



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

КГЭУ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Э.Ю. Абдуллазянов

« 02 »

10

2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Диссертационная работа «Моделирование и совершенствование работы ионитных фильтров водоподготовительных установок ТЭС на основе системного подхода» выполнена на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Бабилов Олег Евгеньевич являлся аспирантом на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» с 2022 года по настоящее время.

В 2020 году Бабилов О.Е. закончил бакалавриат по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», диплом с отличием 101635 0000092 рег. №ITE-6533 от 10 июля 2020 г. ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

В 2022 году Бабилову О.Е. присуждена степень магистра по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», диплом с отличием 101635 0000470 рег. №ITE-298-22 от 12 июля 2022 г.

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

Диссертационная работа Бабикова Олега Евгеньевича «Моделирование и совершенствование работы ионитных фильтров водоподготовительных установок ТЭС на основе системного подхода» обсуждалась на расширенном заседании кафедр «Атомные и тепловые электрические станции» и «Автономная распределенная энергетика и химия» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». По итогам обсуждения на заседании принято заключение:

Актуальность темы диссертационной работы

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 м³, а объем сточных вод превышает 4,5 млн м³, 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.

Научная новизна исследований

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».

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.

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

Диссертация является научно-квалификационной работой, соответствует паспорту специальности научных работников 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» по пунктам 1, 2, 3, 4, 5 и 7.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются 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.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в проведении литературного обзора, разработке математической и CFD-моделей ионитного фильтра, проведении промышленных экспериментов, разработке прогностических моделей на основе методов машинного обучения, анализе и обобщении полученных результатов, разработке предложений по совершенствованию технологии регенерации и отмывки ионитных фильтров, апробации результатов и подготовке публикаций по тематике научного исследования.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени

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.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и приравненных к ним по специальности 2.4.5

1. Чичиров А.А., Бабилов О.Е., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д. Диффузионная модель проточного ионитного фильтра с неподвижным слоем гранул ионита. Промышленная энергетика. 2026. № 3. С. 23-30. (вклад соискателя 60%)
2. Бабилов О.Е., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Сайтов С.Р. Цифровое CFD-моделирование процесса регенерации ионообменного фильтра в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Надежность и безопасность энергетики. 2026. Т. 19. № 3. С. 237-243. (вклад соискателя 60%)
3. Чичирова Н.Д., Филимонова А.А., Власов С.М., Бабилов О.Е. Биологическое загрязнение технологического оборудования и химически обессоливающей водоподготовительной установки на ТЭС (обзор). Теплоэнергетика. 2023. № 9. С. 35-44. (вклад соискателя 40%)
4. Власова А.Ю., Бабилов О.Е. Анализ очистки воды на комбинированных водоподготовительных установках ТЭС УФ-спектрофотометрическим методом. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 3(59). С. 82-93. (вклад соискателя 60%)

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

5. Beloev H.I., Saitov S.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Babikov O.E., Iliev I.K. Short-Term Electrical Load Forecasting Based on XGBoost Model. Energies. 2025. Т. 18. №. 19. С. 5144. (вклад соискателя 30%)
6. Beloev H.I., Saitov S.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Mayorov E.S., Babikov O.E., Iliev I.K. Solid Oxide Fuel Cell Voltage Prediction by a Data-Driven Approach. Energies. 2025. Т. 18. №. 9. С. 2174. (вклад соискателя 30%)
7. Beloev H.I., Saitov S.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Babikov O.E., Iliev I.K. Prediction of Pipe Failure Rate in Heating Networks Using Machine Learning Methods. Energies. 2024. Т. 17. №. 14. С. 3511. (вклад соискателя 30%)
8. Filimonova A.A., Vlasova A.Y., Babikov O.E. Development of a Technological Scheme for a Combined Water Treatment using Strong Oxidizing Agents. 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. 2024. С. 1-5. (вклад соискателя 30%)
9. Vlasova A.Y., Babikov O.E. Investigation of bacterial contamination of a mixed-bed filter of a TPP water treatment plant by IR spectroscopy. 2023 5th International Youth

Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. 2023. Т. 5. С. 1-5. (вклад соискателя 60%)

10. Vlasova A.Y.U., Akhmetzyanova A.T., Babikov O.E. Analysis of the step-by-step water purification of a combined water treatment plant at a heat and power complex. 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. 2022. С. 1-5. (вклад соискателя 40%)

11. Vlasova A.Y., Chichirov A.A., Vlasov S.M., Babikov O.E., Nizamaeva A.V. Microbiological studies of ion exchange and combined water treatment plants. 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. 2022. С. 1-6. (вклад соискателя 30%)

12. Chichirov A.A., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Babikov O.E. Research and results of mathematical modeling of block ion-exchange water treatment plants operating modes and regeneration. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2022. Т. 2150. №. 1. С. 012002. (вклад соискателя 30%)

13. Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonova A.A., Babikov O.E. Mathematical modelling and improvement of ion exchange water treatment energy-saving technologies in power engineering. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2020. Т. 1652. №. 1. С. 012027. (вклад соискателя 30%)

Патенты и свидетельства о государственной регистрации

14. Патент № 2817630 С1 Российская Федерация, МПК C02F 1/42, B01D 24/46, B01J 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 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

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 рецензируемых научных изданиях

16. Власов С.М., Власова А.Ю., Чичирова Н.Д., Бабилов О.Е. Исследование бактериального загрязнения теплоносителя схемы химического обессоливания на Казанской ТЭЦ-1. Теплоэнергетика. 2022. № 3. С. 86-91.

