

Физико-химические особенности очистки природного и техногенного рассола в производстве кальцинированной соды

Ксения Р. Дубровина	¹	kseniadubrovina98@gmail.com	
Тимур Р. Шакиров	¹	timur.shakirov1993@mail.ru	 0000-0002-1292-3545
Алексей И. Хацринов	¹	khatsrin@mail.ru	 0000-0002-0623-1411
Алсу З. Сулейманова	²	alsu-sulejmanova@ya.ru	
Светлана В. Водопьянова	³	vod-sveta@ya.ru	 0000-0001-5594-2626

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, 68, Казань, Российская Федерация, 420015

Аннотация. Промышленное производство соды в России реализовано аммиачным способом по методу Сольве. Ежегодный выпуск товарного бикорбаната натрия достигает 2 млн т. Основной ключевой стадией производства соды является очистка рассола. Рассмотрены проблемы использования основного сырья в производстве соды. Приведены методики экспериментов. Цель работы заключалась в рассмотрении физико-химических особенностей и процессов очистки хлоридных рассолов техногенного и природного происхождения. При решении поставленных задач использовались следующие методы: химический состав исходных проб и растворов (рассолов) анализировался системой капиллярного электрофореза «Капель-205»; минеральный состав нерастворимого в воде остатка изучался с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Clever C-31 и рентгенографическим количественным фазовым анализом на дифрактометре PowDiX 600 Adwin. По результатам экспериментов получены следующие данные, характеризующие физико-химическое влияние CaSO_4 на очистку техногенного и природного хлоридных рассолов. Содово-каустический метод очистки сырого рассола эффективнее всего проводить при температуре менее 12°C , так как при этой температуре остаточное содержание ионов кальция и магния в рассоле наименьшее. Техногенные рассолы (пластовые воды), содержащие большое количество хлорида натрия, могут служить ценным сырьем для производства кальцинированной соды. Механизм образования твердой фазы представлен образованием и ростом аморфных зародышей вследствие роста по граням кристаллизации. Второй фазой является коагуляция частиц с образованием крупных рыхлых агрегатов. Дальнейшие исследования будут продолжены по исследованию взаимной растворимости системы $\text{CaCO}_3\text{-Mg(OH)}_2\text{-NaCl}$.

Ключевые слова: рассол, пластовая вода, хлорид натрия, каменная соль, соли кальция, соли магния, очистка, кальцинированная сода.

Physico-chemical features of purification of natural and technogenic brine in the production of soda ash

Ksenia R. Dubrovina	¹	kseniadubrovina98@gmail.com	
Timur R. Shakirov	¹	timur.shakirov1993@mail.ru	 0000-0002-1292-3545
Aleksey I. Khatsrinov	¹	khatsrin@mail.ru	 0000-0002-0623-1411
Alsu Z. Suleimanova	²	alsu-sulejmanova@ya.ru	
Svetlana V. Vodopyanova	³	vod-sveta@ya.ru	 0000-0001-5594-2626

¹ Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015

Abstract. Industrial production of soda in Russia is implemented by the ammonia method according to the Solvay method. The annual output of commercial sodium bicarbonate reaches 2 million tons. The main key stage of soda production is brine purification. The article considers the problems and highlights the areas of research. Experimental techniques are presented. The aim of the work was to consider the physicochemical characteristics and processes of purification of chloride brines of technogenic and natural origin. The following methods were used to solve the set problems: the chemical composition of the initial samples and solutions (brines) was analyzed by the Kapel-205 capillary electrophoresis system; the mineral composition of the water-insoluble residue was studied using a Clever C-31 X-ray fluorescence spectrometer and X-ray quantitative phase analysis on a PowDiX 600 Adwin diffractometer. Based on the results of the experiments, the following data were obtained characterizing the physicochemical effect of CaSO_4 on the purification of technogenic and natural chloride brines. The soda-caustic method of purifying raw brine is most effectively carried out at a temperature below 12°C , since at this temperature the residual content of calcium and magnesium ions in the brine is the lowest. Technogenic brines (formation waters) containing a large amount of sodium chloride can serve as a valuable raw material for the production of soda ash. The mechanism of solid phase formation is represented by the formation and growth of amorphous nuclei due to growth along crystallization faces. The second phase is particle coagulation with the formation of large loose aggregates. Further studies will be continued on the study of the mutual solubility of the $\text{CaCO}_3\text{-Mg(OH)}_2\text{-NaCl}$ system.

Keywords: brine, formation water, sodium chloride, rock salt, calcium salts, magnesium salts, purification, soda ash.

