G., Jurtz N., Wu C.Y., Gao X. Отдельным направлением является применение методов машинного обучения для прогнозирования показателей работы ВПУ.

Возможность использования нейросетевых моделей для анализа качества воды, оптимизации режимов работы ВПУ, определения доз реагентов и прогнозирования параметров технологических процессов представлена в работах Al-Ghazawi et al., Jawad et al., Ibrahim et al., Lin et al., Kim et al., Kabuba J.

Выбор и обоснование направления исследований

Анализ литературных данных показал, что противоточные технологии, математические модели, CFD-моделирование и методы машинного обучения исследуются по отдельности и до сих пор не существует подхода, объединяющего указанные методы исследования для научно обоснованного выбора режимов работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров. В связи с этим в качестве направления исследования выбрана разработка системного подхода для анализа и совершенствования процессов ионитной водоподготовки. Выбор данного направления исследований обусловлен необходимостью снижения расхода реагентов и воды на собственные нужды, уменьшения объема сточных вод и повышения эффективности регенерации ионитных фильтров при сохранении требуемого качества обессоленной воды.

Цель работы: разработка системного подхода к моделированию, прогнозированию и совершенствованию процессов работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров водоподготовительных установок ТЭС для обеспечения энерго- и ресурсосбережения, снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Объект исследования: ионитные водоподготовительные установки ТЭС.

Задачи исследования:

1. Провести анализ современного состояния и направлений совершенствования ионообменных технологий водоподготовки ТЭС и обосновать необходимость разработки системного подхода к моделированию работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров.

2. Разработать математическую модель проточного ионитного фильтра на основе однопараметрической диффузионной модели, получить аналитические решения при различных граничных условиях и сопоставить результаты моделирования с экспериментальными данными.

3. Разработать и верифицировать цифровую CFD-модель ионитного фильтра в стационарной и нестационарной постановках.

4. Разработать прогностическую модель работы ионитной ВПУ на основе методов машинного обучения для прогнозирования продолжительности фильтроцикла и удельных расходов реагентов на регенерацию по параметрам исходной воды.

5. Разработать предложения по модернизации технологии повторно-последовательной регенерации и отмывки ионитных фильтров «каскад» на основе методов математического моделирования, CFD-моделирования и нейросетевого прогнозирования для ионитной ВПУ действующей ТЭЦ. Провести технико-экономический расчет, подтверждающий целесообразность внедрения разработанных решений.

Методология и методы исследования

Для решения задач исследования применялись фундаментальные основы и положения высшей математики, физической химии, гидродинамики, а также методов математического моделирования, вычислительной гидродинамики (CFD) и машинного обучения.

Научная новизна исследования:

1. Разработана математическая модель проточного ионитного фильтра на основе однопараметрической диффузионной модели в стационарной и нестационарной постановке задачи, отличающаяся сравнительным анализом полученных аналитических решений для четырех постановок граничных условий.

2. Разработана и верифицирована цифровая CFD-модель ионитного фильтра в программном комплексе COMSOL Multiphysics, отличающаяся возможностью проведения анализа гидродинамики, массопереноса, степени регенерации и стадии отмывки, а также позволяющая оценить влияние технологических параметров на эффективность процесса регенерации ионита.

3. Разработана и верифицирована нейросетевая прогностическая модель работы ионитной ВПУ, позволяющая прогнозировать продолжительность фильтроцикла и удельные расходы реагентов на регенерацию по параметрам исходной воды.

4. Разработан системный научно-обоснованный подход к интеллектуализации управления процессами работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров и совершенствованию технологии повторно-последовательной регенерации и отмывки ионитных фильтров «каскад», основанный на интеграции однопараметрической диффузионной модели, CFD-моделирования, нейросетевого прогнозирования в рамках единой системы – «цифрового помощника».

Теоретическая значимость заключается в обосновании системного подхода к описанию процессов работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров на основе совместного использования однопараметрической диффузионной математической модели, CFD-моделирования и нейросетевого прогнозирования, что дает возможность для совершенствования технологии повторно-последовательной регенерации ионитных фильтров и перехода к цифровому интеллектуальному сопровождению принятия решений при эксплуатации ионитных ВПУ.

Практическая значимость полученных результатов:

1. На основе аналитических решений однопараметрической диффузионной модели разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать выходные концентрационные кривые и уточнять объем реагентов для регенерации промышленных ионитных фильтров, что способствует снижению удельных расходов реагентов и воды, увеличению фильтроцикла, минимизации рисков гипсования и органического отравления ионитов, а также повышению экологической безопасности ВПУ ТЭС.

2. Разработанная и верифицированная CFD-модель может быть использована для расчета гидравлического сопротивления слоя, определения степени

регенерации слоя ионита, объема отмывочных вод и оценки влияния технологических параметров на эффективность процесса регенерации.

3. Предложена концепция системы «цифровой помощник» – предиктивной аналитической системы на основе диффузионной модели, CFD-модели и нейросетевой прогностической модели для расчета необходимого объема и концентрации реагентов для каждого ионитного фильтра, продолжительности регенерации и отмывки, позволяющей осуществлять управление переключениями потоков и оценивать продолжительность последующего фильтроцикла по параметрам исходной воды.

4. На основе системного подхода разработаны предложения по модернизации технологии повторно-последовательной регенерации и отмывки ионитных фильтров, позволяющие добиться целей ресурсосбережения, повышения эффективности работы ионитных ВПУ.

Достоверность основных результатов диссертационной работы подтверждается использованием фундаментальных положений теории процессов химической технологии, высшей математики, вычислительной гидродинамики, методов математического и цифрового моделирования, а также современных методов анализа данных и машинного обучения. Полученные результаты согласуются с аналитическими решениями, результатами промышленных экспериментов и показателями работы действующих ионитных водоподготовительных установок.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель проточного ионитного фильтра на основе однопараметрической диффузионной модели, включающая аналитические решения для четырех вариантов граничных условий, и прикладная компьютерная программа для расчета выходных концентрационных кривых реагента и продуктов обмена в зависимости от характеристик ионитного фильтра, ионитной загрузки, используемого реагента и режима регенерации.

