



## УТИЛИЗАЦИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕССОЛИВАНИЯ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТА ТЭС

Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р., Сафина Г.Г.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
larisanik@mail.ru

*Резюме:* АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в изучении возможности использования гранулированного сорбента, разработанного на основе золошлаковых отходов, для очистки обратноосмотического концентрата – высокоминерализованного стока ТЭС – от сульфат- и хлорид-ионов. ЦЕЛЬ. Снизить негативное воздействие ТЭС на окружающую среду путём внедрения усовершенствованной технологии очистки обратноосмотического концентрата с использованием многотоннажного отхода энергетики. МЕТОДЫ. Определение технологических характеристик золошлаковых отходов производилось с применением гостированных методик. Анализ физико-химических показателей качества воды проводился с соблюдением методов, используемых в рамках ведомственного экологического контроля (хроматографический, гравиметрический, титриметрический, фотоколориметрический). РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана технология, позволяющая очищать обратноосмотический концентрат от сульфат- и хлорид-ионов с использованием разработанного гранулированного сорбента на основе золошлаковых отходов. Произведен расчет экономического эффекта и предотвращённого экологического вреда от внедрения усовершенствованной технологии. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработан гранулированный сорбент на основе золошлаковых отходов, предназначенный для очистки обратноосмотического концентрата от сульфат- и хлорид-ионов.

**Ключевые слова:** золошлаковые отходы ТЭС, обратноосмотический концентрат, сульфат-ионы, хлорид-ионы, адсорбция, сорбционные материалы.

**Благодарности:** Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

**Для цитирования:** Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р., Сафина Г.Г. Утилизация золошлаковых отходов в качестве сорбционных материалов для обессоливания обратноосмотического концентрата ТЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 207-218. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-207-218.

## UTILIZATION OF ASH AND SLAG WASTE AS SORPTION MATERIALS FOR DESALINATION OF REVERSE OSMOSIS CONCENTRATE TES

Nikolaeva L.A., Zainullina E.R., Safina G.G.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
larisanik@mail.ru

**Abstract:** PURPOSE The study focuses on evaluating the feasibility of using a granular sorbent material derived from ash-slag waste to remove sulfate and chloride ions from reverse osmosis concentrate – a highly mineralized effluent produced by thermal power plants. GOAL. Reducing the environmental impact of thermal power plants through the application of an advanced purification technology for reverse osmosis concentrate, using materials derived from energy sector waste. METHODS. The technological characteristics of ash-and-slag waste were determined using GOST-standardized methods. The physico-chemical parameters of water

quality were analyzed in accordance with in-house environmental monitoring protocols, including chromatographic, gravimetric, titrimetric, and photocolometric techniques. **RESULTS** We have performed calculations of the economic effect and prevented environmental harm associated with the deployment of an enhanced treatment process. The technology uses granular sorbent media to remove sulfate and chloride ions from reverse osmosis concentrate generated by thermal power plants. **CONCLUSION.** Based on ash-and-slag waste, a granular sorbent material was synthesized to treat reverse osmosis concentrate by removing sulfate and chloride ions.

**Keywords:** ash and slag waste from thermal power plants; reverse osmotic TPP concentrate; sulfate ions; chloride ions; adsorption; sorption material.

**Acknowledgments:** The work was carried out at the expense of a grant provided in 2025 by the Science and Technology Foundation of the Republic of Tatarstan for the implementation of fundamental and applied scientific research in scientific and educational organizations, enterprises, and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan".

**For citation:** Nikolaeva L.A., Zainullina E.R., Safina G.G. Utilization of ash and slag waste as sorption materials for desalination of reverse osmosis concentrate TES. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 207-218. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-207-218.

#### **Введение (Introduction)**

На протяжении последнего десятилетия в России произошло значительное расширение производственных мощностей ТЭС, что приводит к постоянному выбросу большого объема тепла и вредных веществ в окружающую среду. Интенсивное использование природных водных ресурсов в энергетике сопровождается образованием сточных вод с различной концентрацией загрязняющих веществ, что создаёт серьезные экологические проблемы. На ТЭС предъявляются строгие требования к качеству воды, используемой в процессе производства электрической и тепловой энергии. Добавочная вода подается в контур для восполнения потерь пара и конденсата после применения физико-химических методов очистки.

В процессе водоподготовки одним из способов обессоливания природной воды являются мембранные технологии. Ультрафильтрация, микрофильтрация, нанофильтрация применяются на стадии предварительной очистки, природной воды в результате такой очистки образуется осветленная вода, обессоливание которой происходит на установках обратного осмоса (УОО). После установки обратного осмоса образуются пермеат и сточные воды с повышенной минерализацией — концентрат, составляющий 25% от общего объема водопотребления. При пропускной способности УОО – 60 м<sup>3</sup>/ч объем сбрасываемого концентрата достигает – 20 м<sup>3</sup>/ч. Анализ физико-химического состава концентрата показал, что концентрация, сульфат- и хлорид-ионов, превышают предельно допустимые значения для сбросов в водные объекты рыбохозяйственного значения [1].

