



Утилизация и биodeградация отходов

УДК 544.723

DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28012

Утилизация рассолов с использованием жидкого стекла

**В. В. Миронов¹, Л. А. Пимнева¹, Ю. А. Иванюшин¹✉,
Н. О. Азаранин², Е. Д. Миронова¹**

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия,
e-mail: ivanjushinja@tyuiu.ru

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Поступила в редакцию: 30.05.2025 г.; после доработки: 06.06.2025 г.; принята в печать: 09.06.2025 г.

Аннотация – Высококонцентрированные солевые растворы (рассолы), образующиеся при добыче полезных ископаемых, опреснении морской воды и в промышленных процессах, представляют серьёзную экологическую проблему. Традиционные методы утилизации, такие как сброс в водоёмы или закачка в подземные пласты, являются дорогостоящими и экологически небезопасными. В связи с этим, актуальным становится поиск альтернативных способов переработки рассолов с получением полезных продуктов. В работе исследуется возможность утилизации рассолов с использованием жидкого стекла (силикатов натрия и калия) и изучение свойств образующихся продуктов реакции. Для проведения экспериментов использовались растворы жидкого стекла с различными модулями. Рассол пропускали через слой жидкого стекла, что приводило к образованию гелеобразных хлопьев. Твёрдую фазу отделяли от жидкой, после чего анализировали её состав электронной микроскопией и дифракцией. Также изучались процессы гидролиза, полимеризации и формирования пористых структур. Установлено, что при взаимодействии жидкого стекла с рассолами образуются малорастворимые силикатные материалы с развитой пористой структурой. Эти материалы демонстрируют высокую адсорбционную способность по отношению к ионам NaCl и другим примесям. Показано, что свойства образующихся продуктов зависят от типа силиката (натриевый или калиевый), его концентрации и условий проведения реакции. Полученные твёрдые фазы могут быть использованы в строительной индустрии. Исследование подтверждает научную новизну предложенного метода утилизации рассолов, который позволяет не только снизить экологическую нагрузку, но и получить полезные материалы. Результаты работы открывают перспективы для практического применения силикатных продуктов образующихся в результате обработки рассолов жидким стеклом в промышленности.

Ключевые слова: утилизация рассолов, жидкое стекло, силикаты натрия, силикаты калия, высококонцентрированные солевые растворы, адсорбция, экологическая безопасность, строительные материалы.

Utilization and biodegradation of wastes

UDC 544.723

DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28012

Utilization of brines using liquid glass

**Victor V. Mironov¹, Ludmila A. Pimneva¹, Yuriy A. Ivanyushin¹✉,
Nikita O. Azarapin², and Ekaterina D. Mironova²**

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: ivanjushinja@tyuiu.ru

²University of Tyumen, Tyumen, Russia

Received: May 30, 2025; Revised: June 6, 2025; Accepted: June 9, 2025

Abstract – Highly concentrated salt solutions (brines) formed during mining, seawater desalination and industrial processes pose a serious environmental problem. Traditional disposal methods, such as discharge into water bodies or injection into underground formations, are expensive and environmentally unsafe. In this regard, the search for alternative methods of processing brines to obtain useful products is becoming relevant. The paper examines the possibility of utilizing brines using liquid glass (sodium and potassium silicates) and studying the properties of the resulting reaction products. Liquid glass solutions with different moduli were used for the experiments. The brine was passed through a layer of liquid glass, which led to the formation of gel-like flakes. The solid phase was separated from the liquid, after which its composition was analyzed using electron microscopy and diffraction. The processes of hydrolysis, polymerization and formation of porous structures were also studied. It has been established that the interaction of liquid glass with brines results in the formation of poorly soluble silicate materials with a developed porous structure. These materials demonstrate high adsorption capacity with respect to NaCl ions and other impurities. It has been shown that the properties of the resulting products depend on the type of silicate (sodium or potassium), its concentration and reaction conditions. The resulting solid phases can be used in the construction industry. The study confirms the scientific novelty of the proposed method for the utilization of brines, which allows not only to reduce the environmental load, but also to obtain useful materials. The results of the work open up prospects for the practical application of silicate products formed as a result of brine treatment with liquid glass in industry.

Keywords: brine disposal, liquid glass, sodium silicates, potassium silicates, highly concentrated salt solutions, adsorption, environmental safety, building materials.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует несколько способов утилизации высококонцентрированных водных солевых растворов (рассолов), которые образуются при добыче минеральных удобрений и в результате опреснения морской воды. Ошибки в утилизации рассолов могут иметь серьёзные экологические последствия. Помимо рассолов, образующихся при опреснении морской воды (в целом по миру¹, более 130 млн м³ в сутки), наличие высококонцентрированных рассолов характерно для технологических процессов в текстильной, нефтяной и газовой промышленности, сельском хозяйстве, пищевой, молочной, фармацевтической, кожевенной промышленности и других сферах хозяйственной деятельности [1, 2].