2. Результаты CFD-моделирования ионитного фильтра, подтверждающие возможность применения разработанной цифровой модели для анализа гидродинамики, массопереноса, степени регенерации и стадии отмывки, а также оценки влияния технологических параметров на эффективность регенерации.

3. Нейросетевая прогностическая модель работы ионитной ВПУ, позволяющая прогнозировать продолжительность фильтроцикла и удельных расходов реагентов на регенерацию по показателям качества исходной воды.

4. Научно-обоснованный подход к интеллектуализации управления процессами работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров, основанный на интеграции однопараметрической диффузионной модели, CFD-моделирования и нейросетевого прогнозирования в системе «цифровой помощник».

5. Предложения по модернизации технологии повторно-последовательной регенерации и отмывки ионитных фильтров «каскад» для ионитной ВПУ действующей ТЭЦ.

Реализация результатов работы:

Проведены работы по моделированию регенерации ионитных фильтров и опытно-промышленные испытания на блочной ионитной водоподготовительной установке в филиале АО «ТГК-16» – Нижнекамская ТЭЦ (ПТК-1). Разработаны технические решения по совершенствованию противоточной повторно-последовательной регенерации и отмывки промышленных ионитных фильтров.

Соответствие диссертации паспорту специальности

По направлениям исследований диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы» в части пп. 1-5, 7.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы представлены в 4 публикациях в журналах из перечня ВАК РФ и Белого списка, в 9 публикациях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Всего 29 публикаций. Принято очное участие с тезисами докладов по теме диссертационной работы на 14 международных и всероссийских конференциях.

Перечень конференций с очным участием автора: 15-я Международная научно-техническая конференция «Problems of energy systems and thermal power complexes» (г. Саратов, 6-9 октября 2020 г.); Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (г. Казань, ФГБОУ ВО «КГЭУ», 21-26 сентября 2020 г.); XII Всероссийская конференция «Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers» (г. Сочи, 25-27 октября 2021 г.); Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Энергия-2021 (г. Иваново, ФГБОУ ВО «ИГЭУ», 6-8 апреля 2021 г.); XXVI – XXVIII – XXIX Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика. (г. Казань, ФГБОУ ВО «КГЭУ», Казань, 2022 г., 2024 г., 2025 г.); Международная молодежная конференция – 4th и 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (г. Москва, НИУ «МЭИ», 2022 г., 2024 г.); VIII – IX Национальная научно-практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». (г. Казань, ФГБОУ ВО «КГЭУ», 2022 г., 2023 г.); Международная молодежная научная конференция Тинчуринские чтения – 2024-2025 «Энергетика и цифровая трансформация». (г. Казань, ФГБОУ ВО «КГЭУ», 2024 г., 2025 г.); Международная научно-техническая конференция на тему: «Актуальные проблемы и перспективы развития теплоэнергетики: значения парогазовых и когенерационных технологий в энергетике Узбекистана». (Ташкентский государственный технический университет, 7-8 апреля 2026 г.).

Личный вклад автора

Основные результаты диссертационного исследования получены автором лично под руководством доктора технических наук, доцента Филимоновой А.А.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа представлена на 212 страницах машинописного текста, из которых основной текст составляет 139 страниц, включает 59 рисунков,

25 таблиц. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 164 источника, и 7 приложений.

Основное содержание работы

В первой главе выполнен анализ современного состояния и перспектив развития ионитных технологий водоподготовки в энергетике, рассмотрены противоточные схемы регенерации, малосточные технологии, подходы к математическому моделированию ионного обмена, применение CFD-моделирования, а также возможности использования методов машинного обучения для прогнозирования работы водоподготовительных установок. Анализ показал, что указанные области исследований в большинстве случаев развиваются раздельно, тогда как для научно обоснованного выбора режимов работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров требуется системный подход, объединяющий математическое моделирование, CFD-моделирование и нейросетевое прогнозирование. На основании проведенного анализа обоснованы актуальность выбранного направления, цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе на основании фундаментальных законов физики, химии и гидродинамики для математического моделирования процесса работы проточного ионитного фильтра с необратимой реакцией первого порядка выбрана и описана однопараметрическая диффузионная модель, для которой введены необходимые допущения и упрощения, а также обозначены условия применимости.

Ионитный фильтр рассматривается как проточный химический реактор с тремя характерными зонами: свободной зоной, зоной реакции и поддерживающим слоем инертного материала (рисунок 1).

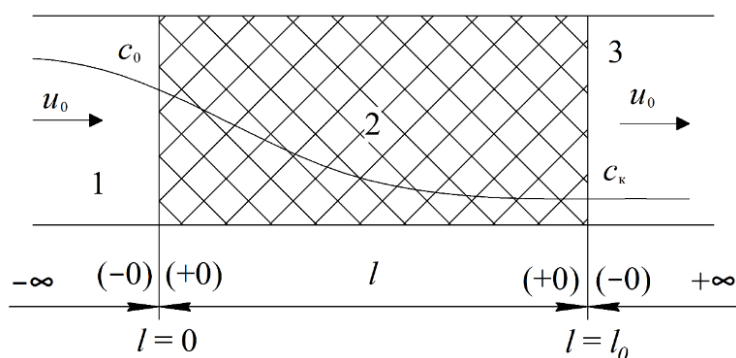


Рисунок 1 – Граничные условия в проточном изометрическом фильтре с зернистым слоем ионита:
1 – свободная зона, 2 – зона реакции, 3 – поддерживающий слой инертного материала

Для реакционной зоны основное уравнение однопараметрической диффузионной модели в стационарной постановке представлено в виде:

$$-u_0 \frac{dC_j}{dl} + D_L \cdot \frac{d^2 C_j}{dl^2} - w = 0. \quad (1)$$

Для решения дифференциального уравнения второго порядка был осуществлен переход уравнения (1) к безразмерному виду:

$$\frac{1}{Pe} \cdot \frac{d^2 C}{dL^2} - \frac{dC}{dL} - k \cdot \bar{\tau} \cdot C = 0, \quad (2)$$