В настоящее время концентрат сбрасывается в общую систему канализации. В ряде технологий обратноосмотический концентрат (ООК) полностью утилизируется и может использоваться в качестве основного компонента для производства дорожных покрытий. Это позволяет повысить ресурсную эффективность и снизить экологическую нагрузку на инфраструктуру города. Применение ООК в дорожных материалах предполагает: улучшение прочностных характеристик и долговечности покрытий; снижение затрат на сырье за счет вторичной переработки; снижение выбросов CO<sub>2</sub> в рамках контура управления отходами; снижение требований к обработке и обезвреживанию отходов перед повторным использованием.

Целью исследования является снижение негативного воздействия ТЭС на окружающую среду за счет разработки технологии доочистки обратноосмотического концентрата (ООК) гранулированным сорбционным материалом на основе золошлаковых отходов (ЗШО) с последующим возвратом в технологический цикл при соблюдении установленных показателей качества.

Для очистки ООК от сульфат- и хлорид-ионов разработан гранулированный сорбционный материал на основе золошлаковых отходов (ЗШО), получаемой при сжигании топлива на ТЭС в топочной камере при температурах от 1200 до 1700 °С. Объем

образующихся отходов варьируется в зависимости от типа топлива и составляет: 10 – 15 % при сжигании бурого угля, 40 % – каменного угля, 50 – 80 % – сортовых смесей, а также 0,15 – 0,20 % – мазута.

Научная значимость исследований заключается в разработке технологии доочистки ООК с использованием сорбционных материалов на основе ЗШО, направленных на удаление сульфат- и хлорид-ионов. В ходе эксперимента была определена адсорбционная емкость различных форм сорбентов: порошкообразного и гранулированного. Результаты показали, что гранулированный сорбент значительно более эффективен, с показателями очистки 96,2% для сульфат-ионов и 98,4% для хлорид-ионов. Для порошкообразного сорбента эффективность составила 89,4% по сульфат-ионам и 90,5% по хлорид-ионам.

Практическая значимость исследования — усовершенствование схемы водоподготовки ГРЭС за счёт внедрения блока адсорбционной доочистки ООК от сульфат- и хлорид-ионов с использованием гранулированного сорбента на основе ЗШО.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

В работах [2, 3] рассмотрены методы очистки обратноосмотического концентрата, которые делятся на четыре класса: мембранные, термические, электрические и химические.

Изучены комплексные методы — в настоящее время они тестируются преимущественно в экспериментальном масштабе для исключения сброса обратноосмотического концентрата. Проанализированы способы обработки концентрата морской воды (их можно отнести к перечисленным выше категориям) применительно к другим источникам концентрата. Рассмотрены методы утилизации концентрата. Каждый тип методов имеет свои особенности: термические методы хорошо себя зарекомендовали, но требуют значительных энергозатрат по сравнению с другими подходами; химические методы могут быть экономически выгодными за счёт прибыли от продажи извлечённых химических веществ, однако чаще всего их применяют лишь для предварительной очистки; электрические и мембранные методы представляют собой перспективные технологии.

В работе [4] представлены результаты экспериментальных исследований прямого сброса ООК в поверхностные водоемы.

Для компенсации затрат на интенсивные исследования, необходимые для реализации технологии нулевой утечки, целесообразно применять инновационные и экологичные методы утилизации. Они позволят существенно сократить воздействие на окружающую среду.

В источнике [5] изложен метод сброса ООК, предварительно обработанного коагуляцией, осаждением и фильтрацией, в глубокую скважину. Высоцким С.П. и Печенога А.А. [6] предложен способ минимизации объема ООК за счет его возврата в технологический цикл.

Ежегодно на угольных электростанциях в России сжигается более 100 млн тонн угля, в результате чего образуются продукты сжигания углей (золашлаковые отходы), которые утилизируются и накапливаются в золоотвалах, а совокупный объём накопленных отходов превышает 1,5 млрд тонн, занимая более 22000 га территорий [7]. ЗШО классифицируются как отходы II–IV классов опасности и представляют существенную экологическую угрозу из-за выщелачивания тяжёлых металлов и токсичных элементов, загрязнения грунтовых и поверхностных вод, пылевого загрязнения атмосферы при ветровой эрозии золоотвалов и потенциального накопления радионуклидов [8]. При этом уровень утилизации ЗШО в России остаётся крайне низким – перерабатывается лишь около 10% от общего объёма, тогда как основная масса размещается на специализированных полигонах, содержание которых требует значительных затрат (строительство – до 500 – 800 млн руб. за объект, реконструкция – 200 – 400 млн руб., ежегодное обслуживание – 5 – 15 млн руб./га) [9].

Между тем современные исследования [10, 11] демонстрируют значительный потенциал ЗШО как вторичного сырья: в строительной отрасли их применяют при производстве цемента (в качестве минеральной добавки до 15–20%), бетона, стеновых материалов, сухих строительных смесей, керамических изделий, теплоизоляционных материалов и в дорожном строительстве; в химической промышленности из ЗШО извлекают ценные компоненты ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $U_3O_8$ , V, Ge. и др.), получают сульфат алюминия и минеральные удобрения; в металлургии используют как добавки в агломерационную шихту и компоненты шлакообразующих смесей; в сельском хозяйстве – в качестве мелиорантов для кислых почв и минеральных добавок; кроме того, ЗШО служат сырьём для производства сорбентов, фильтрующих материалов,