¹ Это минимальная общемировая оценка, основанная на консервативном соотношении образующихся объемов рассолов и пресной воды, а также текущей мощности опреснительных заводов и установок. Фактические объемы могут быть выше. Годовой объем рассолов от опреснения морской воды продолжает возрастать, исходя из ввода в эксплуатацию новых мощностей, и по данным последних комплексных исследований достигает 142 км³/год.

Самый простой, но экологически небезопасный способ утилизации рассолов, это сброс его в естественные акватории (реки, озера, моря). При долговременном сбросе высококонцентрированных рассолов (с соленостью в 1,5...2 раза выше морской воды акватории), в морях будет наблюдаться увеличение фоновых концентраций, негативно влияющих на морскую флору и фауну.

Дополнительно, в рассолах могут содержаться остатки различных химических веществ: антискаланта (полифосфаты, фосфонаты и поликарбоновые кислоты), флокулянты (катионные полимеры) и коагулянты (FeCl_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), образующиеся на отдельных стадиях процесса опреснения, которые могут быть особенно опасны для морских организмов.

В этой связи следует отметить, что существуют также более щадящие способы сброса рассолов в акватории, не приводящие к значительному ущербу для окружающей среды, например, способ рассредоточенного сброса рассола, позволяющего снизить вредную концентрацию рассола в воде [3]. Другой способ утилизации рассолов предполагает закачку его в подземные соленые водяные пласты, а также пласты месторождений полезных ископаемых [4–6]. Этот способ очень капиталоемкий и экологически небезвредный, так как при закачке рассолов в подземные водяные пласты рассол может попадать в пресные водоносные горизонты и носить ущерб пресным водным ресурсам. Самым дорогим и энергоемким способом утилизации рассолов является выпаривание соли из раствора с получением поваренной и других солей [7]. Плюсом этого способа является получение конечного товарного продукта, соли. В представленной статье рассматривается возможность утилизации рассолов с использованием жидкого стекла и получением в результате реакции полезных продуктов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

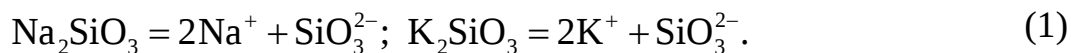
Рассолы представляют собой отходы, которые образуются при добыче минеральных удобрений, в нефтегазовой промышленности и при опреснении морской воды. Для уменьшения концентрации хлорида натрия в рассоле использовали силикаты натрия Na_2SiO_3 и калия K_2SiO_3 . Силикаты натрия и калия соли кремневой кислоты, называемые жидким стеклом (ЖС), растворимы в воде и обладают клеящей способностью. Силикатный модуль этих солей – это соотношение оксида натрия или калия к диоксиду кремния. Молярное соотношение $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ (М – Na, K) составляет 2,6:3,5 при содержании SiO_2 69:76% мас. для силиката натрия и 65:69% мас. для силиката калия. Свойства растворов щелочных силикатов зависят от молярного соотношения $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$, вида катиона и pH. Удельный вес жидкого стекла составляет 1,45 г/см³. В составе растворов жидкого стекла в малых количествах могут находиться оксиды железа, алюминия, меди, свинца и цинка.

Изначально готовился рассол заданной концентрации соли (NaCl). Далее в рассол добавляли ЖС. На поверхности образовывались малорастворимые гелеобразные хлопья. Твердую фазу отделяли от жидкой. В жидкой фазе определяли концентрацию соли.

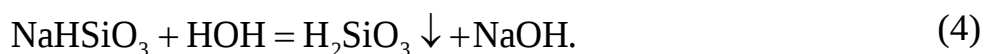
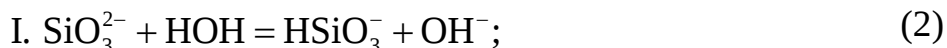
Жидкое стекло способно самопроизвольно отвердевать с образованием искусственного силикатного камня.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При добавлении жидкого стекла в водные рассолы выпадает осадок белого цвета. Силикаты натрия и калия при растворении в воде способны диссоциировать и гидролизироваться:



Гидролиз этих солей протекает в две ступени:



В результате гидролиза образуются ортокремневая кислота, малорастворимая в воде, и гидроксиды натрия и калия, которые дают щелочную среду. При увеличении концентрации жидкого стекла возрастает вязкость. Зависимость вязкости при разбавлении представлена на рисунке 1.