для которого общее решение может быть представлено как:

$$C(L) = \mu_1 \cdot \exp(\lambda_1 \cdot L) + \mu_2 \cdot \exp(\lambda_2 \cdot L). \quad (3)$$

Для трехзонного ионитного фильтра система уравнений записана следующим образом:

для зоны 1
$$\frac{1}{Pe_1} \cdot \frac{d^2 C}{dL^2} - \frac{dC}{dL} = 0, \text{ при } L \leq 0, \quad (4)$$

для зоны 2
$$\frac{1}{Pe_2} \cdot \frac{d^2 C}{dL^2} - \frac{dC}{dL} - w = 0, \text{ при } 0 \leq L \leq 1, \quad (5)$$

для зоны 3
$$\frac{1}{Pe_3} \cdot \frac{d^2 C}{dL^2} - \frac{dC}{dL} = 0, \text{ при } L \geq 1. \quad (6)$$

В работе получены и проанализированы аналитические решения основного уравнения однопараметрической диффузионной модели для четырех постановок граничных условий: двухэкспоненциальное решение со скачком концентрации в граничных условиях Данквертса; одноэкспоненциальное решение со скачком концентрации и балансом в точке пересечения; одноэкспоненциальное решение, основанное на материальном балансе граничных точек; двухэкспоненциальное решение без скачка концентрации на входе в соответствии с граничными условиями Бояджиева.

Для нестационарной постановки задачи математического моделирования работы и регенерации ионитного фильтра по однопараметрической диффузионной модели были рассчитаны выходные концентрационные кривые при различных значениях критерия Пекле (рисунок 2).

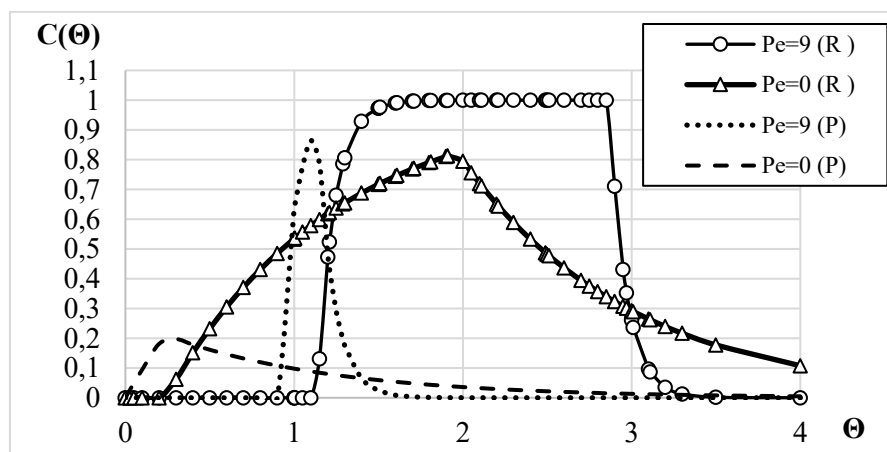


Рисунок 2 – Выходные концентрационные кривые реагента (R) и продукта (P) при различных Pe , при условии $k \bar{\tau} \rightarrow \infty$, $\theta_P / \theta_R = 0,1$

По результатам расчета (таблица 1) установлено, что для исследуемого фильтра значение числа Пекле составляет $Pe = 1,5$, что соответствует гидродинамическому режиму, промежуточному между идеальным вытеснением и идеальным смешением. За время регенерации удаляется только часть органических веществ, что объясняет происходящее со временем отравление ионита.

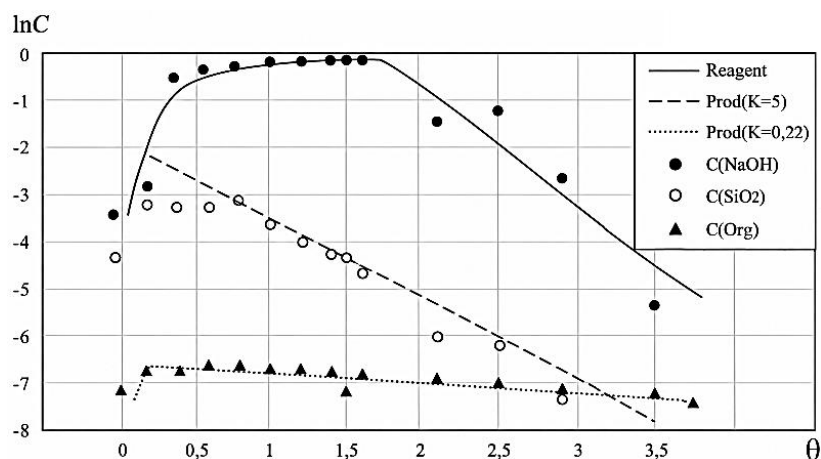


Рисунок 3 – Теоретические и экспериментальные данные процесса регенерации ионитного фильтра ВПУ Нижнекамской ТЭЦ-1

Таблица 1 – Рассчитанные параметры работы ионитного фильтра

Параметр	Значение
Число Пекле	1,5
Кажущаяся константа скорости десорбции SiO ₂	5 ч ⁻¹
Время полуреакции (время десорбции половины сорбированного SiO ₂)	8,5 мин
Кажущаяся константа скорости десорбции органических веществ	0,22 ч ⁻¹
Время полуреакции органических веществ	3,5 часа

На основе полученных аналитических решений была разработана компьютерная программа для расчета гидродинамических и кинетических характеристик проточного ионитного фильтра, реализованная с использованием языка VBA (свид. о рег. №2026666104).

В третьей главе разработана и верифицирована цифровая CFD-модель ионообменного фильтра в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.6, позволяющая проводить анализ гидродинамики потока, процессы массопереноса, регенерации и отмывки ионитного фильтра. Расчетная область представлена в виде двумерной осесимметричной модели ионитного фильтра (рисунок 4). Для CFD-модели был проведен анализ сеточной сходимости. На первом этапе была разработана стационарная CFD-модель, позволяющая оценить распределение профиля скорости и давления в фильтре, а также рассчитать перепад давления на слое пористой загрузки.