алюмосиликатных микросфер и редкоземельных металлов. Комплексное использование ЗШО способно обеспечить значительный экологический эффект (сокращение площади золоотвалов, снижение выбросов загрязняющих веществ) и экономический эффект (снижение затрат на содержание полигонов, экономия первичных ресурсов, создание новых производств), причём при увеличении уровня утилизации до 50–60% годовой экономический эффект может составить 15–25 млрд руб. с учётом экологических выгод, что подчёркивает необходимость развития технологий переработки и вовлечения золошлаковых отходов в хозяйственный оборот для повышения ресурсоэффективности отечественной промышленности и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Значительный практический и научный интерес представляют исследования, демонстрирующие высокую сорбционную эффективность золошлаковых отходов (ЗШО). В работе [12] исследована способность ЗШО извлекать ионы аммония из водной среды. В результате было установлено, что степень извлечения ионов аммония достигает 90% при оптимальных условиях: рН 6–8, температуре 20–25 °С и времени контакта 60 – 90 минут.

Показано, что высокая сорбционная ёмкость ЗШО обусловлена их развитой удельной поверхностью (15 – 30 м<sup>2</sup>/г) и наличием активных центров на основе алюмосиликатных соединений.

В исследовании [13] проведено сравнение сорбционных свойств модифицированного сорбента на основе ЗШО ТЭС по отношению к различным нефтепродуктам, таким как мазут, керосин, бензин марки АИ-92, н-гексан.

Экспериментально установлено, что максимальная сорбционная ёмкость наблюдается для тяжёлых фракций (мазут – до 8,5 г/г), тогда как для лёгких углеводородов (н-гексан) показатель снижается до 3,2 г/г. Модификация поверхности ЗШО путём кислотной активации (5 % раствором HCl) повышает сорбционную способность на 25–40% за счёт увеличения пористости и образования дополнительных функциональных групп.

Дополнительные исследования [14] выявили эффективность ЗШО при очистке из водных сред: от ионов тяжёлых металлов Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> (эффективность 70 – 85%); фенольных соединений (до 75%); фосфатов (до 65%) благодаря присутствию соединений кальция и магния, образующих нерастворимые осадки.

Механизм сорбции на ЗШО включает несколько процессов: физическую адсорбцию за счёт пористой структуры материала.

Практическое внедрение технологии сорбционной очистки на основе ЗШО уже реализовано на ряде объектов: локальных очистных сооружениях промышленных предприятий (удаление нефтепродуктов); системах водоподготовки ТЭС (доочистка оборотных вод); мобильных установках для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов.

Таким образом, использование ЗШО в качестве сорбционного материала не только решает проблему утилизации отходов теплоэнергетики, но и предоставляет экономически выгодное решение для очистки промышленных и сточных вод от широкого спектра загрязнителей. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию методов модификации ЗШО для повышения селективности сорбции, разработку технологий регенерации отработанных сорбентов и создание нормативов применения золошлаковых сорбентов в системах водоочистки различного масштаба.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Объект исследования – отходы энергетики (ООК, ЗШО ТЭС).

В ходе исследования химического состава ООК использовали стандартизированные методики анализа качества воды [15]. Определение количественного содержания ионов – сульфатов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) и хлоридов (Cl<sup>-</sup>) – выполняли с помощью ионной хроматографии. Измерения проводили на хроматографе Metrohm Eco IC (Швейцария).

Химический состав ЗШО был установлен с использованием рентгенографического качественного фазового анализа на дифрактометре D 8 ADVANCE компании Bruker. Технологические характеристики ЗШО определены на основе стандартных методик.

Химический состав ООК ГРЭС следующий: рН – 7,62, Na<sup>+</sup> – 79,7 мг/дм<sup>3</sup>, Cl<sup>-</sup> – 312 мг/дм<sup>3</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 132 мг/дм<sup>3</sup>, SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup> – 7,3 мг/дм<sup>3</sup>, удельная электропроводность – 1748 мкСМ/см, окисляемость – 27,52 мгО/дм<sup>3</sup>. Показатели качества ООК говорят о том, что концентрации сульфат- и хлорид-ионов превышают ПДК загрязняющих веществ в

водах водных объектов рыбохозяйственного значения:  $\text{SO}_4^{2-}$  – 100 мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{Cl}^-$  – 300 мг/дм<sup>3</sup>.

Для соответствия ПДК загрязняющих веществ в сточных водах, сбрасываемых в водные объекты рыбохозяйственного значения, необходима доочистка обратноосмотического концентрата (ООК). Предложена технология обессоливания ООК методом адсорбции с использованием золошлаковых отходов энергетики (IV класс опасности по Федеральному классификационному каталогу отходов) [16].

Состав ЗШО ГРЭС, сжигающей бурый подмосковный уголь (доля сжигания — 10 %), определен экспериментальным путём. Преобладающими компонентами являются: диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ , 40-60 %) и оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 15-30 %), далее следуют оксид железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 5-15 %) и сульфат кальция ( $\text{CaSO}_4$ , 2-20 %). Содержание остальных компонентов (оксидов кальция, магния, калия, натрия, диоксида титана и углерода) варьируется от 0,8 до 1,4 %.

К ключевым технологическим характеристикам материала относятся: насыпная плотность (800 кг/м<sup>3</sup>), гранулометрический состав (частицы размером 0,5 – 2,0 мм), влажность (5 %), слабокислая реакция среды (pH 6,6 – 6,8), а также высокие показатели пористости (0,79 см<sup>3</sup>/г) и удельной поверхности (150 – 400 м<sup>2</sup>/г).