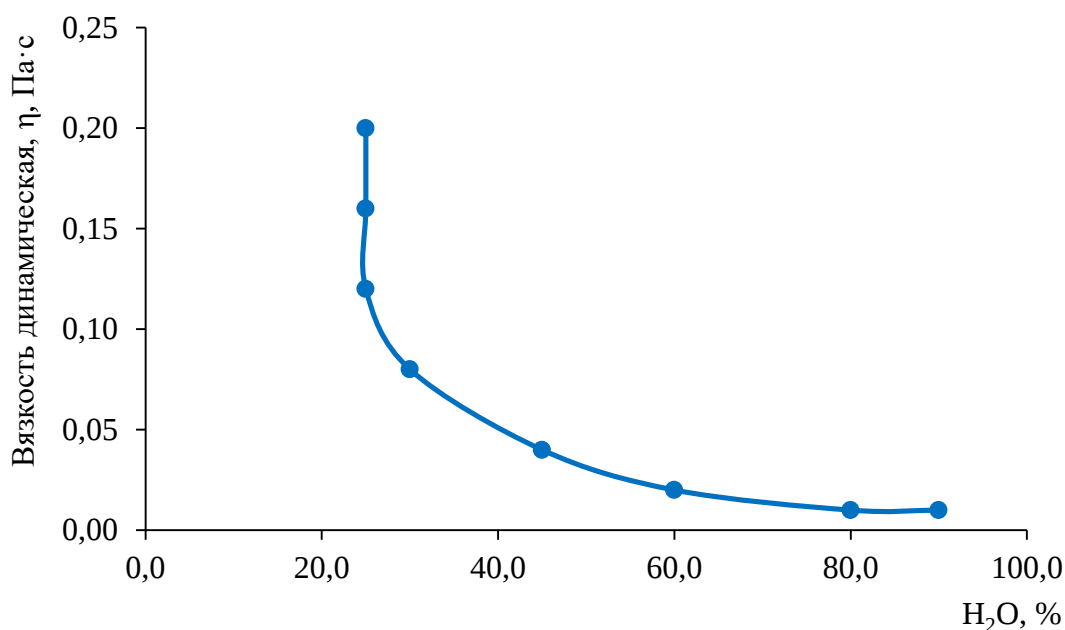


Рис. 1. Зависимость вязкости от концентрации жидкого стекла.

Fig. 1. Dependence of viscosity on the concentration of liquid glass.

Увеличение модуля жидкого стекла приводит к возрастанию доли высокополимерных форм: β -SiO₂ и γ -SiO₂: до 4% – у силиката натрия, до 11% – у силиката калия, которые являются коллоидными частицами в виде золя [8, 9]. β - и γ -формы диоксидов кремния представляют собой разные кристаллографические структуры с различающимися свойствами и областью применения. β -SiO₂ является более стабильным соединением при высоких температурах, а соединение γ -SiO₂ стабильно при пониженных температурах.

Растворимость ортокремневой кислоты в воде зависит от pH, температуры и химического состава воды. Максимальная растворимость в воде при pH 7,0...8,0 и температуре 25°C составляет 100...200 мг/л. Кислота диссоциирует при pH 9,0 с образованием анионов $(\text{HO})_3\text{SiO}^-$, при pH 9,0...11,0 – $(\text{OH})_2\text{SiO}_2^{2-}$ [9, 10]. При увеличении концентрации кремния в зависимости от солевого состава раствора происходит дальнейшая конденсация с формированием цепочек кислоты переменного состава.

Микроскопические исследования показывают образование агрегатов частиц (рис. 2). Образцы твердой фазы состоят из ограненных частиц силикатов натрия с размерами от 10...50 мкм и калия от 1...10 мкм.