Для цитирования

Дубровина К.Р., Шакиров Т.Р., Хацринов А.И., Сулейманова А.З., Водопьянова С.В. Физико-химические особенности очистки природного и техногенного рассола в производстве кальцинированной соды // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 202–209. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-202-209

For citation

Dubrovina K.R., Shakirov T.R., Khatsrinov A.I., Suleymanova A.Z., Vodopyanova S.V. Physico-chemical features of purification of natural and technogenic brine in the production of soda ash. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 202–209. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-202-209

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Кальцинированная сода является многотоннажным продуктом химической промышленности и служит незаменимым сырьем для стекольной, мыловаренной, металлургической и военной промышленности. Кальцинированную соду в основном получают аммиачным способом по методу Сольве.

Однако аммиачный способ производства фактически достиг предела своего технологического совершенствования и, несмотря на ряд достоинств (легкость добычи и дешевизна исходного сырья, непрерывность производственного процесса, высокое качество конечного продукта) характеризуется крупными недостатками: низкое использование исходного сырья (натрия до 70%), большое количество отходов (8–12 м³ жидких и 250 кг твердых отходов на 1 т продукции). Все это усугубляется тем, что аммиачно-содовые заводы относятся к категории экологически вредных предприятий, из-за значительного количества хлор-кальциевых стоков, образующих так называемые «белые моря» и наносящие вред окружающей среде [1–5].

Одним из сырьевых источников получения кальцинированной соды является хлоридный рассол, получаемый скважинным растворением каменной соли. Для содовой промышленности данный способ добычи является экономически более выгодным по сравнению с традиционным получением концентрированных рассолов из твердой каменной соли.

Следует отметить, что запасы «богатой» природной каменной соли истощаются и существует необходимость в поиске альтернативных источников рассолов хлорида натрия.

Крупными сырьевыми источниками техногенных рассолов, содержащих хлорид натрия, являются предприятия нефтехимической отрасли. В процессе добычи нефти попутно извлекаются пластовые воды. Пластовые воды по вещественному составу представлены преимущественно хлоридом натрия с минерализацией от 80 до 300 г/л. Также в её составе могут присутствовать H₂S, Fe₂O₃ и легкие углеводороды. В процессе нефтехимической переработки нефти образуется абгазный HCl. Улавливание и нейтрализацию проводят в щелочном скруббере, при этом образуются стоки хлорида натрия с минерализацией около 280–310 г/л. Валовый ежегодный объем получаемых техногенных рассолов более 3 млн т при добыче и более [6–11].

Таким образом, проблема утилизации многотоннажных техногенных рассолов создает значительную угрозу для окружающей среды ввиду образования стоков и фильтратов,

содержащих хлорид натрия. Таким образом в работе, авторами рассмотрены физико-химические исследования содово-каустического способа очистки природных и техногенных рассолов с целью дальнейшего использования их в производстве кальцинированной соды.

Материалы и методы

Технологические испытания и аналитические исследования проводились на кафедре «Технологии неорганических веществ и материалов» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

В исходных образцах и промежуточных продуктах, рассолах определялось содержание следующих компонентов: нерастворимый остаток, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻. Данные химического состава были рассчитаны на солевой состав согласно методике [4]. Аналитические исследования проводились системой капиллярного электрофореза «Капель-205» и титрованием. Плотность рассолов определяли на плотномере Anton Paar DMA 4501. Твердые водонерастворимые соединения изучались с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Clever C-31 и рентгенографическим количественным фазовым анализом на дифрактометре PowDiX 600 Adwin.

Методика очистки. Рассол очищается от ионов кальция и магния, переводя их в нерастворимые соединения (CaCO₃ и Mg(OH)₂) с добавлением растворов соды и щелочи [8, 13].

В работе проведены исследования по влиянию условий растворения на степень перехода в раствор SO₄²⁻, Ca²⁺. По расчетному количеству для получения сырого рассола, внесли каменную соль и воду. Растворение проводили при 25 °С, продолжительность перемешивания составляла 60 минут. При данных условиях получен сырой рассол плотностью 1,193 г/см³ и общим содержанием NaCl 306 г/л. Рассол анализировался на содержание сульфатов и ионов кальция титриметрическим методом. Количество Ca²⁺ = 0,24%, SO₄²⁻ = 0,81%. Переход CaSO₄ из твердой каменной соли в рассол составил 12,93%.

Коэффициентом перехода можно считать 1,29.

Результаты

В работе изучены следующие объекты исследования: пластовая вода и каменная соль Яр-Бишкадакского месторождения.