В рамках исследования [17] оценивали адсорбционные свойства золы по отношению к сульфат- и хлорид-ионам. Для этого готовили модельные растворы: раствор сульфата натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) с концентрацией 150 мг/дм<sup>3</sup> и раствор хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ) с концентрацией 350 мг/дм<sup>3</sup>. Эксперименты проводили в двух режимах — статическом и динамическом.

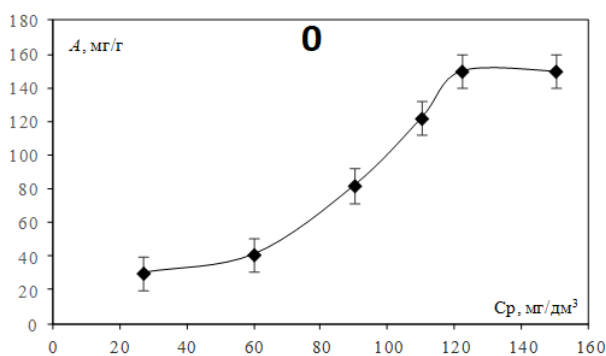
Сорбент С1 на основе ЗШО, представляет собой порошок размерами частиц 0,5-2,0 мм, влажностью – 5%, высушенной при 150°C. Статическое исследование адсорбционных свойств сорбента С1 проводили методом переменных навесок при постоянной концентрации раствора. Эксперимент проводился в пяти конических колбах вместимостью – 100 см<sup>3</sup>, содержащих модельный раствор. В каждую колбу вносили навеску сорбента в диапазоне 0,01 – 2 г.

Перемешивание осуществляли магнитной мешалкой в течение 24 ч. После завершения сорбент отделяли фильтрацией через бумажный фильтр. Определяем количественное содержание остаточных концентраций сульфат- и хлорид-ионов [18]. Расчёт величины адсорбции  $A$  (в мг/г) проводили на основе полученных данных по установленной формуле.

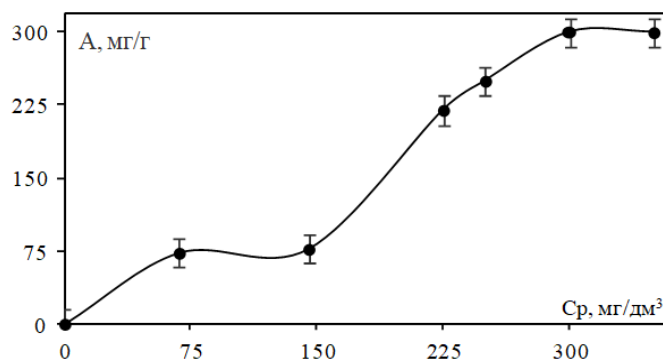
$$A = \frac{(c_0 - c) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где  $A$  – количество адсорбционного вещества, приходящееся на 1 г адсорбента, мг/г;  $m$  – масса адсорбента, г;  $V$  – объем раствора, из которого идет адсорбция, л.

В статических условиях построена изотерма адсорбции сульфат- и хлорид- ионов сорбентом С1 (рис. 1).



а



б

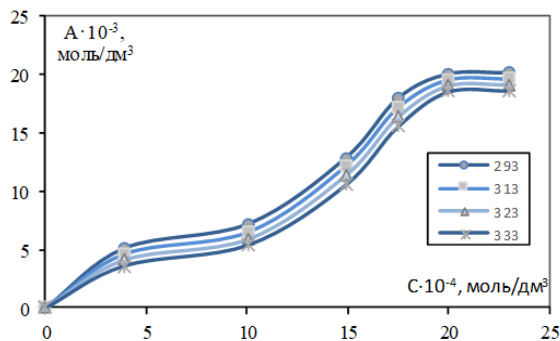
Рис. 1. Изотермы адсорбции: а – сульфат-ионов; б – хлорид-ионов; Cp – концентрация сульфат- и хлорид-ионов в растворе

Fig. 1. Adsorption isotherms: a – sulfate ions; b – chloride ions; Cp – concentration of sulfate ions, chloride ions in the solution, mg/dm<sup>3</sup>

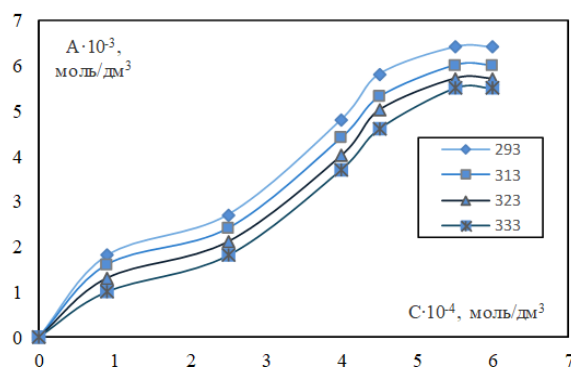
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Форма изотерм адсорбции (см. рис. 1) соответствует IV классу по классификации Смита [19].

