



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и коммерциализации

И.В. Ившин

« 1 » октября 2025 г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Казанский государственный энергетический  
университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

по диссертационной работе **Зайнуллиной Элеоноры Райнуровны**  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Диссертация на тему «Очистка обратноосмотического концентрата от сульфат- и хлорид- ионов сорбентами на основе отходов энергетики» выполнена на кафедре «Инженерная экология и безопасность труда» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

В 2014 году Зайнуллина окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), получив степень магистра по направлению подготовки 14.01.00 «Теплоэнергетика и теплотехника».

С 2021 года является аспирантом кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» ФГБОУ ВО «КГЭУ» очной формы обучения по направлению 19.06.01 «Промышленная экология и биотехнологии».

Научный руководитель – заведующий кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» ФГБОУ ВО «КГЭУ», доктор технических наук, профессор Николаева Лариса Андреевна.

**Актуальность работы.** Современное производство тепловой и электрической энергии сопровождается использованием большого количества природной воды и сбросом сточных вод разной степени загрязненности. По данным РАО «ЕЭС России», доля электроэнергетики в общем объёме потребления пресной воды промышленностью России составляет около 70 % (21 км<sup>3</sup>). Из них 90 % сбрасывается в поверхностные водоёмы, в том числе 4 % загрязнённых стоков. В объеме сточных вод ТЭС 25 % составляют сточные воды повышенной минерализации. При недостаточной доочистке сточных вод от солей до требуемых значений нормативно допустимого сброса происходит повышение антропогенной нагрузки на окружающую природную среду.

На ТЭС с котлами высокого и сверхвысокого давлений с целью подготовки добавочной воды применяют мембранные технологии, для реализации которых используются установки ультрафильтрации, микрофильтрации и обратноосмотические установки.

Использование мембранных технологий позволяет эффективно удалять различные загрязняющие вещества. При этом загрязнения и растворённые соли концентрируются в концентрате, что приводит к высокой минерализации образующихся сточных вод. Они представляют собой серьёзную экологическую проблему с точки зрения их утилизации и сброса.

Решение этой проблемы имеет как научное, так и практическое значение, так как от этого зависит сохранение водных ресурсов и окружающей среды. Одним из перспективных направлений является разработка технологий, позволяющих возвращать часть концентрата обратно в поток исходной воды. Это позволит сократить объёмы сбрасываемых стоков и, следовательно, уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Существуют различные методы обессоливания, однако не все из них позволяют достичь

высокой эффективности или являются экономически выгодными. Одним из таких методов является адсорбция на активированных углях различных марок. Промышленно-выпускаемые сорбенты характеризуются высокой стоимостью, достигающей несколько сотен тысяч рублей за тонну, поэтому предлагается создание сорбционных материалов на основе многотоннажных отходов энергетики для очистки обратноосмотического концентрата (ООК).

Сорбционный метод очистки ООК обеспечивает удаление примесей с эффективностью до 98,4 %. Наличие оборотной схемы очистки, отсутствие вторичных загрязнений и управляемость процессом являются главными преимуществами данного метода.

По данным Минприроды России, в стране ежегодно на угольных ТЭС образуется более 20 млн т золы от сжигания твердого топлива – каменного угля. Общий объем золы всех угольных ТЭС составляет более 1,5 млрд т. Также на предприятиях энергетики, в зависимости от производительности, образуется и накапливается от 6,5 до 7 тысяч т карбонатного шлама химводоподготовки. Одним из перспективных путей утилизации золы и шлама химводоподготовки является создание новых дешевых сорбционных материалов на их основе. Использование золошлаковых отходов и шлама химводоподготовки делает возможным получение сорбентов с оптимальным сочетанием цены и качества, а также имеет большое научное и практическое значение.

***Научная новизна работы определяется следующим:***

1. Предложена адсорбционная очистка обратноосмотического концентрата ТЭС от сульфат- и хлорид-ионов шламом химводоподготовки и золошлаковыми отходами до значений нормативно-допустимого сброса.

2. Разработаны и получены гранулированные сорбенты из отходов энергетики с эффективностью до 98,4 % в отношении сульфат- и хлорид-ионов. Определены условия изготовления гранулированных сорбционных материалов на основе отходов энергетики – шлама химводоподготовки Казанской ТЭЦ-1 и жидкого натриевого стекла в соотношении 2:1 (мас.), гранулы диаметром от 0,5 до 2,5 мм при термообработке 500°C в течение 25 мин; ЗШО и жидкого

натриевого стекла в соотношении 3:2 (мас.), при термообработке 300°C продолжительностью 25 мин, диаметр гранул 0,5-2,5 мм.