По химическому составу исследуемые объекты в качестве основного компонента содержали в своем составе хлорид натрия. Пластовая вода содержит NaCl – 243,54 г/л, CaSO₄ – 17,06 г/л, MgCO₃ – 3,63 г/л, содержание K⁺, Br⁻, Sr²⁺ составляет менее 0,5 г/л. Каменная соль Яр-Бишкадакского месторождения содержала NaCl – 91,15%, CaSO₄ – 8,12%, SiO₂ – 0,73%.

Сырой рассол, полученный скважинным растворением или после нефтедобычи (нефтепереработки), содержит вредные примеси солей кальция и магния. Данные соединения приводят к загрязнению целевого продукта и уменьшению степени конверсии гидрокарбоната натрия. Вследствие жестких требований по составу уделено особое внимание к чистоте рассола,

регламентирующего содержание ионов по ТУ 2152–008–00204872–2012 (таблица 1).

Очистка рассола хлорида натрия от примесей описывается системой $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ в зависимости от температуры [4, 8]. Фазовая диаграмма системы построена в диапазоне температур $-30 \div 100^\circ\text{C}$ (рисунок 1).

Таблица 1.

Физико-химические показатели рассолов каменной соли

Table 1.

Physicochemical parameters of rock salt brines

Рассол Brine	Рассол сырой Raw brine	Рассол очищенный Purified brine
Массовая концентрация Mass concentration		
Хлоридов в пересчете на NaCl , г/дм ³ , не менее Chlorides in terms of NaCl , g/dm ³ , not less than	306,00	302,00
Суммы кальция и магния в пересчете на Ca^{2+} , г/дм ³ , не более Calcium and magnesium amounts in terms of Ca^{2+} , g/dm ³ , not more than	–	0,07
Кальция в пересчете на Ca^{2+} , г/дм ³ , не более Calcium in terms of Ca^{2+} , g/dm ³ , not more than	1,50	–
Магния в пересчете на Mg^{2+} , г/дм ³ , не более Magnesium in terms of Mg^{2+} , g/dm ³ , not more than	0,30	–
Углекислого натрия, г/дм ³ , не более Sodium carbonate, g/dm ³ , not more than	–	0,80
Сульфатов в пересчете на SO_4^{2-} , г/дм ³ , не более Sulfates in terms of SO_4^{2-} , g/dm ³ , not more than	4,00	4,00
Аммиака в пересчете на NH_4^+ , г/дм ³ , не более Ammonia in terms of NH_4^+ , g/dm ³ , not more than	5,00	5,00

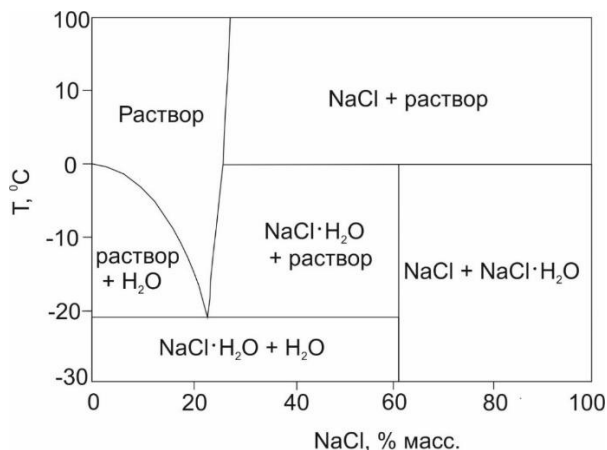


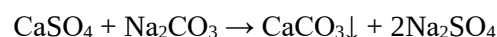
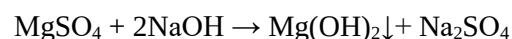
Рисунок 1. Диаграмма растворимости NaCl в зависимости от температуры и его массового содержания в рассоле

Figure 1. Diagram of NaCl solubility depending on temperature and its mass content in brine

Свойства хлорида натрия зависят от температуры, имеющее значение при технологических расчетах. Особый интерес представляют термическое расширение и изотермическое сжатие NaCl . При нагревании из-за ангармоничности тепловых колебаний ионов Na^+ и Cl^-

в кристаллической решетке хлорида натрия происходит увеличение среднего равновесного расстояния между частицами, что приводит к заметному возрастанию линейных размеров и общего объема кристалла.

Очистку сырого рассола от ионов кальция и магния проводили содово-каустическим «мокрым» методом.



Осадки карбоната кальция и гидроксида магния отделяются от рассола с помощью осаждения и фильтрации, а также удаляются другие механические примеси.

На стадии рассолоочистки температуру рассола поддерживают не выше 22°C .

Результаты влияния температуры на остаточное содержание ионов кальция и магния в рассоле, полученном из пластовых вод нефтяных месторождений, во время процесса очистки, представлены в таблице 2 и показывают следующее: присутствует незначительное содержание ионов кальция и магния, а также сульфат ионов.