17. Бабилов О.Е., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д. Анализ гидродинамического режима работы катионитного фильтра в составе блочной ионитной водоподготовительной установки ТЭС. Актуальные проблемы и перспективы развития теплоэнергетики: значения парогазовых и когенерационных технологий в

энергетике Узбекистана. Сборник трудов международной научно-технической конференции. Ташкент. ТГТУ имени Ислама Каримова, 2026. С. 51-54.

18. Бабилов О.Е. Определение гидравлического сопротивления пористой среды с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics. Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: Материалы международной научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2025 года. Казань: КГЭУ, 2026. С. 607-609.

19. Бабилов О.Е. CFD-моделирование гидродинамики в ионитном фильтре: подходы к определению скорости в пористой среде. XXIX Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: материалы докладов. Казань. 2025. С. 12-14.

20. Бабилов О.Е. Подходы к моделированию потока жидкости в пористых средах. Тинчуринские чтения - 2025 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы докладов Международной молодежной научной конференции. Казань. 2025. С. 18-20.

21. Бабилов О.Е., Галимьянова И.В. Моделирование гидродинамики потока в ионообменных фильтрах с использованием модели пористой среды. Тинчуринские чтения - 2025 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы докладов Международной молодежной научной конференции. Казань. 2025. С. 15-17.

22. Бабилов О.Е. Химическая регенерация ионообменных смол. Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы Международной молодежной научной конференции. Казань. 2024. С. 11-15.

23. Бабилов О.Е. Методы исследования структуры потоков при моделировании гидродинамики химических реакторов и ионообменных фильтров. XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: материалы докладов. Казань. 2024. С. 19-22.

24. Зайнуллина Г.А., Бабилов О.Е. Применение сильнокислотных и слабокислотных катионитов в ионообменных технологиях водоподготовки на ТЭС. Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы IX Национальной научно-практической конференции. Казань. 2024. С. 318-320.

25. Бабилов О.Е., Чичирова Н.Д. Прямоточная регенерации ионообменных фильтров. Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы VIII Национальной научно-практической конференции. Казань. 2023. С. 336-338.

26. Бабилов О.Е., Чичирова Н.Д. Противоточная регенерации ионообменных фильтров. XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: материалы докладов. Казань. 2023. С. 3-5.

27. Гаврилин В.В., Бабилов О.Е. Современные технологии производства ионообменных смол. Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы Международной молодежной научной конференции. Казань. 2023. С. 37-39.

28. Бабилов О.Е., Власов С.М. Сточные воды комбинированных водоподготовительных установок ТЭС. Энергия-2021: шестнадцатая всероссийская (восьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т., Иваново, 06–08 апреля 2021 года. Том 1. Иваново: ИГЭУ. 2021. С. 44.

29. Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонова А.А., Бабилов О.Е. Ресурсосберегающая технология регенерации ионитной водоподготовительной установки ТЭЦ. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Материалы 92-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко, Казань, 21–26 сентября 2020 года. Выпуск 71. Книга 3. 2020. С. 211–216.

Ценность научных работ соискателя

Ценность научных работ состоит в разработке системного научно-обоснованного подхода к интеллектуализации управления процессами работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров с целью достижения энерго- и ресурсосбережения и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Разработаны математическая модель проточного ионитного фильтра на основе однопараметрической диффузионной модели, цифровая CFD-модель ионитного фильтра, позволяющая моделировать и анализировать процесс регенерации и отмывки, а также нейросетевая прогностическая модель работы ионитной водоподготовительной установки для оценки продолжительности фильтроцикла и удельных расходов химических реагентов. Сформулированы предложения по модернизации технологии повторно-последовательной регенерации и отмывки ионитных фильтров «каскад», направленные на повышение эффективности эксплуатации ионитных водоподготовительных установок ТЭС.

Рекомендации и выводы

Диссертационная работа Бабилова Олега Евгеньевича «Моделирование и совершенствование работы ионитных фильтров водоподготовительных установок ТЭС на основе системного подхода» посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения эффективности работы ионитных водоподготовительных установок ТЭС на основе использования методов математического моделирования, цифрового CFD-моделирования и методов машинного обучения. Работа характеризуется логичностью построения, четкостью изложения материала, последовательностью представления результатов исследования и аргументированностью основных научных положений и выводов.

Полученные результаты отличаются научной новизной, достоверностью и практической значимостью. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически и расчетно обоснованы. Основные полученные в работе результаты вносят вклад в развитие методов анализа и

совершенствования процессов работы, регенерации и отмывки ионитных фильтров водоподготовительных установок тепловых электростанций.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. в актуальной редакции) к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, диссертация на тему: «Моделирование и совершенствование работы ионитных фильтров водоподготовительных установок ТЭС на основе системного подхода» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы».

Заключение принято на расширенном заседании кафедр «Атомные и тепловые электрические станции» и «Автономная распределенная энергетика и химия» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», которое состоялось 29 сентября 2026 г., протокол № 3-26/27. На заседании присутствовали 29 человек, из них 7 докторов наук. Результаты голосования: «за» 29 – человек, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Председатель заседания:

Наталия Дмитриевна Чичирова
д.х.н., профессор, зав. кафедрой
«Атомные и тепловые
электрические станции»
ФГБОУ ВО «КГЭУ»



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел. (843)519-42-52, e-mail: kgeu.tes@mail.ru

Сведения о лице, утвердившем заключение:

Абдуллазянов Эдвард Юнусович: доктор технических наук, профессор,
ректор Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Казанский государственный
энергетический университет»
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.
Тел. (843)519-42-02, e-mail: rector@kgeu.ru



Чичирова Н.Д.
Абдуллазянов Э.Ю.
Специалист С.А. Кабибрахманова О.А.