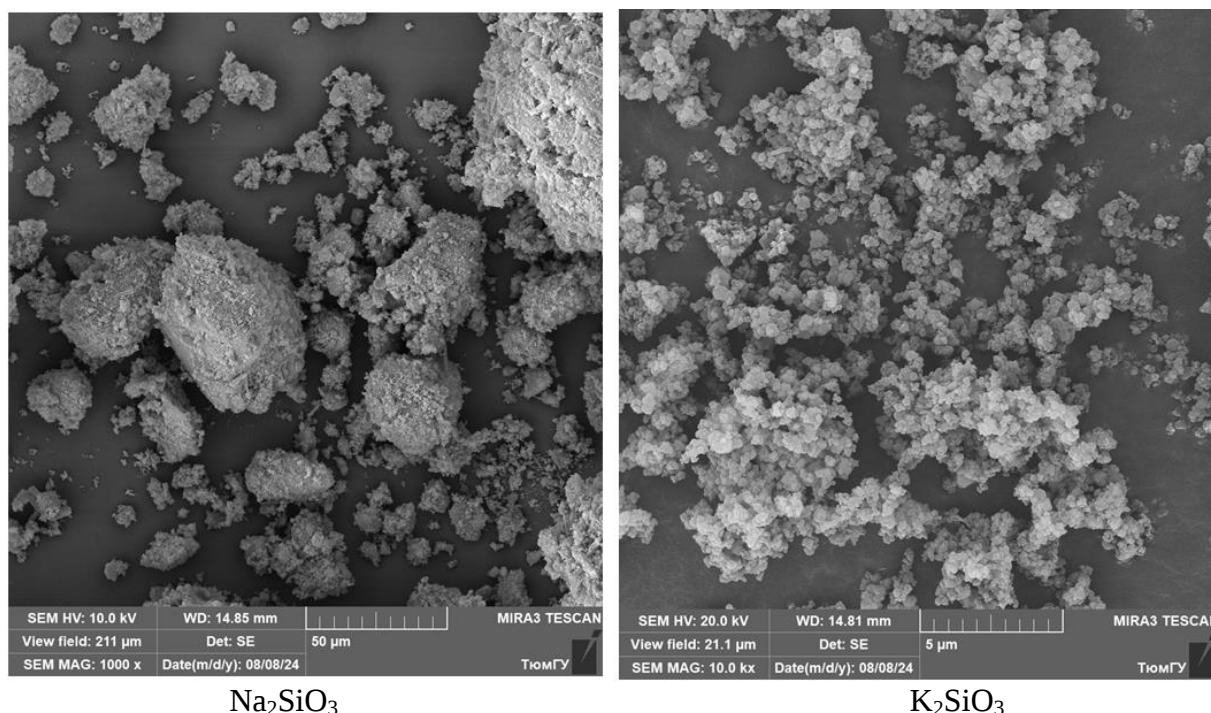
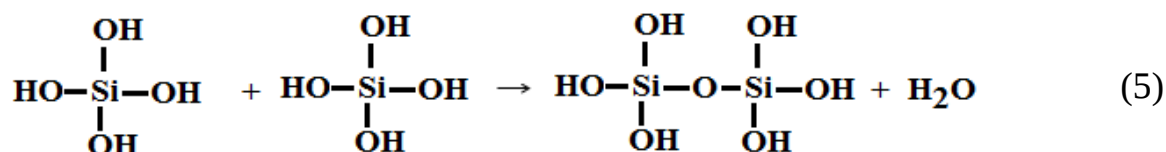


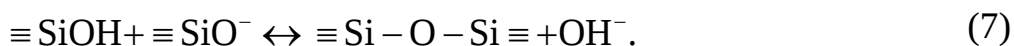
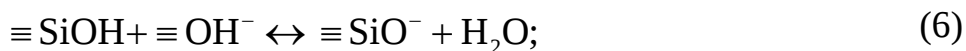
Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок твердой фазы силикатов натрия и калия.

Fig. 2. Electron micrograph of the solid phase of sodium and potassium silicates.

Образовавшаяся кремневая кислота вступает в реакцию полимеризации. Способность к полимеризации определяется наличием у атома кремния Si свободных d – орбиталей. Молекулу ортокремневой кислоты H_2SiO_3 можно представить в следующем виде, $\text{HO}-\text{Si}(\text{O})-\text{OH}$. Электроны атомов кислорода в мономере спариваются с электронами соседних молекул кремния, что и определяет образование полимера. Кроме этого, у мономеров ортокремневой кислоты содержатся кремнекислородные тетраэдры, которые в реакции конденсации соединяются вершинами [11]:



Процесс продолжается в сторону удлинения кремнекислородных цепей. Полимеризация протекает в результате кислотно-основных реакций [8]:



Реакция, протекающая в прямом направлении (6), идет с образованием ионных форм кремнезема при взаимодействии со щелочами. Обратная реакция (7) гидролитическая, где раствор силикатов проявляет выраженную щелочную реакцию. Кислотность силикатных групп ($\text{Si} - \text{OH}$) будет зависеть от числа силоксановых связей. По второй реакции образуются полимеры, которые преимущественно имеют сферическое строение. Процесс полимеризации характеризуется образованием коллоидных частиц с отрицательным зарядом [9]. Эти частицы не вступают между собой во взаимодействие, если не созданы условия для коагуляции.

Для растворов щелочных силикатов Na^+ и K^+ с увеличением вязкости характерно отвердевание. Происходит процесс перехода в твердое состояние за счет образования водородных связей между гидроксильными группами. Образование твердых частиц происходит в результате получения высокодисперсного коллоидного раствора (золя) [12–14]. Полимеризация проходит с возрастанием молекулярной массы. Формирование химического состава твердой фазы протекает в три стадии.

Первая стадия. Образование высокодисперсного коллоидного раствора в виде золя. Размер частиц дисперсной фазы может изменяться от 1 до 1000 нм.

Вторая стадия. С увеличением концентрации дисперсной фазы возникают коагуляционные контакты между частицами, что приводит к структурированию системы в виде геля (процессу гелеобразования) [9]. Этот процесс известен как *золь-гель переход*. Коагуляционные структуры характеризуются низкой прочностью, определяемой ван-дер-Вальсовыми силами, при этом взаимодействие частиц осуществляется через равновесную по толщине прослойку дисперсионной среды.