Таблица 2.

Влияние температуры на процесс получения очищенного рассола

Table 2.

The influence of temperature on the process of obtaining purified brine

Температура, °C Temperature, °C	Рассол техногенный Technogenic brine				Рассол природный Natural brine			
	Ca ²⁺ , %		Mg ²⁺ , %		Ca ²⁺ , %		Mg ²⁺ , %	
	до before	после after	до before	после after	до before	после after	до before	после after
12	2,81	0,020	0,65	*	0,79	*	0,17	*
20		0,021		0,011		0,007		*
45		0,043		0,014		0,009		0,001
75		0,064		0,026		0,019		0,001

Примечание: * – ион не обнаружен, значение ниже порога обнаружения

Note: * – ion not detected, value below detection threshold

Сопоставление остаточного содержания ионов кальция и магния в рассоле при различных температурах показывает, что температура ниже 20 °C значительно влияет на процесс очистки. При температуре 12 °C содержание ионов кальция уменьшается с 2,81 до 0,02%, а ионов магния – с 0,65 до 0% (таблица 2).

Эффективность очистки указывает на то, что более низкие температуры могут способствовать более эффективному удалению ионов кальция и магния из рассола.

Для получения сырого рассола из каменной соли использовались различные соотношения Т:Ж. Растворение пробы в дистиллированной воде проводили в течении одного часа при постоянном перемешивании при комнатной температуре. Затем полученную суспензию отфильтровали от нерастворимого остатка.

Как видно из таблицы 3, чтобы максимально извлечь в раствор хлорид натрия, необходимо поддерживать соотношение Т:Ж = 1:2,5. При данном соотношении в рассоле

Таблица 3.

Влияние Т:Ж на химический состав полученного рассола

Table 3.

The effect of T:F on the chemical composition of the resulting brine

Т:Ж	Плотность, г/см ³ Density	Состав жидкой фазы, г/л Состав жидкой фазы, г/л				
		Na ⁺	Cl ⁻	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻
1:2,0	1,19458	89,5	144,0	2,3	0,2	2,3
1:2,5	1,19678	96,6	152,9	2,4	0,2	2,2
1:2,8	1,18187	89,6	144,0	2,0	0,2	2,7

Очистку рассола, полученного из каменной соли, проводили различными методами. Результаты очистки рассола представлены в таблице 4, которые позволяют оценить эффективность методов очистки.

Очистка рассола может проводиться с использованием различных методов, включая содово-каустический и содово-известковый.

Таблица 4.

Очистка рассола от солей кальция и магния

Table 4.

Purification of brine from calcium and magnesium salts

Метод очистки Purify method	Плотность рассола, г/см ³ Brine density	Ca ²⁺ , %	Mg ²⁺ , %	SO ₄ ²⁻ , %
Содово-каустический Soda-caustic	1,1912	0,016	0	0,21
Содово-известковый Soda-lime	1,1960	0,018	0	0,22

Каменная соль на большинстве месторождений содержит примеси ангидрита в виде сульфата кальция. Во время добычи каменной соли в рассол хлорида натрия переходит сульфат кальция.

Переход сульфата кальция из твердой каменной соли в рассол имеет прямую зависимость от плотности рассола. На рисунке 2 представлена растворимость сульфата кальция в растворах хлорида натрия при 25 °C.

Наименьшее содержание CaSO₄ отмечено в производном рассоле с концентрацией более 280 г/л.

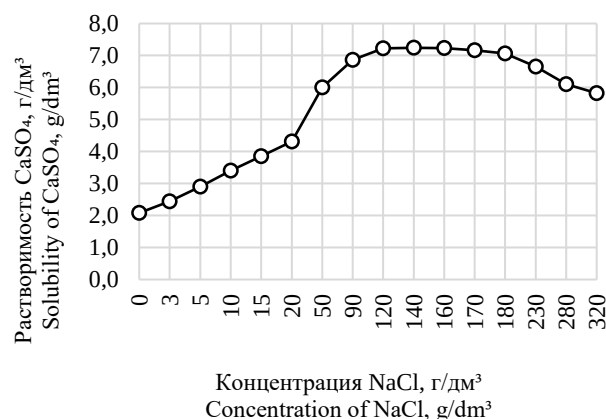


Рисунок 2. Растворимость сульфата кальция в растворах хлорида натрия при 25 °C

Figure 2. Solubility of calcium sulfate in sodium chloride solutions at 25 °C

Переход сульфата кальция можно предотвратить на стадии добычи рассола, путем добавления в раствор выщелачивания – соды. Ввод соды в раствор выщелачивания составил 0,4%. При данной концентрации переход иона кальция в раствор практически не происходит, содержание менее 0,01%.