Верификация стационарной модели выполнена путем сопоставления перепада давления, рассчитанного по CFD-модели, с аналитическим расчетом по закону Дарси. Относительная погрешность составила 0,03%, что подтверждает корректную настройку гидродинамической части модели.

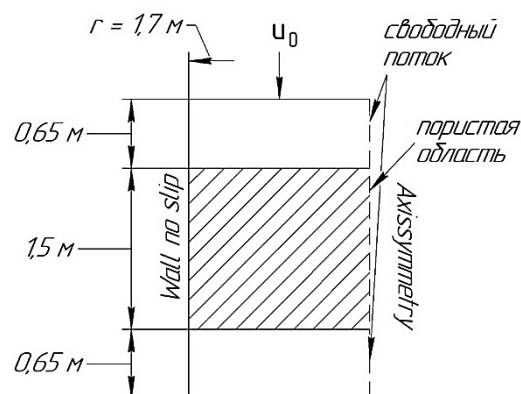


Рисунок 4 – Схема CFD-модели ионообменного фильтра

На втором этапе была разработана нестационарная CFD-модель, в основе которой лежит обменная реакция регенерации анионитной смолы, насыщенной хлорид-ионами, раствором щелочи:



Изменение концентрации сорбированных Cl^- -ионов на матрице ионита во времени было реализовано через модуль Domain ODEs. Получены зависимости изменения концентрации $NaOH$ на выходе из пористого домена, степени регенерации и концентрации закрепленных на ионите Cl^- -ионов (рисунок 5).

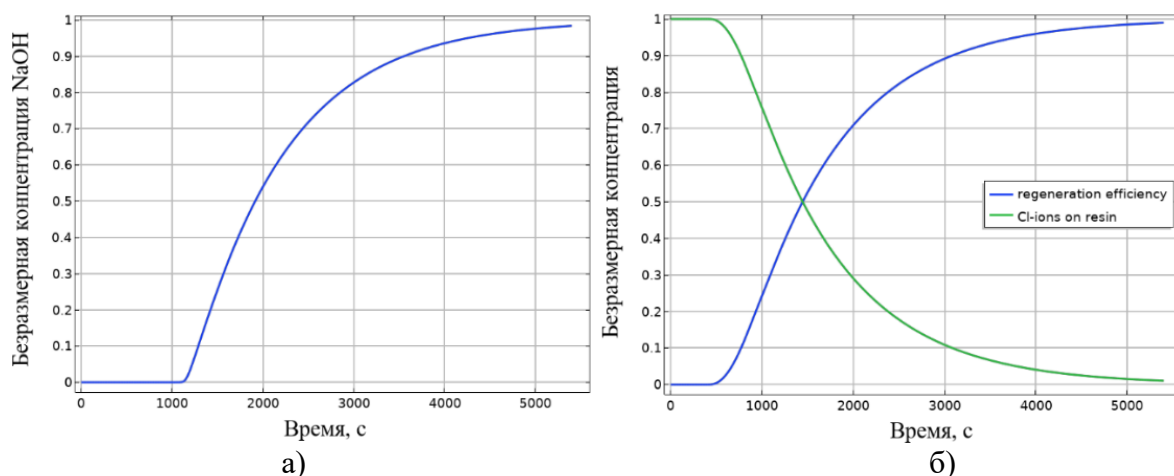


Рисунок 5 – а) Изменение концентрации $NaOH$ на выходе из пористого домена;
б) эффективность регенерации и концентрация ионов Cl^- на ионите

Были проанализированы пространственные распределения скорости, давления и концентраций компонентов в объеме фильтра. Распределение $NaOH$ показывает продвижение регенерационного раствора по высоте фильтра и участие его в реакции ионного обмена (рисунок 6). Распределение концентрации Cl^- -ионов в растворе (рисунок 7) отражает процесс их вытеснения из ионита.

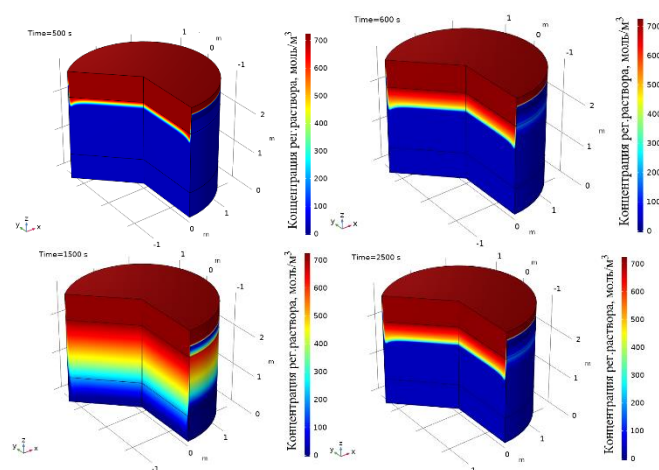


Рисунок 6 – Распределение концентрации регенерационного раствора $NaOH$

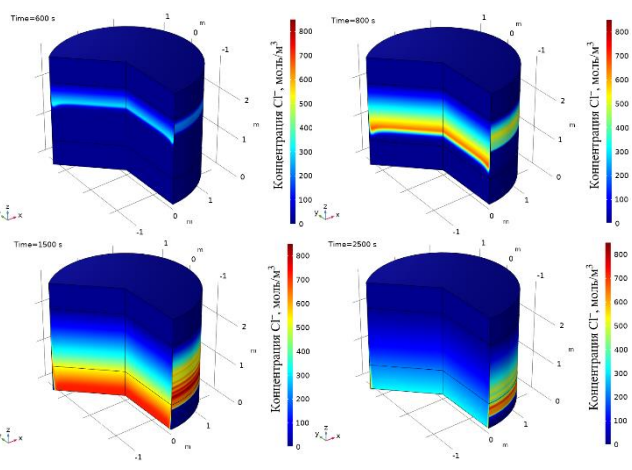


Рисунок 7 – Концентрация хлорид-ионов, покинувших ионит

Верификация нестационарной CFD-модели включала проверку согласованности уравнений гидродинамики, массопереноса и кинетики ионного

обмена, проверку размерностей всех параметров и сохранения материального баланса. Валидация CFD-модели выполнена путем сравнения результатов с промышленными экспериментальными данными по регенерации анионитного фильтра ФИПа-3,4-6 ВПУ Нижнекамской ТЭЦ-1 (рисунок 8). Среднеквадратичное отклонение между расчетной и экспериментальной кривыми составило 3824 мг/л, что соответствует нормированной среднеквадратичной ошибке порядка 15%.