Для изучения механизма адсорбции построены изотермы при различных температурах 293 К, 313 К, 323 К и 333 К (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Изотермы адсорбции при различных температурах сорбентом С1: а – сульфат-ионов; б – хлорид-ионов

Fig. 2. Adsorption isotherms at different temperatures with sorption material S1: a – sulfate ions; b – chloride ions

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основе полученных изотерм произведен расчет термодинамических и кинетических параметров.

Произведены расчеты дифференциальной теплоты адсорбции (табл. 1) и энергии Гиббса (табл. 2) для процесса адсорбции сульфат- и хлорид-ионов сорбентом С1.

$$Q = -R \frac{\Delta \ln C}{\Delta \left( \frac{1}{T} \right)}, \quad (2)$$

где  $T$  – температура, К;  $R$  – молярная газовая постоянная,  $R = 8,341$  Дж/(моль · К);  $C$  – равновесная концентрация сульфат-ионов (хлорид-ионов) в растворе, моль/дм<sup>3</sup>.

Энергия Гиббса  $\Delta G$ , кДж/моль (табл. 2):

$$\Delta G = -R \cdot T \cdot \ln \cdot K_L, \quad (3)$$

где  $K_L$  – константа адсорбционного равновесия Ленгмюра;  $T$  – температура, К.

Таблица 1

Table 1

Дифференциальные теплоты адсорбции сульфат- и хлорид-ионов сорбентом С1  
Differential heat of adsorption of sulfate and chloride ions by sorbent C1

Температура, К	Сульфат-ионы		Хлорид-ионы	
	$Q$ , кДж/моль	$A \cdot 10^{-3}$ , моль/г	$Q$ , кДж/моль	$A \cdot 10^{-3}$ , моль/г
293	24,15	7,4	22,45	2,73
313	24	6,1	22,13	2,37
323	23,52	5,4	21,52	1,9
333	23,7	5,1	21,15	1,8

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2

Table 2

Влияние температуры на постоянные Ленгмюра и энергии Гиббса при адсорбции сульфат- и хлорид-ионов сорбентом С1

Effect of temperature on Langmuir constants and Gibbs energies during the adsorption of sulfate and chloride ions by sorbent C1

Температура, К	Сульфат-ионы			Хлорид-ионы		
	$K_L \cdot 10^{-3}$	$A_m \cdot 10^3$ , моль/г	$\Delta G$ , кДж/моль	$K_L \cdot 10^{-3}$	$A_m \cdot 10^3$ , моль/г	$\Delta G$ , кДж/моль
293	11,34	19,8	-60,15	3,62	6,48	-30,85
313	11,16	19,6	-62,56	3,18	6,12	-30,83
323	10,13	17,5	-62,72	3,12	5,96	-30,74
333	9,93	17,2	-63,16	2,98	5,47	-30,42

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для нахождения энергии активации  $E_a$  использовано уравнение Аррениуса (рис. 3):

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}. \quad (3)$$

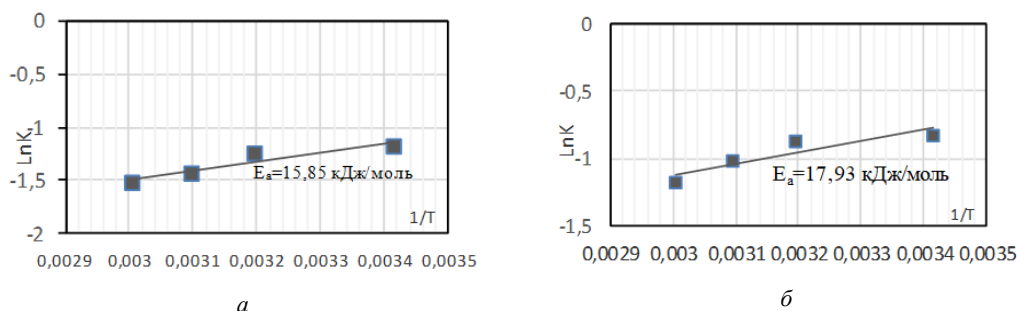


Рис. 3. Графический метод расчета энергии активации процесса адсорбции: а – сульфат-ионов; б – хлорид-ионов  
Fig. 3. Graphical method for calculating the activation energy of the adsorption process: a – sulfate ions; b – chloride ions

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Установлено, что механизм адсорбции сульфат- и хлорид-ионов на сорбенте С1 носит физический характер.

Для изучения адсорбции этих ионов в динамических условиях применялся гранулированный сорбционный материал на основе ЗШО (С2). В качестве связующего компонента использовалось жидкое натриевое стекло (ЖНС), при этом соотношение ЖНС к основному материалу составляло 3:2 по массе.

Оптимальная температура обработки сорбента С1 в диапазоне от 20 °С от 600 °С с шагом 100 °С выбрана в соответствии с экспериментальными данными, приведенными в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Зависимость удельной поверхности гранулированного сорбента С2 от температуры обработки

*Dependence of the specific surface area of granular sorbent С2 on the processing temperature*

№ п/п	Температура обработки $t$ , °С	Удельная поверхность С2, $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г
1	20	141,2
2	200	145,5
3	300	149,1
4	400	149,2
5	500	149,6
6	600	149,7

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Максимально эффективное значение удельной поверхности материала с использованием связующего достигается при температуре 300 °С. Таким образом, термообработка проводилась при 300 °С в течение 25 минут.