Обсуждение

Проводится детальный анализ полученных данных в сопоставлении с данными литературы, что служит обоснованием выводов и заключений авторов.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных экспериментов получены данные, характеризующие физико-химическое влияние на очистку техногенного и природного рассола.

Содово-каустический метод очистки наиболее эффективен при температуре 12°C, что приводит к минимальному остаточному содержанию ионов кальция и магния в рассоле.

Техногенные рассолы с высоким содержанием хлорида натрия могут быть использованы как

сырье для производства кальцинированной соды, что подчеркивает их экономическую ценность.

Перемешивание рассола способствует интенсификации процесса кристаллизации и повышению эффективности очистки, создавая турбулентную диффузию и уменьшая расклинивающее давление.

Образование и рост аморфных зародышей, а также коагуляция частиц приводят к образованию крупных рыхлых агрегатов, что важно для понимания процесса очистки.

Намечены дальнейшие исследования по взаимной растворимости системы $\text{CaCO}_3\text{-Mg(OH)}_2\text{-NaCl}$, что может привести к более глубокому пониманию процессов, происходящих в системе.

Благодарности

Авторы выражают благодарность всему коллективу кафедры Технологии неорганических веществ и материалов ФГБОУ ВО «КНИТУ» за выполненные аналитические исследования по работе.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института нефти, химии и нанотехнологии ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Литература

- 1 Мартынов М.М. Метод определения химического состава // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2023. Т. 66. Вып. 5. С. 123–125. doi: 10.6060/2012.01.01
- 2 Загидуллин Р.Н., Сабитов К.Б., Мухаметов А.А. Перспективы развития производства кальцинированной соды по малоотходной технологии // Химическая промышленность. 2013. № 5. С. 7–12.
- 3 Молчанов В.И., Панасенко В.А., Марков Н.В. и др. Термодинамика процесса карбонизации в содовом производстве // Труды НИОХИМ. Харьков, 2001. Т. 72. С. 10–21.
- 4 Фурман А.А., Шрайбман С.С. Приготовление и очистка рассола. М.: Химия, 1966. 232 с.
- 5 Сироткин О.С., Сироткин Р.О. Химия. Учебник. М.: КНОРУС, 2023. 364 с.
- 6 Куленцан А.Л., Марчук Н.А. Анализ основных видов продукции химического производства // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2019. Т. 62. Вып. 11. С. 156–160. doi: 10.6060/ivkkt.20196211.6106
- 7 Колпакова Н.С. Оценка деятельности химических корпораций на рынке кальцинированной соды России // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2021. Т. 10. № 4. С. 48–52.
- 8 Ахметов Т.Г., Ахметова Р.Т., Гайсин Л.Г. Химическая технология неорганических веществ. Кн. 1. СПб.: Лань, 2021. 688 с.
- 9 Шатов А.А. Производство кальцинированной соды – от прошлых к новым технологиям // Научное обозрение. Фундаментальные и прикладные исследования. 2017. № 1. С. 3–43.
- 10 Лановецкий С.В., Нисина О.Е., Косвинцев О.К. Разработка технологии получения рассолов хлорида натрия из галитовых отходов // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. Вып. 1. С. 74–82. doi: 10.6060/ivkkt.20246701.6909
- 11 Шугаев И.Р., Кудашева И.А. Оптимизация технологии получения хлористого натрия из отхода производства кальцинированной соды // Современные технологии в образовании и промышленности: от теории к практике: сб. материалов II внутривуз. науч.-практ. конф. (Стерлитамак, 25 апреля 2018 г.). Уфа: Полиграфия, 2018. С. 42–44.
- 12 Касьянов В.К., Аверина Ю.М., Меньшиков В.В. и др. Методы переработки дистиллерной жидкости как отхода производства кальцинированной соды аммиачным способом // Sciences of Europe. 2018. № 8-1(28). С. 12–15.
- 13 Ахметов Т.Г., Ахметова Р.Т., Гайсин Л.Г. Химическая технология неорганических веществ. Кн. 2. СПб.: Лань, 2021. 536 с.
- 14 Chu F., Jon Ch., Yang L., Du X. CO2 absorption characteristics in ammonia solution inside the structured packed column // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. Vol. 55. № 12. P. 3696–3709. doi: 10.1021/acs.iecr.5b03614
- 15 Старкова А.В., Махоткин А.Ф. Гетерогенные процессы хемосорбции аммиака и диоксида углерода водными растворами аммиака // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25. № 6. С. 38–43. doi: 10.55421/1998-7072_2022_25_6_38