С помощью нестационарной CFD-модели рассмотрено влияние конструктивных и технологических параметров на эффективность регенерации. Рассматривались отношение высоты слоя к диаметру фильтра, скорость подачи и концентрация регенерационного раствора, а также прямоточный и противоточный режимы регенерации.

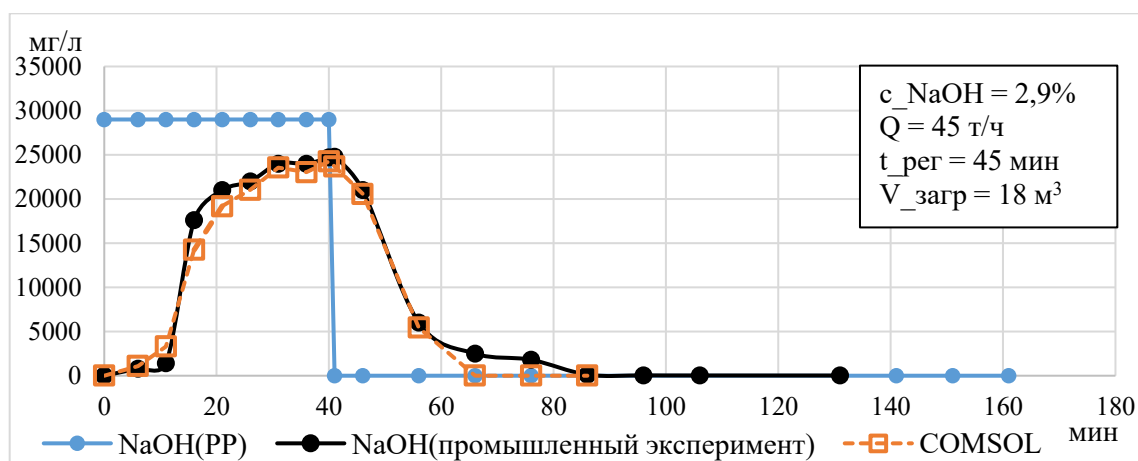


Рисунок 8 – Выходная концентрационная кривая при регенерации ионитного фильтра

Четвертая глава посвящена разработке прогностической модели работы ионитной ВПУ на основе методов машинного обучения. В качестве исходных данных был использован массив эксплуатационных данных по 111 регенерациям ионитных фильтров ВПУ Нижнекамской ТЭЦ-1. Общий объем датасета составил 1110 строк. В качестве целевых признаков выбраны продолжительность фильтроцикла и удельные расходы реагентов на регенерацию.

На первом этапе был выполнен разведывательный анализ данных, который позволил обосновать выбор исходных признаков и повысить качество последующего прогнозирования на 5%.

Была разработана нейросетевая модель на основе многослойного персептрона (Multilayer Perceptron, MLP), реализованная с использованием библиотеки TensorFlow и интерфейса API Keras. Исходные данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 75/25. Архитектура модели включала три скрытых слоя с 12, 6 и 4 нейронами. В качестве функции активации для скрытых слоев использовалась функция ReLU (Rectified Linear Unit).

Обучение модели осуществлялось с использованием оптимизатора Adam; количество эпох – 140; размер итерируемых блоков (batch size) – 11 (рисунок 9).

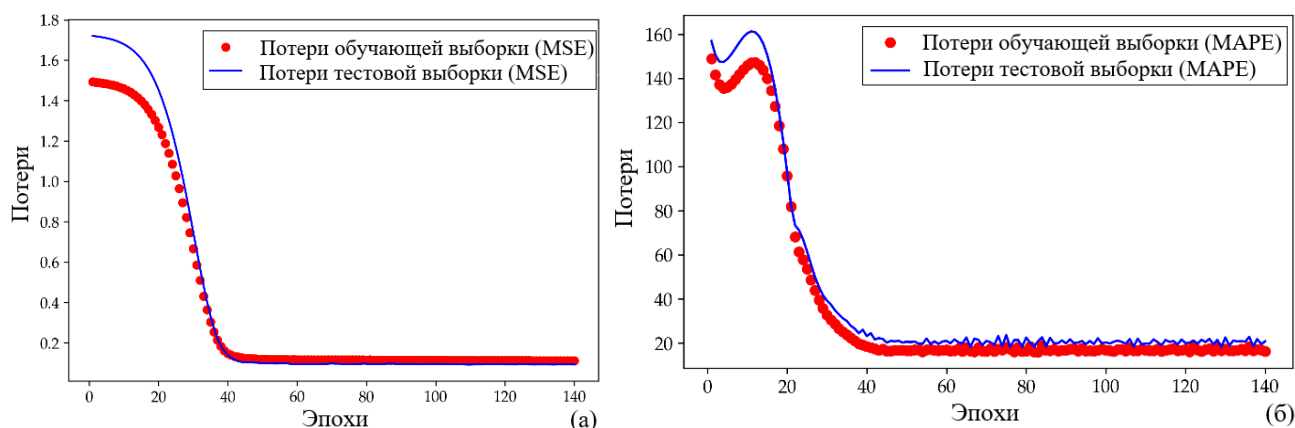


Рисунок 9 – Функции потерь MSE (a) и MAPE (b) при обучении MLP-модели

В качестве функции потерь выбрана среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error, MSE), метрики модели: коэффициент детерминации, средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE) и средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error, MAPE). При раздельном обучении нейросетевой MLP-модели для каждого целевого признака получены следующие значения относительной ошибки: для фильтрацикла MAPE = 9,15%, для удельного расхода кислоты MAPE = 10,22%, для удельного расхода щелочи MAPE = 19,30%.