Исследование адсорбционных характеристик гранулированного сорбента С2 в отношении сульфат- и хлорид-ионов в динамическом режиме проводили на модельной лабораторной установке. Для этого использовали стеклянную колонку с геометрическими параметрами: диаметр 2,5 см, высота слоя сорбента 20 см. Масса загруженного гранулированного сорбента составила – 56 г. Через колонку пропускали одинаковые порции модельных растворов – Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (150 мг/дм<sup>3</sup>) и NaCl (350 мг/дм<sup>3</sup>).

Произведен расчет динамической и полной сорбционной емкости (ДСЕ и ПСЕ) поглощения гранулированного сорбента С2 в отношении сульфат- и хлорид-ионов. Для сульфат-ионов: ДСЕ – 324,1 мг/г, 1345,4 мг/г, ПСЕ – 408,5, объем пропущенной воды: 119,8 дм<sup>3</sup>, 149,8 соответственно и хлорид-ионов: ДСЕ – 1345,5 мг/г, ПСЕ – 1671,5 мг/г, объем пропущенной воды: 250,7 дм<sup>3</sup>, 311,7 дм<sup>3</sup>. Объем пропущенной воды фиксировался при полном насыщении гранулированного сорбента С2.

Результаты эксперимента по динамической адсорбции сульфат- и хлорид-ионов на сорбенте С2 в гранулированной форме представлены на рисунке 4.

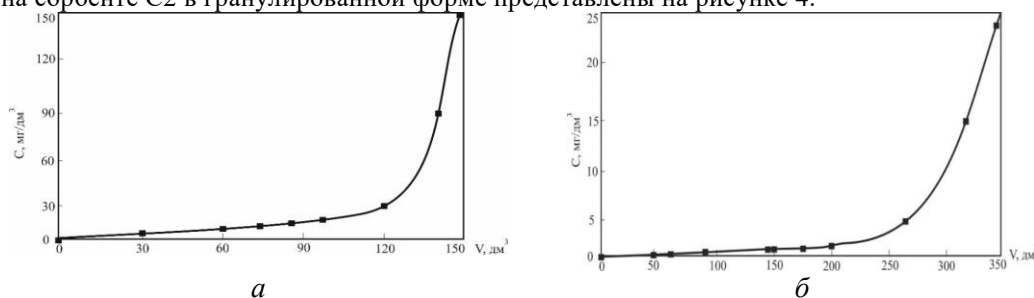


Рис. 4. Выходная кривая адсорбции гранулированным сорбентом С2 в динамических условиях: а – сульфат-ионов; б – хлорид-ионов  
С – концентрация хлорид-ионов в растворе после адсорбции; V – объем раствора, пропущенного через колонку

Fig. 4. Output Curve of Adsorption of Sulfate (a) and Chloride Ions (b) with Sorbent S2 under dynamic conditions: C – concentration of chloride ions in the solution after adsorption; V – volume of solution passed through the column

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В таблице 4 представлены данные по эффективности очистки обратноосмотического концентрата от сульфат- и хлорид-ионов с использованием сорбционных материалов на основе ЗШО.

Таблица 4

Table 4

Эффективность адсорбции сульфат- и хлорид- ионов разработанными сорбционными материалами

*The efficiency of sulfate and chloride ion adsorption by the developed sorption materials*

Марка сорбционного материала	Концентрация сульфат-ионов, мг/дм <sup>3</sup>		Эффективность %	Концентрация хлорид-ионов, мг/дм <sup>3</sup>		Эффективность %
	до адсорбции	после адсорбции		до адсорбции	после адсорбции	
С1	150	15,9	89,4	350	33,2	90,5
С2	150	5,7	96,2	350	5,7	98,4

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Результаты (Results)

Результаты экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность



использованием гранулированного сорбента С2 показывает высокую экономическую и экологическую эффективность. Себестоимость очистки составляет 27,54 руб./м<sup>3</sup>, производства сорбента — 14 759 руб./т. На примере ГРЭС предотвращённый экологический вред оценивается в 865 458 руб./год, а экономическая эффективность внедрения — в 1 038 045,74 руб./год.

В ходе проведённого исследования выполнен комплексный анализ качества обратноосмотического концентрата (ООК). Установлено, что в период с 2021 по 2024 г. средняя концентрация загрязняющих веществ в сточной воде существенно превышала предельно допустимые концентрации (ПДК) для водных объектов рыбохозяйственного назначения: концентрация сульфат-ионов — 132 мг/дм<sup>3</sup>; хлорид-ионов — 312 мг/дм<sup>3</sup>.

Дополнительно проанализирована существующая схема водоподготовки ГРЭС с блоком обратного осмоса, а также изучены физико-химические и технологические характеристики золошлаковых отходов (ЗШО). На основе полученных данных разработаны оптимальные условия получения гранулированного сорбента С2: соотношение компонентов (по массе) — 3:2; температура термообработки — 300 °С; продолжительность термообработки — 25 мин; диаметр гранул — 0,5–2,5 мм.

Экспериментальные исследования показали, что адсорбция сульфат- и хлорид-ионов материалом на основе ЗШО протекает по механизму физической адсорбции. В ходе работы получены изотермы адсорбции и выполнены расчёты термодинамических и кинетических характеристик процесса с использованием порошкообразного сорбента С1.