- 16 Нисина О.Е., Лановецкий С.В., Косвинцев О.К. и др. Исследование процесса извлечения примеси сульфата кальция из галитовых отходов различного происхождения // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. Вып. 4. С. 101–107. doi: 10.6060/ivkkt.20226504.6483
- 17 Поварова Л.В. Анализ методов очистки нефтесодержащих сточных вод // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2018. № 1. С. 189–205.
- 18 Кольцов В.Б., Кондратьева О.В. Очистные сооружения. В 2 ч. Ч. 2: учебник и практикум. М.: Юрайт, 2016. 314 с.
- 19 Жусупова Л.А., Тимурлан А. Методы очистки сточных вод от нефтепродуктов // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 5-9(25). С. 123–129.
- 20 Навесов Ш., Еримбетова А., Изтлеуов Г. и др. Исследование процесса фильтрования сточных вод машиностроительного производства // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 1-3(21). С. 138–142.
- 21 Usmani M.A., Khan I., Bhat A.H. et al. Current trend in the application of nanoparticles for waste water treatment and purification: a review // Current Organic Synthesis. 2017. Vol. 14. № 2. P. 206–226.
- 22 Sannino D., Vaiano V., Rizzo L. Progress in nanomaterials applications for water purifications // Nanotechnologies for Environmental Remediation: Applications and Implications. 2017. P. 1–24.
- 23 Banerjee S., Gautam R.K., Gautam P.K. et al. Recent trends and wastewater treatment: nanotechnological approach for water purification // Materials Science and Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. 2017. P. 1745–1779.
- 24 Тюрина Е.В. Технология очистки сточных вод на нефтяных промыслах // Наследие И.М. Губкина: интеграция образования, науки и практики в нефтегазовой сфере: мат. междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. С.Г. Горшенина. Саратов: Амирит, 2018. С. 231–235.
- 25 Реховская Е.О., Нагибина И.Ю., Студенкова А.К. и др. Совершенствование технологической схемы очистки сточной воды от нефтепродуктов на предприятии теплоэнергетики // Актуальные вопросы энергетики. 2021. Т. 3. № 1. С. 135–140.
- 26 Дубровина К.Р., Шакиров Т.Р., Сулейманова А.З. и др. Возможность возвращения в цикл улавливания хлороводорода каустической содой концентрированием его и полного выделения товарного хлорида натрия // Вестник технологического университета. 2024. Т. 27. Вып. 8. С. 82–86. doi: 10.55421/1998-7072_2024_27_8_82
- 27 Нажарова Л.Н., Шакиров Т.Р. Особенности растворения каменной соли месторождений Российской Федерации // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. Вып. 9. С. 51–55.
- 28 Хацринов А.И., Дубровина К.Р., Хакимова З.М. и др. Технология очистки пластовой воды в лабораторных условиях для производства соды // Вестник технологического университета. 2023. Т. 26. Вып. 12. С. 103–106. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_12_103
- 29 Полосеева О.А. Физико-химические методы исследования и техника лабораторных работ. СПб.: Лань, 2023. 108 с.
- 30 Стоянова А.Д., Конькова Т.В. Физико-химические основы технологии обезвреживания жидких техногенных отходов: учеб. пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 228 с.
- 31 Нисина О.Е., Лановецкий С.В., Косвинцев О.К. и др. Исследование процесса извлечения примеси сульфата кальция из галитовых отходов различного происхождения // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. № 4. С. 101–107.
- 32 Bilginer A., Canbek O., Turhan Erdoğan S. Activation of blast furnace slag with soda production waste // Journal of Materials in Civil Engineering. 2020. Vol. 32. № 1. 04019316. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002987
- 33 Khajuria A., Atienza V.A., Chavanich S. et al. Accelerating circular economy solutions to achieve the 2030 agenda for sustainable development goals // Circular Economy. 2022. Vol. 1. № 1. 100001. doi: 10.1016/j.cec.2022.100001