Для оценки эффективности разработанной модели выполнено сравнение с разработанными моделями на основе ансамблевых методов CatBoost и XGBoost. Установлено, что нейросетевая модель в 82% случаев обеспечивает более высокую точность прогнозирования целевых признаков по сравнению с моделями градиентного бустинга (таблица 2-3). Разработанная нейросетевая модель может быть использована в качестве инструмента поддержки принятия решений при эксплуатации ионитных ВПУ, позволяя прогнозировать эксплуатационные параметры на основе текущих характеристик исходной воды.

Таблица 2 – Сравнение метрик качества моделей

Модель	Целевой признак	R^2	RMSE	MAE	MAPE, %
Keras (MLP)*	F_cycle	0,4527	893,77	676,25	9,15
CatBoost		0,3030	1008,60	777,19	10,58
XGBoost		0,4517	894,61	741,87	10,51
Keras (MLP)	SpecG_acid(eq)	0,4913	12,71	10,72	10,22
CatBoost		0,4815	12,83	10,68	10,21
XGBoost		0,6109	11,12	9,36	8,83
Keras (MLP)	SpecG_alkali(eq)	0,3969	19,72	14,84	19,30
CatBoost		0,3339	20,58	16,46	21,99
XGBoost		0,3094	20,96	16,63	21,83

Таблица 3 – Сравнение прогнозов моделей для тестовых данных

№ строки из датасета	Параметр	Факт	Keras (MLP)	CatBoost	XGBoost
9200	F_cycle	7757	7379,43	6411,98	6366,66
	SpecG_acid(eq)	101,02	109,20	116,73	118,62
	SpecG_alkali(eq)	70,85	76,71	78,07	81,77

В пятой главе рассмотрена технология повторно-последовательной регенерации и отмывки ионитных фильтров «каскад», реализованная на ионитной ВПУ Казанской ТЭЦ-3, которая позволила снизить удельный расход серной кислоты на 20–25%, едкого натра – на 15–20%, сократить объем высокоминерализованных сточных вод в 1,7 раза, увеличить фильтроцикл на 10–15% и исключить использование товарной поваренной соли для регенерации.

Выполнен анализ возможности адаптации технологии «каскад» для ионитной ВПУ Нижнекамской ТЭЦ-1. Проведены исследования гидродинамического режима работы ионитных фильтров (рисунок 10) и выхода фракций при регенерации и отмывке. Характеристики работы катионитного фильтра второй ступени при кислотной регенерации были рассчитаны с помощью однопараметрической диффузионной модели (таблица 4).

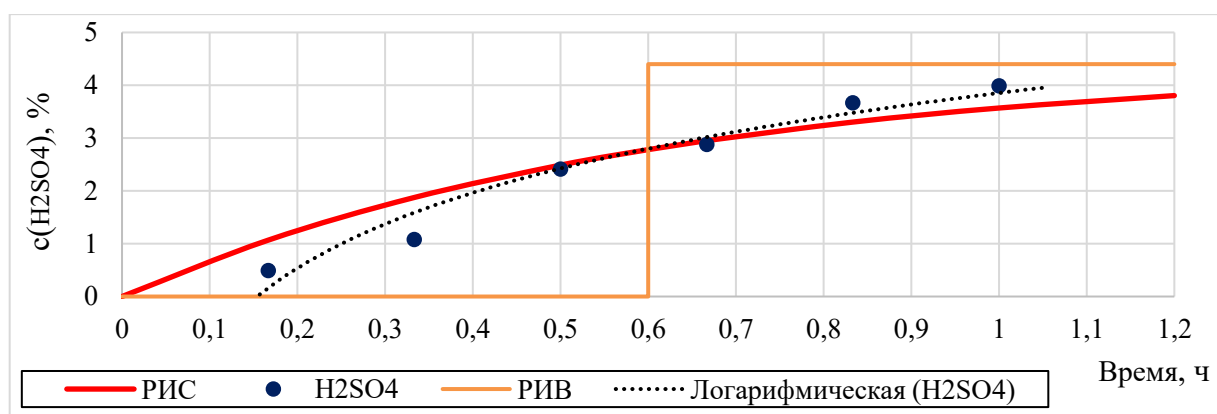


Рисунок 10 – Динамика выхода кислоты при регенерации H_{II} – фильтра 4% раствором H_2SO_4 с объемной скоростью $50 \text{ м}^3/\text{ч}$

Таблица 4 – Характеристики работы фильтра H_{II} при кислотной регенерации

Показатель	Обозначение и ед. изм.	Значение
Характеристическое время	$\bar{\tau}$, ч	0,6
Время прохождения фильтра суммарным потоком	τ_L , ч	0,16
Приведенное время прохождения фильтра суммарным потоком	θ_L	0,25
Число Пекле	Pe	0,33

По результатам расчетов и экспериментов показано, что применение разработанной технологии «каскад» для ионитной ВПУ Нижнекамской ТЭЦ-1 возможно при ее модернизации на основе системного подхода, включающего однопараметрическую диффузионную модель, CFD-моделирование и нейросетевое прогнозирование.

Центральным элементом модернизированной технологии выступает система «цифрового помощника», предназначенная для расчета объема и концентрации реагента, продолжительности регенерации и отмывки, а также времени переключения технологических потоков с учетом фактического состояния фильтров и характеристик исходной воды. Мероприятия по модернизации включают автоматизацию узлов переключения на базе ПЛК, фракционный сбор

отработанных растворов, управление риском гипсования, рециркуляцию отмывочных вод и использование CFD-модели для совершенствования конструкции фильтров.

По результатам технико-экономического расчета установлено, что модернизированная технология «каскад» позволит дополнительно снизить расход частично-обессоленной воды, химообессоленной воды, удельные расходы реагентов и время регенерации по сравнению с базовой технологией «каскад» (таблица 5). Согласно технико-экономическому расчету, годовая экономия по технологии «каскад» в ценах 2026 г. составляет 282,63 млн руб./год, а по модернизированной технологии – 294,5 млн руб./год, что соответствует дополнительному экономическому эффекту порядка 4,2% (таблица 6).