3. Экспериментально установлен механизм адсорбции сульфат- и хлорид-ионов разработанными сорбентами на основе отходов энергетики. Химическая адсорбция сульфат- и хлорид-ионов – шламом водоподготовки, физическая адсорбция – ЗШО. Получены изотермы адсорбции. Произведен расчет термодинамических и кинетических показателей. Дифференциальная теплота адсорбции по сульфат ионам: сорбентом С1 (17,9–19,16 кДж/моль), сорбентом С2 (24,11–26,24 кДж/моль), по хлорид-ионам: С1 (27,5–30,74 кДж/моль), С2 (21,02–22,69 кДж/моль). Энергия Гиббса по сульфат-ионам – (С1(-33,26 – (-28,59) кДж/моль; С2 (-63,47–(-59,10) кДж/моль)); по хлорид-ионам – (С1(-29,9–(-27,58) кДж/моль; С2 (-30,96 – (-30,51) кДж/моль). Энергия активации: по сульфат-ионам (С1 – 74,062 кДж/моль; С2 – 16,045 кДж/моль), по хлорид-ионам (С1 – 60,715 кДж/моль; С2 – 18,033 кДж/моль).

#### ***Теоретическая и практическая значимость работы.***

1. На основании термодинамических и кинетических показателей представлен механизм адсорбции сульфат- и хлорид-ионов ООК сорбентами, полученными из шлама химводоподготовки и золошлаковых отходов.

2. Установлены закономерности адсорбции ООК сорбционными материалами на основе шлама химводоподготовки и золошлаковых отходов с высокой эффективностью очистки относительно хлорид- и сульфат-ионов (97,3 % и 98,4 % соответственно). Высокий уровень эффективности способствует решению экологической проблемы промышленности. Сорбенты, изготовленные из отходов энергетики, отличаются низкой стоимостью, что делает их конкурентоспособными на рынке.

3. Разработана технология производства гранулированного сорбционного материала С4 на основе золошлаковых отходов.

4. Усовершенствована технологическая схема водоподготовки Казанской ТЭЦ-2 путем добавления блока адсорбционной доочистки ООК от сульфат- и хлорид-ионов наиболее эффективным гранулированным сорбционным материалом С4, изготовленным на основе ЗШО.

5. Результаты работы приняты к применению в научной и проектно-конструкторской деятельности на АО «Татэнерго», Казанская ТЭЦ-1, ООО «КПЭИ».

***Научные положения, выносимые на защиту:***

1. Результаты исследования химического состава обратноосмотического концентрата мембранных установок.

2. Результаты исследования химических и технологических характеристик шлама химводоподготовки и ЗШО, характеристик сорбционных материалов, получаемых на их основе.

3. Исследование адсорбции сульфат- и хлорид-ионов обратноосмотического концентрата полученными сорбционными материалами на основе шлама химводо-подготовки и ЗШО, изучение кинетики и установление механизма адсорбции.

4. Усовершенствованная технологическая схема блока обратноосмотической установки, повышающая эффективность очистки концентрата.

***Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации,*** состоит в личном обсуждении идей, определении цели и задач, выполнении поставленных задач, постановке и анализе экспериментов, расчете необходимых технологических параметров, оформлении выводов о проделанной работе, их публикация и апробация.

***Степень достоверности результатов исследования.*** В ходе исследования применялись проверенные и стандартизированные методики, а также данные, полученные от реальных промышленных предприятий. Экспериментальная часть исследования проводилась с использованием высокоточного оборудования и методов аналитического анализа. Таким образом, достоверность результатов исследования гарантирована строгим соблюдением научной методологии и использованием проверенных данных. Это означает, что исследование выполнено с использованием сертифицированных методик и оборудования, а полученные данные прошли тщательную проверку на точность и воспроизводимость, что соответствует установленным стандартам и требованиям.

### ***Оценка выполненной соискателем работы.***

Диссертационная работа Зайнуллиной Элеоноры Райнуровны представляет собой завершённый научный труд, выполнена на достаточно высоком научном и методическом уровне. Полученные результаты обладают новизной и практической значимостью, поскольку позволяют решить актуальные задачи производства и представляют научный и практический интерес для промышленности.