References

- 1 Martynov M.M. Method for Determining Chemical Composition. Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical Technology. 2023. vol. 66. no. 5. pp. 123–125. doi:10.6060/2012.01.01
- 2 Zagidullin R.N., Sabitov K.B., Mukhametov A.A. Prospects for the Development of Soda Ash Production Using Low-Waste Technology. Chemical Industry. 2013. no. 5. pp. 7–12. (in Russian)
- 3 Molchanov V.I., Panasenkov V.A., Markov N.V. et al. Thermodynamics of the Carbonation Process in Soda Production. Kharkov: NIOKHIM, 2001. vol. 72. pp. 10–21. (in Russian)
- 4 Furman A.A., Shraibman S.S. Preparation and purification of brine. Moscow: Chemistry, 1966. 232 p. (in Russian)
- 5 Sirotkin O.S., Sirotkin R.O. Chemistry. Textbook. Moscow: KNORUS, 2023. 364 p. (in Russian)
- 6 Kulenzan A.L., Marchuk N.A. Analysis of the main types of chemical production products. News of Universities. Chemistry and Chemical Technology. 2019. vol. 62. no. 11. pp. 156–160. doi:10.6060/ivkkt.20196211.6106 (in Russian)
- 7 Kolpakova N.S. Assessment of the activities of chemical corporations in the soda ash market of Russia. Bulletin of the Siberian Institute of Business and Information Technology. 2021. vol. 10. no. 4. pp. 48–52. (in Russian)
- 8 Akhmetov T.G., Akhmetova R.T., Gaisin L.G. Chemical technology of inorganic substances. Book 1. St. Petersburg: Lan, 2021. 688 p. (in Russian)
- 9 Shatov A.A. Production of soda ash: from past to new technologies Scientific review. Fundamental and applied research. 2017. no. 1. pp. 3–43. (in Russian)

- 10 Lanovetsky S.V., Nishina O.E., Kosvintsev O.K. Development of technology for producing sodium chloride brines from halite waste. *News of universities. Chemistry and chemical technology*. 2024. vol. 67. no. 1. pp. 74–82. doi:10.6060/ivkkt.20246701.6909 (in Russian)
- 11 Shugaepov I.R., Kudasheva I.A. Optimization of the technology for obtaining sodium chloride from soda ash production waste. *Modern technologies in education and industry: from theory to practice: collection of materials of the II intra-university scientific and practical conference (Sterlitamak, April 25, 2018)*. Ufa: Publishing house of OOO "Polygraphy", 2018. pp. 42–44. (in Russian)
- 12 Kasyanov V.K., Averina Yu.M., Menshikov V.V., Strelnikova A.S. Methods for processing distillate liquid as a waste from soda ash production by the ammonia method. *Sciences of Europe*. 2018. no. 8-1(28). pp. 12–15. (in Russian)
- 13 Akhmetov T.G., Akhmetova R.T., Gaisin L.G. *Chemical technology of inorganic substances. Book 2*. St. Petersburg: Lan, 2021. 536 p. (in Russian)
- 14 Chu F., Jon Ch., Yang L., Du X. CO₂ absorption characteristics in ammonia solution inside the structured packed column. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016. vol. 55. no. 12. pp. 3696–3709. doi: 10.1021/acs.iecr.5b03614
- 15 Starkova A.V., Makhotkin A.F. Heterogeneous processes of ammonia and carbon dioxide chemisorption by aqueous ammonia solutions. *Bulletin of the Technological University*. 2022. vol. 25. no. 6. pp. 38–43. doi: 10.55421/1998-7072_2022_25_6_38 (in Russian)
- 16 Nishina O.E., Lanovetskiy S.V., Kosvintsev O.K., Kulikov M.A. Study of the process of extracting calcium sulfate impurity from halite waste of various origins. *News of universities. Chemistry and chemical technology*. 2022. vol. 65. no. 4. pp. 101–107. doi: 10.6060/ivkkt.20226504.6483 (in Russian)
- 17 Povarova L.V. Analysis of methods for treating oil-containing wastewater. *Science. Technology. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2018. no. 1. pp. 189–205. (in Russian)
- 18 Koltsov V.B., Kondratieva O.V. *Treatment facilities in 2 parts. Part 2. Textbook and practical course*. Moscow: Yurait Publishing House, 2016. 314 p. (in Russian)
- 19 Zhusupova L.A., Timurlan A. Methods of wastewater treatment from oil products. *Current scientific research in the modern world*. 2017. no. 5-9(25). pp. 123–129. (in Russian)
- 20 Navesov Sh., Erimbetova A., Izileuov G., Baibatyrova B. et al. Investigation of the process of filtering wastewater from mechanical engineering production. *Current scientific research in the modern world*. 2017. no. 1-3(21). pp. 138–142. (in Russian)
- 21 Usmani M.A., Khan I., Bhat A.H., Pillai R.S., Ahmad N., Mohamad Haafiz M.K., Oves M. Current trend in the application of nanoparticles for waste water treatment and purification: a review. *Current Organic Synthesis*. 2017. vol. 14. no. 2. pp. 206–226. doi:10.2174/1570179413666161229151830
- 22 Sannino D., Vaiano V., Rizzo L. Progress in nanomaterials applications for water purifications. *Nanotechnologies for Environmental Remediation: Applications and Implications*. 2017. pp. 1–24. doi:10.1007/978-3-319-53162-5_1
- 23 Banerjee S., Gautam R.K., Gautam P.K., Jaiswal A., Chattopadhyaya M.C. Recent trends and wastewater treatment: nanotechnological approach for water purification. *Materials Science and Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. 2017. pp. 1745–1779. doi:10.4018/978-1-5225-1798-6.ch069
- 24 Tyurina E.V. Technology for wastewater treatment in oil fields. In: *Heritage of I.M. Gubkin: integration of education, science and practice in the oil and gas sector. Materials of the international scientific and practical conference*. Ed. by S.G. Gorshenin. Saratov: OOO "Amirit", 2018. pp. 231–235. (in Russian)
- 25 Rekhovskaya E.O., Nagibina I.Yu., Studenkova A.K. et al. Improvement of the technological scheme for wastewater treatment from oil products at a thermal power enterprise. *Current issues of energy*. 2021. vol. 3. no. 1. pp. 135–140. (in Russian)
- 26 Dubrovina K.R., Shakirov T.R., Suleymanova A.Z., Khatsrinov A.I. Possibility of returning to the hydrogen chloride capture cycle with caustic soda by concentrating it and completely isolating commercial sodium chloride. *Bulletin of the Technological University*. 2024. vol. 27. no. 8. pp. 82–86. doi:10.55421/1998-7072_2024_27_8_82 (in Russian)
- 27 Nazharova L.N., Shakirov T.R. Features of rock salt dissolution from deposits of the Russian Federation. *Bulletin of the Technological University*. 2020. vol. 23. no. 9. pp. 51–55. (in Russian)
- 28 Khatsrinov A.I., Dubrovina K.R., Khakimova Z.M., Suleymanova A.Z., Vodopyanova S.V. Technology for purification of formation water in laboratory conditions for soda production. *Bulletin of the Technological University*. 2023. vol. 26. no. 12. pp. 103–106. doi:10.55421/1998-7072_2023_26_12_103 (in Russian)
- 29 Polomeeva O.A. *Physico-chemical research methods and laboratory work techniques*. St. Petersburg: Lan, 2023. 108 p. (in Russian)
- 30 Stoyanova A.D., Konkova T.V. *Physico-chemical foundations of the technology for neutralizing liquid man-made waste. Textbook*. Vologda: Infra-Engineering, 2023. 228 p. (in Russian)
- 31 Nishina O.E., Lanovetsky S.V., Kosvintsev O.K. et al. Study of the process of extracting calcium sulfate impurity from halite waste of various origins. *News of universities. Chemistry and chemical technology*. 2022. vol. 65. no. 4. pp. 101–107. doi:10.6060/ivkkt.20226504.6483 (in Russian)
- 32 Bilginer A., Canbek O., Turhan Erdoğan S. Activation of blast furnace slag with soda production waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020. vol. 32. no. 1. p. 04019316. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002987
- 33 Khajuria A., Atienza V.A., Chavanich S. et al. Accelerating circular economy solutions to achieve the 2030 agenda for sustainable development goals. *Circular Economy*. 2022. vol. 1. no. 1. p. 100001. doi: 10.1016/j.cec.2022.100001