Результаты расчётов: дифференциальная теплота адсорбции: для сульфат-ионов — 24,15–23,7 кДж/моль; для хлорид-ионов — 22,45–21,15 кДж/моль. Энергия Гиббса: для сульфат-ионов: –63,16–(–60,15) кДж/моль; для хлорид-ионов: –30,42–(–30,85) кДж/моль. Энергия активации: для сульфат-ионов: 15,85 кДж/моль; для хлорид-ионов: 17,93 кДж/моль.

#### **Заключение (Conclusions)**

Для снижения экологической нагрузки ТЭС на окружающую среду разработан сорбент на основе золошлаковых отходов (ЗШО), предназначенный для очистки обратноосмотического концентрата (ООК) от сульфат- и хлорид-ионов. В ходе лабораторных экспериментов разработана технология изготовления — порошкообразного и гранулированного сорбентов.

В технологическую схему водоподготовки ГРЭС внесено усовершенствование: добавлен блок адсорбционной доочистки обратноосмотического концентрата (ООК) от сульфат- и хлорид-ионов. В качестве сорбционного материала применяется разработанный гранулированный сорбент С2. Также предложена производственная схема его получения, включающая использование гранулятора-смесителя и камерной печи.

Экспериментально подтверждена эффективность адсорбционной доочистки ООК в динамическом режиме: по сульфат-ионам — 96,2 %, хлорид-ионам — 98,4 %.

Для реализации процесса рекомендована технология с применением гранулированного сорбента С2. Экономическая оценка: стоимость очистки 1 м<sup>3</sup> ООК — 27,54 руб.; себестоимость гранулированного сорбента С2 — 14 759 руб./т. Годовой экономический эффект от снижения экологического воздействия — 865,458 тыс. руб. Суммарная эффективность внедрения — 1 038 тыс. руб./год. Окупаемость технологии — 1,5 года.

#### **Литература**

1. Михайлова Е.С., Попова Л.В. Анализ методов очистки сточных вод от сульфатов // Московский экономический журнал. 2022. № 11(7). С. 37–38.
2. Zakiya T., Rajalakshmi M. Treatment and Disposal Methods of Concentrate Stream of Seawater Reverse Osmosis: A Review // Nature Environment and Pollution Technology. 2021. Vol. 20, N. 4. pp. 1403–1414.
3. Scholes R.C., Vega M.A., Sharp J.O., et al. Nitrate removal from reverse osmosis concentrate in pilot-scale open-water unit process wetlands. // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 7. pp. 650–661.
4. Yang Y., Sun Y., Song X., Yu J. Separation of mono- and di-valent ions from seawater reverse osmosis brine using selective electrodialysis // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. pp. 18754–18767.
5. Xuesong Xu, Lu Lin, Guanyu Ma, et al. Study on the effect of polyethyleneimine coating on membrane selectivity and desalination performance in electrodialysis of reverse osmosis concentrate // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 207. pp. 396–405.
6. Высоцкий С.П., Печенога А.А. Совершенствование обратноосмотического обессоливания воды // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2020. № 2 (57). С. 82–89.

7. Шаванов Н. Д., Коновалова Н. А., Панков П. П., Руш Е. А. Изучение состава и свойств золошлаковых смесей с целью их утилизации в строительной индустрии // Актуальные проблемы техносферной безопасности, 2022. С. 134–137.
8. Dik E.P., Soboleva A.N., Smirnova O.A. Environmental hazard classes of ashes and slags from thermal power stations // Thermal Engineering. 2011. Т. 58, № 6. С. 506–512.
9. Алдабергенова С.С., Ибраева Ж.Т., Ниязбекова Р.К., и др. Применение составов золошлаковых отходов при производстве строительных материалов // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. 2024;1(2(14)):440-452.
10. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., Добронравов А.Д., и др. Комплексное использование золошлаковых отходов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 26–36.
11. Хаглеев, Е. П. Золошлакоотвалы годичного регулирования дифференцированных потоков золы и шлака угольных ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 7–8. С. 21–32.
12. Фоменко А.И. Характеристика микросфер золы уноса для их использования в качестве сорбента // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19, № 6. С. 696-702.
13. Пухов С.А., Киселёва С.П. Вовлечение в хозяйственный оборот золошлаковых отходов тепловых электростанций в интересах эколого-ориентированного развития экономики // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7, № 4. С. 1–10.
14. Бушумов С.А., Короткова Т.Г. Экологически безопасный сорбент из золошлаковых отходов теплоэнергетики // Тонкие химические технологии. 2023. Т. 18, № 5. С. 446–460.
15. Аверина Ю.М., Ветрова М.А., Рыбина Е.О., Чумакова А.А. Методы контроля качества воды // Успехи в химии и химической технологии. 2019. № 3. С. 25–27.
16. Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р., Саяхов Р.И. Очистка обратного осмотического концентрата золошлаковыми отходами ТЭС // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 9. С. 10–15.
17. Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р. Исследование процесса обессоливания концентрата установок обратного осмоса отходом энергетики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 2. С. 186–195.
18. Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В., Т.С. Номоконовой Сорбционная технология очистки сточных и оборотных вод золоотвалов // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 3. С. 35–44.
19. Свешникова Д. А., Сулейманов С. И., Хамизов Р. Х. Кинетика и механизм адсорбции сульфат-ионов на активированном угле КМ-2. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т.21. №4. С. 510-519.