Третья стадия. Возникающие коагуляционные силы способны в системе сохранять форму геля и постоянно уплотнять гель. Удаление дисперсной фазы из рассола (среды) способствует появлению прочных фазовых контактов [15].

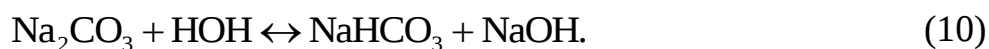
При высушивании гель переходит в устойчивое тонкопористое тело (так называемый ксерогель), в котором за счет уплотнения материала изменяется его структура [8]. В результате высокой дисперсности размер частиц становится от 10 до 100 нм. При этом удельная поверхность ксерогелей значительно меньше, чем у исходных золь [15], что может быть связано, как с ростом коллоидных частиц, так и с возникновением мостиковых контактов между ними. Согласно литературным данным [9, 16] структура полимерных кремнекислородных анионов зависит от модуля, плотности и вида катиона щелочного силиката (Na^+ , K^+). Таким образом, в растворах будут присутствовать гидратированные мономерные и полимерные формы. Затем в

растворе происходит образование полимерных анионных группировок и при этом выделяется вода.

Полученные устойчивые твердые материалы исследовали рентгенографическим методом. На основании полученных дифрактограмм (рис. 3), можно отметить образования разных структур в твердой фазе. Образование твердой фазы из рассола при добавлении силиката натрия происходит за счет химического процесса с углекислотой воздуха [17]:



Авторы работы [14] предположили, что основой отвердевания является гидролиз силиката натрия с образованием гидрокарбоната:



Образовавшийся гидрокарбонат натрия в растворе будет находиться в виде ионов натрия и гидрокарбонат иона. Это вызывает миграцию ионов натрия к поверхности с образованием кристаллических карбонатных и силикатных структур. В случае применения ЖС с мольным соотношением $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ (М – Na) до 3,0–5,0 полимеризация силикат-ионов предшествует их уплотнению, что нежелательно, так как в результате выделяется жидкая фаза, содержащая карбонизирующие катионы щелочных металлов [15].

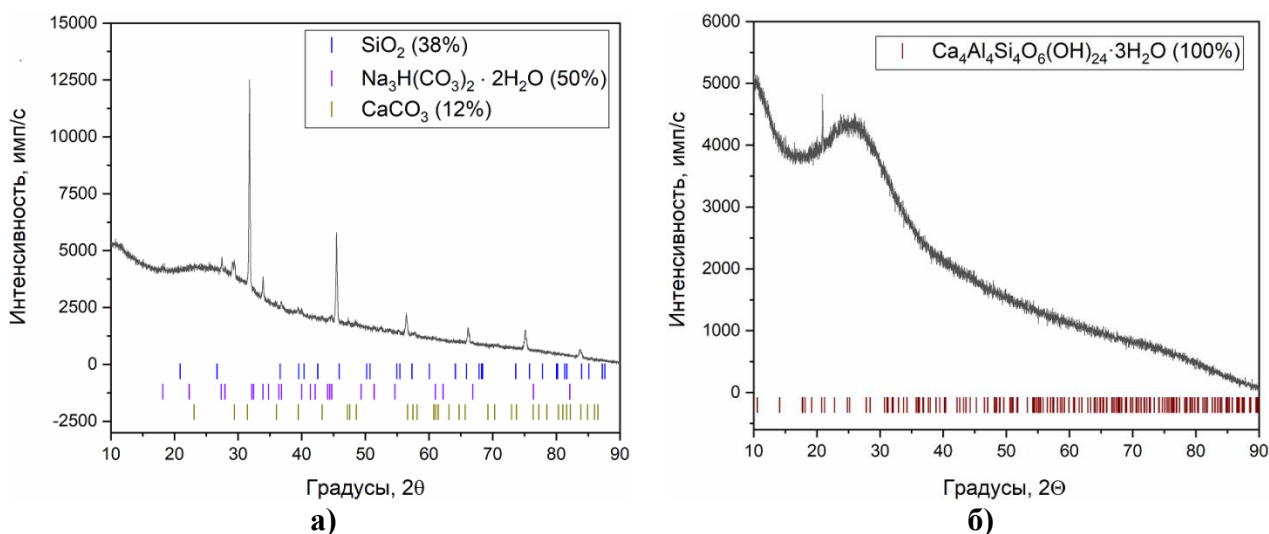


Рис. 3. Дифрактограммы твердой фазы силикатов а) Na_2SiO_3 и б) K_2SiO_3 после уточнения методом Ритвельда.

Fig. 3. Diffraction patterns of the solid phase of a) Na_2SiO_3 and b) K_2SiO_3 silicates after refinement by the Rietveld method.