Сведения об авторах

Ксения Р. Дубровина ассистент, аспирант, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, kseniadubrovina98@gmail.com

Тимур Р. Шакиров к.т.н., доцент, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, timur.shakirov1993@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1292-3545>

Алексей И. Хацрин д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, khatsrin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0623-1411>

Алсу З. Сулейманова заведующая лабораторией, старший преподаватель, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, alsu-sulejmanova@ya.ru

Светлана В. Водопьянова к.х.н., доцент, кафедра технологии неорганических веществ и материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса, 68, 420015, Россия, vod-sveta@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5594-2626>

Вклад авторов

обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Ksenia R. Dubrovina assistant, postgraduate student, technology of in-organic substances and materials department, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, kseniadubrovina98@gmail.com

Timur R. Shakirov Cand. Sci. (Tech.), associate professor, technology of in-organic substances and materials department, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, timur.shakirov1993@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1292-3545>

Aleksey I. Khatsrinov Doc. Sci. (Tech.), professor, head of department, technology of in-organic substances and materials department, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, khatsrin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0623-1411>

Alsu Z. Suleimanova head of laboratory, senior lecturer, technology of in-organic substances and materials department, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, alsu-sulejmanova@ya.ru

Svetlana V. Vodopyanova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, Department of technology of in-organic substances and materials, Kazan national research technological university, Karl Marx, 68, Kazan, Russian Federation, 420015, vod-sveta@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5594-2626>

Contribution

review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2025	После редакции 18/04/2025	Принята в печать 20/04/2026
Received 01/03/2025	Accepted in revised 18/04/2025	Accepted 20/04/2026