Таблица 5 – Сравнение основных технологических показателей регенерации цепочки ионитных фильтров для различных технологий

Показатели	Существующая технология	«Каскад»	Модернизированный «каскад»
Расход ЧОВ	2868 м ³ /ч	2724 м ³ /ч	2575 м ³ /ч
Расход ХОВ	2449 м ³ /ч	2302,5 м ³ /ч	2215 м ³ /ч
Расход соли (NaCl)	1040 т/год	–	–
СН и стоки	20%	5%	3,7%
Время регенерации	8 ч	6,5 ч	5,5 ч (расчет по мат. модели)
Расход кислоты (H ₂ SO ₄)	5163 т/год	2065 т/год	1960 т/год
Расход щелочи (NaOH)	3323 т/год	2658 т/год	2525 т/год
Объем сточных вод	419 м ³ /ч	126 м ³ /ч	121 м ³ /ч

Таблица 6 – Технико-экономический расчет модернизированной технологии «каскад»

№	Позиция	Экономия в год по «каскадной» технологии относительно «традиционной» технологии	Стоимость ед., руб. (в ценах на 2020 г. / 2026 г.)	Экономия по «каскадной» технологии (в ценах на 2020 г./2026 г.) млн. руб./год	Доп. экономия по модернизированной «каскадной» технологии (в ценах на 2026 г.) млн. руб./год
1	ЧОВ	1261,4 тыс. м ³	36,6 / 54,2	4,276 / 10,48	0,572
2	ХОВ	1283,3 тыс. м ³	68 / 92	87 / 118	4,48
3	Щелочь (40 %)	665 т	16 700 / 58 000	11,1 / 38,6	1,93
4	Кислота (96 %)	3098 т	3 500 / 15 000	10,84 / 46,5	2,3
5	Соль	1040 т	3 200 / 6 100	3,32 / 6,3	–
6	Исходная вода (р. Волга)	7120 тыс. м ³	3,3 / 4,46	23,5 / 31,75	1,36
7	Сточные воды	2566,7 тыс. м ³	10,34 / 12,08	26,53 / 31	1,23
Итого в год:				166,57 / 282,63	11,872 (+4,2%)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана и верифицирована математическая модель проточного ионитного фильтра на основе однопараметрической диффузионной модели. Получены и проанализированы аналитические решения для четырех постановок

граничных условий. На основе математической модели разработана компьютерная программа и рассчитаны выходные концентрационные кривые реагента и продуктов обмена при регенерации анионитного фильтра ВПУ действующей ТЭЦ. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 5%.

2. Разработана и верифицирована цифровая CFD-модель ионитного фильтра в стационарной и нестационарной постановках. Сопоставление результатов CFD-моделирования с промышленными экспериментальными данными для анионитного фильтра ВПУ действующей ТЭЦ показало удовлетворительное согласие при нормированной среднеквадратичной ошибке по выходной концентрационной кривой NaOH порядка 15%.

3. Разработана и верифицирована прогностическая модель работы ионитной ВПУ на основе нейросетевой MLP-модели. Получены значения средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования: для фильтроцикла – 9,15%, для удельного расхода кислоты – 10,22%, для удельного расхода щелочи – 19,3%.

4. Разработаны предложения по модернизации технологии повторно-последовательной регенерации и отмывки ионитных фильтров «каскад» для ионитной ВПУ действующей ТЭЦ. Предложенный подход основан на интеграции однопараметрической диффузионной модели, CFD-моделирования и нейросетевого прогнозирования в рамках единой системы «цифрового помощника», предназначенной для расчета объема и концентрации реагента, продолжительности регенерации и отмывки, а также моментов переключения технологических потоков. Выполнен технико-экономический расчет, подтверждающий целесообразность внедрения разработанных решений для снижения расхода реагентов и воды, уменьшения объема сточных вод и повышения эффективности эксплуатации ионитной ВПУ.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы

Практическое внедрение предложенного системного подхода на действующей ионитной ВПУ ТЭС Нижнекамской ТЭЦ-1; дальнейшее развитие системы «цифрового помощника» для поддержки принятия решений при выборе режимов регенерации и отмывки; накопление эксплуатационных данных для повышения точности нейросетевого прогнозирования; совершенствование CFD-модели с учетом геометрии распределительных устройств.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

Публикации в рецензируемых научных изданиях ВАК Минобрнауки РФ

1. Чичиров, А.А. Диффузионная модель проточного ионитного фильтра с неподвижным слоем гранул ионита / А.А. Чичиров, О.Е. Бабилов, А.А. Филимонова, Н.Д. Чичирова // Промышленная энергетика. – 2026. – № 3. – С. 23-30.

2. Бабилов, О.Е. Цифровое CFD-моделирование процесса регенерации ионообменного фильтра в программном комплексе COMSOL Multiphysics / О.Е.

Баби́ков, А.А. Филимонова, Н.Д. Чичирова, С.Р. Сайтов // Надежность и безопасность энергетики. – 2026. – Т. 19. – № 3. – С. 237-243.

3. Чичирова, Н.Д. Биологическое загрязнение технологического оборудования и химически обессоливающей водоподготовительной установки на ТЭС (обзор) / Н.Д. Чичирова, А.А. Филимонова, С.М. Власов, О.Е. Баби́ков // Теплоэнергетика. – 2023. – № 9. – С. 35-44.

4. Власова, А.Ю. Анализ очистки воды на комбинированных водоподготовительных установках ТЭС УФ-спектрофотометрическим методом / А.Ю. Власова, О.Е. Баби́ков // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15. – № 3(59). – С. 82-93.

Научные статьи, опубликованные в международных базах цитирования Scopus и (или) Web of Science

5. Beloev, H.I. Short-Term Electrical Load Forecasting Based on XGBoost Model / H.I. Beloev, S.R. Saitov, A.A. Filimonova, N.D. Chichirova, O.E. Babikov, I.K. Iliev // Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 19. – С. 5144.

6. Beloev, H.I. Solid Oxide Fuel Cell Voltage Prediction by a Data-Driven Approach / H.I. Beloev, S.R. Saitov, A.A. Filimonova, N.D. Chichirova, E.S. Mayorov, O.E. Babikov, I.K. Iliev // Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 9. – С. 2174.