### ***Ценность научной работы соискателя ученой степени.***

В диссертационной работе разработаны и получены сорбенты на основе отходов энергетики (С1 – порошкообразный шлак химводоподготовки, С2 – порошкообразный золошлаковые отходы, С3 – гранулы, полученные из шлака химводоподготовки с добавлением связующего жидкого натриевого стекла, С4 – гранулы, полученные из ЗШО с добавлением связующего жидкого натриевого стекла), для очистки обратноосмотического концентрата от сульфат- и хлорид-ионов в статическом (сорбционными материалами С1, С2) и динамическом (сорбционными гранулированными материалами С3 и С4) режимах для обеспечения экологической безопасности окружающей среды.

Усовершенствована технологическая схема водоподготовки ТЭС путем добавления блока доочистки ООК от сульфат- и хлорид-ионов разработанным сорбционным материалом С4. Предложена технологическая схема производства С4, включающая гранулятор-смеситель, камерную печь.

Предложен метод утилизации обратноосмотического концентрата методом его закачивания в нефтяные пласты при нефтедобыче. Результаты фильтрационных исследований показывают, что применение обратноосмотического концентрата приводит к увеличению прироста коэффициента вытеснения нефти. Это объясняется разрушением мостиковых связей между пленочной нефтью и породой через катионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ .

***Соответствие диссертации требованиям, установленным п.14 «Положения о присуждении ученых степеней.*** В диссертационной работе отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора и (или) источник заимствования, а также результаты научных работ, выполненных Зайнуллиной Элеонорой Райнуровной в соавторстве, без ссылок на соавторов.

**Научная специальность и отрасль науки, которой соответствует диссертация.** Проведённое исследование соответствует паспорту специальности 2.10.2. Экологическая безопасность, а именно направлению исследований:

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

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени** По теме диссертационной работы опубликовано 19 работ, из них: 1 статья в рецензируемом научном издании, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации, 1 статья в научном издании, индексируемом в международной базе данных Scopus, 1 статья в рецензируемом научном издании, входящих в перечень ВАК, 16 тезисов в материалах конференций различного уровня.

**В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по специальности диссертации:**

1. Николаева, Л.А. Технология замкнутого цикла получения строительного гипса из отхода энергетики и дымовых газов тепловой электростанции / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина, Г.Г. Сафина // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 1(69). – С. 125-133.

**В изданиях, включенная в международную базу цитирования SCOPUS и Web of Science:**

2. Николаева, Л.А. Очистка обратноосмотического концентрата золошлаковыми отходами ТЭС / Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р., Саяхов Р.И. // Экология и промышленность России. – 2024. – № 9(Т. 28). – С. 10-15.

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

3. Николаева, Л.А. Исследование процесса обессоливания концентрата установок обратного осмоса отходом энергетики / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – № 2 (Т.24). – С. 186-195.

**Статьи в прочих изданиях:**

4. Зайнуллина, Э.Р. Адсорбционная очистка обратноосмотического концентрата с использованием отхода энергетики / Э.Р. Зайнуллина, Л.А. Николаева // Бутаковские чтения: I Всероссийская с международным участием молодежной конференция. Томск – 2021. – С. 379-382.

5. Николаева, Л. А. Использование отхода энергетики в качестве сорбционного материала при очистке обратноосмотического концентрата / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: Международная научная конференция, Белгород – 2021. – С. 145-152.

6. Николаева, Л.А. Изучение осушки природного газа отходом энергетики / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина // Химия и инженерная экология - XXI: Международная научная конференция (школа молодых ученых), посвященная 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ и 60-летию создания института автоматики и электронного приборостроения КНИТУ-КАИ. Казань – 2021. – С. 113-116.

7. Зайнуллина, Э.Р. Изучение процесса очистки обратноосмотического концентрата ТЭС отходом энергетики / Э.Р. Зайнуллина // Тинчуринские чтения – 2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: Международная молодежная научная конференция, Казань – 2022. – С. 695-697.

8. Зайнуллина, Э.Р. Применение карбонатного шлама для очистки обратноосмотического концентрата ТЭС / Э.Р. Зайнуллина // Энергия-2022. Теплоэнергетика. Семнадцатая Всероссийская (девятая Международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново – 2022. – С. 55.

9. Зайнуллина, Э.Р. Очистка обратноосмотического концентрата сорбционным материалом на основе отхода энергетики на промышленных предприятиях / Э.Р. Зайнуллина // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика. Казань – 2022. – С. 455-457.