#### Авторы публикации

**Николаева Лариса Андреевна** – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета. ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0002-7200-2318>. Email: [larisanik16@mail.ru](mailto:larisanik16@mail.ru).

**Зайнуллина Элеонора Райнуровна** – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email: [my-elechka@mail.ru](mailto:my-elechka@mail.ru).

**Сафина Гульшат Галлямутдиновна** – канд. хим. наук, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета.

#### References

1. Mikhailova E.S., Popova L.V. Analiz metodov ochistki stochnykh vod ot sul'fatov. *Moskovskii ehkonomicheskii zhurnal*. 2022. № 11(7): 37-38. (In Russ).
2. Zakiya T., Rajalakshmi M. Treatment and Disposal Methods of Concentrate Stream of Seawater Reverse Osmosis: A Review. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2021; 20(4): 1403-1414. doi: 10.46488/NEPT.2021.v20i04.003.
3. Scholes R.C., Vega M.A., Sharp J.O., et al. Nitrate removal from reverse osmosis concentrate in pilot-scale open-water unit process wetlands. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 2021; 7: 650–661. doi: 10.1039/c8ew00456a.
4. Yang Y., Sun Y., Song X., Yu J. Separation of mono- and di-valent ions from seawater reverse osmosis brine using selective electrodialysis. *Environmental Science and Pollution*

Research. 2021; 28. pp. 18754–18767. doi: 10.1007/s11356-022-33 140-3.

5. Xuesong Xu, Lu Lin, Guanyu Ma, et al. Study on the effect of polyethyleneimine coating on membrane selectivity and desalination performance in electrodialysis of reverse osmosis concentrate. *Separation and Purification Technology*. 2018; 207: 396–405. doi: 10.1016/j.seppur.2018.06.070

6. Vysotskii S.P., Pechenoga A.A. Sovershenstvovanie obratnoosmoticheskogo obessolivaniya vody. *Nauchnyi vestnik NIIGD Respirator*. 2020; 2(57): 82–89. (In Russ.)

7. Shavanov N. D., Konovalova N. A., Pankov P. P., Rush E. A. Studying the composition and properties of ash and slag mixtures for the purpose of their utilization in the construction industry. *Actual problems of technosphere safety*. 2022; 134-137. (In Russ.)

8. Dik E.P., Soboleva A.N., Smirnova O.A. Environmental hazard classes of ashes and slags from thermal power stations. *Thermal Engineering*. 2011; 58(6): 506–512. (In Russ.)

9. Aldabergenova S.S., Ibrayeva Zh.T., Niyazbekova R.K., et al. Recycling and use of ash and slag waste. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*. 2024;1(2(14)):440-452. (In Russ.)

10. Afanaseva O.V., Mingaleeva G.R., Dobronravov A.D., Shamsutdinov E.V. Complex use of ash and slag waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(7-8):26-36. (In Russ.)

11. Khagleev E.P. Ash-slag dumps with annual regulation differentiated flows of ash and slag coal power station. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(7-8):21-32. (In Russ.)

12. Fomenko A. I. Kharakteristika mikrosfer zoly unosa dlya ikh ispolzovaniya v kachestve sorbenta. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2019; 19(6): 696-702. (In Russ.)

13. Pukhov S.A., Kiseleva S.P. Vovlechenie v khozyaistvennyi oborot zoloshlakovykh otkhodov teplovykh ehlektrostantsii v interesakh ehkologO-orientirovannogo razvitiya ehkonomiki. *Otkhody i resursy*. 2020; 7(4): 1–10. (In Russ.)

14. Bushumov S.A., Korotkova T.G. Ehkologicheski bezopasnyi sorbent iz zoloshlakovykh otkhodov teploehnergetiki. *Tonkie khimicheskie tekhnologii*. 2023; 18(5): 446–460. (In Russ.)

15. Averina Yu. M., Vetrova M. A., Rybina E. O. Metody kontrolya kachestva vody. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2019; 3: 25-27. (In Russ.)

16. Nikolaeva L., Zainullina E., Saiakhov R. Purification of the Reverse Osmosis Concentrate Using Ash and Dlag Waste from TPP. *Ecology and Industry of Russia*. 2024;28(9):10-15. doi: 10.18412/1816-0395-2024-9-10-15

17. Nikolaeva L.A., Zainullina E.R. Investigation of the process of desalination of the concentrate of reverse osmosis plants by energy waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2): 186-195. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-186-195

18. Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Shumilova L.V., et al Sorption Technology for the Treatment of Waste and Circulating Waters of Ash Dumps. *Transbaikal State University Journal*. 2023; 29(3): 35–44. (In Russ.)

19. Sveshnikova D. A., Suleimanov S. I., Khamizov R. K. The kinetics and mechanism of sulphate ion adsorption on KM-2 activated carbon. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protsessy*, 2021; 21(4): 510-519. (In Russ.)

#### Authors of the publication

**Larisa A. Nikolaeva** – Kazan State Power Engineering University. Email: larisanik16@mail.ru.

**Eleonora R. Zainullina** – Kazan State Power Engineering University. Email: my-elechka@mail.ru.

**Gulshat G. Safina** – Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

**Получено** 16.03.2026 г.

**Отредактировано** 07.04.2026 г.

**Принято** 14.04.2026 г.