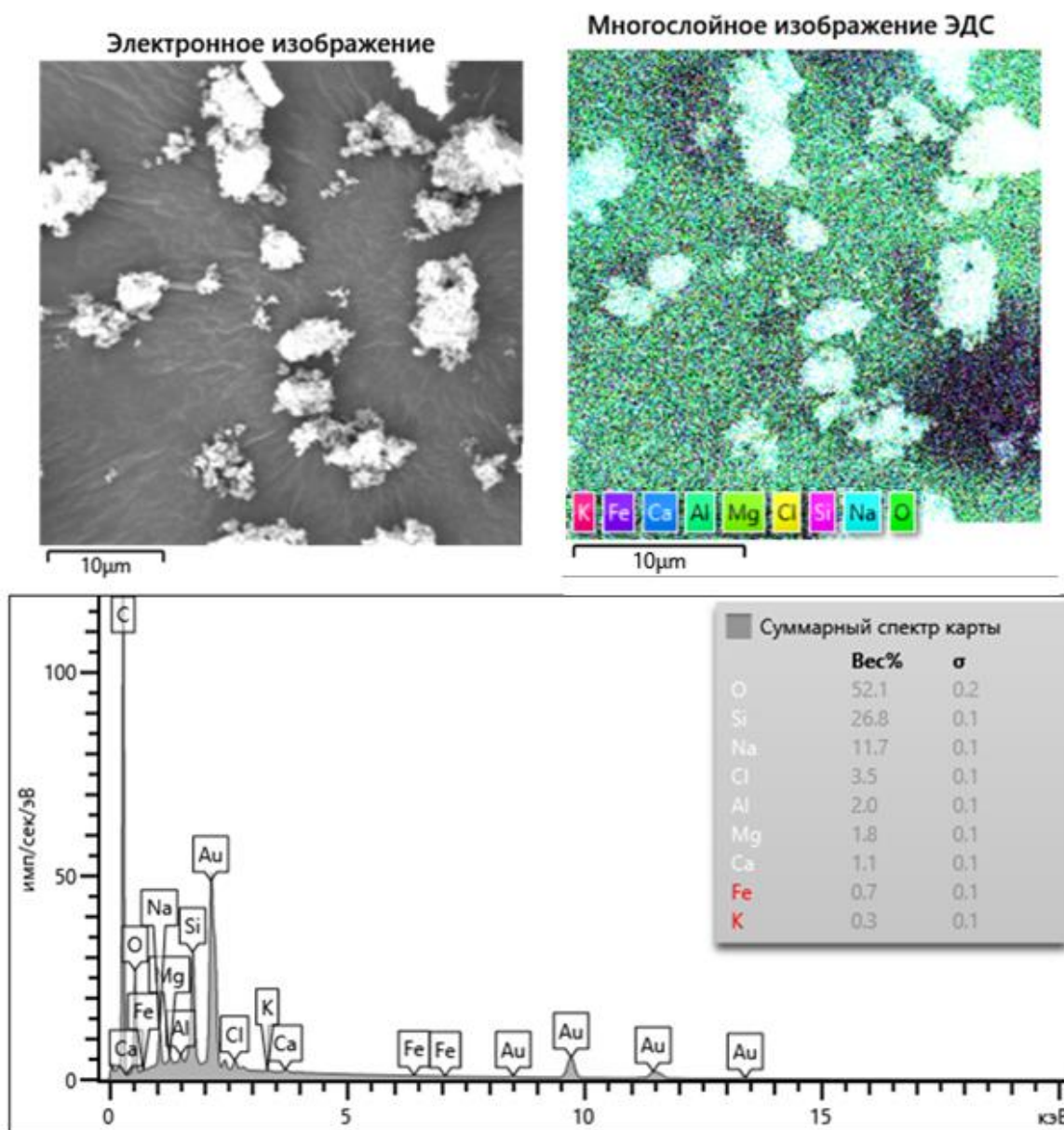
При добавлении в рассол силиката калия образуются алюмосиликатные комплексы с оксомостиками $-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-$, а в димерных гидроксокомплексах $\text{Al}(\text{III})$ тетраэдр AlO_4 замещается на тетраэдр SiO_4 . В разбавленных растворах, кроме алюмосиликатных ионов, образуются ассоциаты типа:



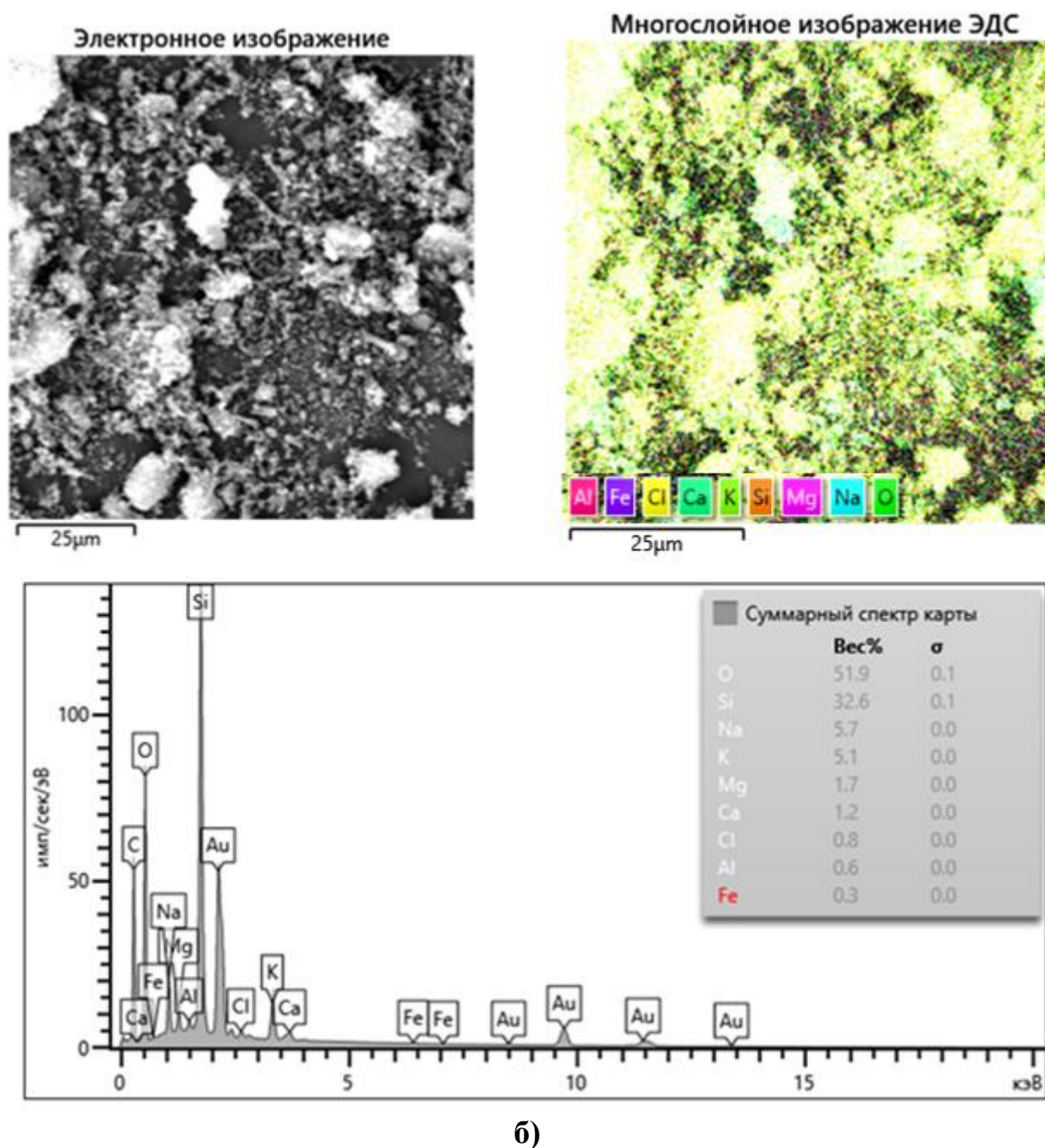
в которых взаимодействие алюминат- и силикат-ионов происходит по дефект-протон-дисперсионному механизму [16].

Образовавшаяся твердая силикатная поверхность с развитой пористой структурой является эффективным адсорбентом по отношению к растворенным веществам. В нашем случае растворенным веществом является хлорид натрия (рассол). На рисунке 4 приведены виды пористой силикатной структуры. Структуры отличаются формой, размером и распределением пор по объему материала.

Микроскопические исследования показывают, что на твердой силикатной поверхности адсорбируются ионы рассола Na^+ и Cl^- , являющиеся основой раствора рассола, а также примесные катионы Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} . В результате уменьшается концентрация ионов в рассоле и происходит очистка воды.



а)



б)

Рис. 4. Структура силикатных пористых материалов на основе а) Na_2SiO_3 и б) K_2SiO_3 .

Fig. 4. Structure of porous silicate materials based on а) Na_2SiO_3 and б) K_2SiO_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты показывают возможность использования силикатов щелочных металлов для извлечения из рассола солей хлорида натрия и сопутствующих щелочноземельных металлов, железа и алюминия, обеспечивая обработку рассолов до безопасных требований к утилизации путем сброса в окружающую среду. При этом, побочный силикатный продукт обработки рассолов может найти широкое применение в строительной индустрии в локальном масштабе. Например, при возведении сооружений в населенных пунктах прибрежной полосы Российской Федерации.