7. Beloev, H.I. Prediction of Pipe Failure Rate in Heating Networks Using Machine Learning Methods / H.I. Beloev, S.R. Saitov, A.A. Filimonova, N.D. Chichirova, O.E. Babikov, I.K. Iliev // Energies. – 2024. – Т. 17. – №. 14. – С. 3511.

8. Filimonova, A.A. Development of a Technological Scheme for a Combined Water Treatment using Strong Oxidizing Agents / A.A. Filimonova, A.Y. Vlasova, O.E. Babikov // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. – 2024. – С. 1-5.

9. Vlasova, A.Y. Investigation of bacterial contamination of a mixed-bed filter of a TPP water treatment plant by IR spectroscopy / A.Y. Vlasova, O.E. Babikov // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. – 2023. – Т. 5. – С. 1-5.

10. Vlasova, A.Y.U. Analysis of the step-by-step water purification of a combined water treatment plant at a heat and power complex / A.Y.U. Vlasova, A.T. Akhmetzyanova, O.E. Babikov // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. – 2022. – С. 1-5.

11. Vlasova, A.Y. Microbiological studies of ion exchange and combined water treatment plants / A.Y. Vlasova, A.A. Chichirov, S.M. Vlasov, O.E. Babikov, A.V. Nizamaeva // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. – 2022. – С. 1-6.

12. Chichirov, A.A. Research and results of mathematical modeling of block ion-exchange water treatment plants operating modes and regeneration / A.A. Chichirov., A.A. Filimonova, N.D. Chichirova, O.E. Babikov // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. – 2022. – Т. 2150. – №. 1. – С. 012002.

13. Chichirov, A.A. Mathematical modelling and improvement of ion exchange water treatment energy-saving technologies in power engineering / A.A. Chichirov, N.D.

Chichirova, A.A. Filimonova, O.E. Babikov // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. – 2020. – Т. 1652. – №. 1. – С. 012027.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации

14. Патент № 2817630 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/42, В01D 24/46, В01J 49/00. ресурсосберегающая ионитная водоподготовительная установка: № 2023109104: заявл. 07.02.2023: опубл. 17.04.2024 / А. А. Филимонова, О. Е. Бабилов, Н. Д. Чичирова, А. А. Чичиров; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ».
15. Регенерация ионитного фильтра / Бабилов О.Е., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Саитов С.Р., Филимонова А.А.// Программа для ЭВМ номер регистрации №2026666104 Рос. Федерация. Заявка: №2026664637 от 05.05.2026. Дата публикации 28.05.2026.

Публикации в других научных изданиях

16. Власов, С.М. Исследование бактериального загрязнения теплоносителя схемы химического обессоливания на Казанской ТЭЦ-1 / С.М. Власов, А.Ю. Власова, Н.Д. Чичирова, О.Е. Бабилов // Теплоэнергетика. – 2022. – № 3. – С. 86-91.
17. Бабилов, О.Е. Анализ гидродинамического режима работы катионитного фильтра в составе блочной ионитной водоподготовительной установки ТЭС / О.Е. Бабилов, А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова // Международная научно-техническая конференция Актуальные проблемы и перспективы развития теплоэнергетики. – 2026. – С. 51-54.
18. Бабилов, О.Е. Определение гидравлического сопротивления пористой среды с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics / О.Е. Бабилов // Международная научно-практическая конференция Цифровые системы и модели. – 2026. – С. 607-609.
19. Бабилов, О.Е. CFD-моделирование гидродинамики в ионитном фильтре: подходы к определению скорости в пористой среде / О.Е. Бабилов // Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар. – 2025. – С. 12-14.
20. Бабилов, О.Е. Подходы к моделированию потока жидкости в пористых средах / О.Е. Бабилов // Тинчуринские чтения «Энергетика и цифровая трансформация». – 2025. – С. 18-20.
21. Бабилов, О.Е. Моделирование гидродинамики потока в ионообменных фильтрах с использованием модели пористой среды / О.Е. Бабилов, И.В. Галимьянова // Тинчуринские чтения «Энергетика и цифровая трансформация». – 2025. – С. 15-17.
22. Бабилов, О.Е. Химическая регенерация ионообменных смол / О.Е. Бабилов // Тинчуринские чтения «Энергетика и цифровая трансформация». – 2024. – С. 11-15.
23. Бабилов, О.Е. Методы исследования структуры потоков при моделировании гидродинамики химических реакторов и ионообменных фильтров / О.Е. Бабилов // Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар. – 2024. – С. 19-22.
24. Зайнуллина, Г.А. Применение сильнокислотных и слабокислотных катионитов в ионообменных технологиях водоподготовки на ТЭС / Г.А. Зайнуллина, О.Е.

- Бабилов // Национальная научно-практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ». – 2024. – С. 318-320.
25. Бабилов, О.Е. Прямоточная регенерации ионообменных фильтров / О.Е. Бабилов, Н.Д. Чичирова // Национальная научно-практическая конференция «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ». – 2023. – С. 336-338.
26. Бабилов, О.Е. Противоточная регенерации ионообменных фильтров / О.Е. Бабилов, Н.Д. Чичирова // Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар. – 2023. – С. 3-5.
27. Гаврилин, В.В. Современные технологии производства ионообменных смол / В.В. Гаврилин, О.Е. Бабилов // Тинчуринские чтения «Энергетика и цифровая трансформация». – 2023. – С. 37-39.
28. Бабилов, О.Е. Сточные воды комбинированных водоподготовительных установок ТЭС / О.Е. Бабилов, С.М. Власов // Энергия-2021: шестнадцатая всероссийская научно-техническая конференция. – 2021. – С. 44.
29. Чичиров, А.А. Ресурсосберегающая технология регенерации ионитной водоподготовительной установки ТЭЦ / А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова, А.А. Филимонова, О.Е. Бабилов // Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко, Казань. – 2020. – С. 211-216.

Подписано в печать 14.10.2026. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 1410/1.

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