10. Николаева, Л.А. Технология очистки концентрата обратного осмоса с применением отхода энергетики / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина //



Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. Всероссийская научная конференция. Белгород – 2022. С. 211-215.

11. Николаева, Л.А. Очистка обратноосмотического концентрата промышленных предприятий карбонатным шламом / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: Фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология. Международная научная конференция. Белгород – 2022. – С. 17-21.

12. Зайнуллина, Э.Р. Адсорбционный способ очистки дренажных вод обратного осмоса шламом химводоподготовки / Э.Р. Зайнуллина // Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация». Международная молодежная научная конференция. Казань – 2023. – С. 759-761.

13. Зайнуллина, Э.Р. Использование отхода энергетики в качестве адсорбента для очистки обратноосмотического концентрата / Э.Р. Зайнуллина // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика. Казань – 2023. – С. 450-452.

14. Николаева, Л.А. Адсорбция сульфат- и хлорид- ионов золошлаковыми отходами на примере обратноосмотического концентрата / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина // Содружество научных и профессиональных сообществ: энергетика, промышленность, экология. I Международная научно-практическая онлайн-конференция. Казань – 2023. – С. 60-62.

15. Зайнуллина, Э.Р. Возможность использования отхода энергетики и дымовых газов ТЭЦ в технологии замкнутого цикла получения строительного гипса / Э.Р. Зайнуллина // XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ. Казань – 2023. – С. 526-529.

16. Николаева, Л.А. Технология очистки дымовых газов ТЭС с получением строительного гипса / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина // Химия и инженерная экология - XXIII. Международная научная конференция (школа молодых ученых), посвященной сотрудничеству с союзными государствами. Казань – 2023. – С. 48-50.

17. Николаева, Л.А. Технология замкнутого цикла получения строительного гипса с использованием отходов энергетики / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения. VI Всероссийская научно-практическая конференция в рамках VI Всероссийского научно-общественного форума «Экологический форсайт». Саратов – 2024. – С. 109-111.

18. Зайнуллина, Э.Р. Лабораторное исследование адсорбционной очистки засоленных стоков от сульфат- и хлорид- ионов золошлаковыми отходами / Э.Р. Зайнуллина // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация». Международная молодежная научная конференция. Казань – 2024. – С. 617-619.

19. Николаева, Л.А. Очистка обратноосмотического концентрата золошлаковыми отходами ТЭС / Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина // Химия и инженерная экология - XXIV. Международная научная конференция (школа молодых ученых), посвященная году научно-технологического развития в Республике Татарстан. Казань – 2024. – С. 34-36.

Диссертация «Очистка обратноосмотического концентрата от сульфат- и хлорид- ионов сорбентами на основе отходов энергетики» Зайнуллиной Элеоноры Райнуровны является завершенной научно-квалификационной работой выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение задач, связанных с повышением экологической безопасности окружающей среды.

Диссертационная работа обобщает самостоятельные исследования автора, обладает внутренним единством, содержит научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Работа соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней, принятого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 (в редакции от 16.10.2024г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертационная работа Зайнуллиной Э.Р. на тему «Очистка обратноосмотического концентрата от сульфат- и хлорид- ионов сорбентами на

основе отходов энергетики» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.10.2. Экологическая безопасность.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Присутствовали на заседании – 28 человека, из них 7 человек - члены диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе КГЭУ. Результаты голосования: «за» – 28 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет. Заключение принято единогласно, протокол № 10 от 30.09.2025 г.

Председатель заседания,  
профессор кафедры «Инженерная  
экология и безопасность труда»,  
д.т.н., профессор

Лаптев Анатолий  
Григорьевич

Секретарь заседания,  
доцент кафедры  
«Инженерная экология и безопасность  
труда» к.т.н, доцент

Исхакова Регина  
Яновна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Российская Федерация, Республика Татарстан, Казань, ул. Красносельская, 51, телефон/факс +7 (843) 519-42-20, [kgeu@kgeu.ru](mailto:kgeu@kgeu.ru), [www.kgeu.ru](http://www.kgeu.ru).

Свидетельство о лице, утвердившем заключение

Ившин Игорь Владимирович: доктор технических наук, профессор

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», проректор по науке и коммерциализации, 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

Тел. (843)519-42-73, e-mail:[ivshini@mail.ru](mailto:ivshini@mail.ru)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Лаптева А.Г. Исхакова Р.Я.  
подписи секретаря  
Специалист ОК  
41