Последующим направлением исследования является определение прочностных и теплоизоляционных характеристик полученного силикатного продукта с целью уточнения и детализации области применения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Panagopoulos A. (2021). Beneficiation of saline effluents from seawater desalination plants: Fostering the zero liquid discharge (ZLD) approach - a techno-economic evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(4), 105338. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105338>.
2. Panagopoulos A. (2022). Brine management (saline water & wastewater effluents): Sustainable utilization and resource recovery strategy through Minimal and Zero Liquid Discharge (MLD & ZLD) desalination systems, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 176, 108944. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108944>.
3. Миронов В.В., Иванюшин Ю.А., Суглобов Д.А., Миронов Д.В., Кадысева А.А., Ерофеев Е.А. (2024). Гидравлический расчёт трубопровода с рассредоточенным сбросом рассола в акваторию. *Архитектура, строительство, транспорт*. 107(1), 68–78. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-68-78>.
4. Пат. 2133334, Российская Федерация, 1999.
5. Дроздов А.В. (2013). Оценка возможности закачки дренажных рассолов карьера и рудника «Удачный» в среднекембрийский водоносный комплекс. *iPolytech Journal*, 7(78), 32–40. https://journals.istu.edu/vestnik_irtgu/journals/2013/07.
6. Raza A., Mahmoud M., Alafnan S., Arif M., Kirmani F.U.D., Kamal M.S., Mustafa M., & Rana A. (2024). Role of high-density brines in reservoir development stages: a review. *Energy Geoscience*. 5(3), 100304. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2024.100304>.
7. Luo X., Li X., Wei C., Deng Z., Liu Y., Li M., Zheng S., & Huang X. (2022). Recovery of NaCl and Na₂SO₄ from high salinity brine by purification and evaporation. *Desalination*. 530, 115631. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115631>.
8. Корнеев В.В., Данилов В.И. (1996). *Растворимые жидкие стекла*. СПб.: Стройиздат.
9. Айлер Р. (1982) *Химия кремнезема: растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия. Часть I*. М.: Мир.
10. Рахманин Ю.А., Егорова Н.А., Михайлова Р.И., Рыжова И.Н., & Кочеткова М.Г. (2021). О гигиеническом нормировании соединений кремния в питьевой воде (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 100(10), 1077–1083. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1077-1083>.
11. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. (2004). *Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема*. М.: Академкнига.
12. Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б., Смирнов К.В., Шушкина Е.А., & Ильин А.П. (2007). Экструзионное формование сорбентов на основе каолина. *Стекло и керамика*. 80(8), 29–32. <https://glass-ceramics.ru/ru/archivru/17-na-predpriyatiyakh-i-v-institutakh/2507-1254>.
13. Hong S.K., Voon. M.Y., & Hwang H.J. (2011). Fabrication of Spherical Silica Aerogel Granules from Water Glass by Ambient Pressure Drying. *Journal of the American Ceramic Society*. 94(10), 3198–3201. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04765.x>.
14. Inoue S., Morita K., Asai K., & Okamoto H. (2004). Preparation and properties of elastic polyimide-silica composites using silanol sol from water glass. *Journal of Applied Polymer Science*. 92(4), 2211–2219. <https://doi.org/10.1002/app.20239>.

15. Фиговский О.Л., & Кудрявцев П.Г. (2014). Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокпозиционных материалов. *Инженерный вестник Дона*. 29(2), 117. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448>.
16. Рамазанов А.Ш., Атаев Д.Р., & Каспарова М.А. (2021). Получение карбоната лития высокого качества из литийсодержащих природных рассолов. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 64(4), 52–58. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216404.6238>.
17. Усова Н.Т., Лотов В.А., & Лукошевич О.Д. (2013). Водостойкие безавтоклавные силикатные строительные материалы на основе песка, жидкостекольных композиций и шламов водоочистки. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. (2), 276–284.

References:

1. Panagopoulos A. (2021). Beneficiation of saline effluents from seawater desalination plants: Fostering the zero liquid discharge (ZLD) approach - a techno-economic evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(4), 105338. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105338>.
2. Panagopoulos A. (2022). Brine management (saline water & wastewater effluents): Sustainable utilization and resource recovery strategy through Minimal and Zero Liquid Discharge (MLD & ZLD) desalination systems, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 176, 108944. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108944>.
3. Mironov V.V., Ivanyushin Yu.A., Suglobov D.A., Mironov D.V., Kadyseva A.A., & Erofeev E.A. (2024). Hydraulic calculation of the pipeline with dispersed discharge of brine into the water. *Architecture, construction, transport*. 107(1), 68–78. (in Russ.). <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-68-78>.
4. Pat. 2133334, Russian Federation, 1999.
5. Drozdov A.V. (2013). Assessing possibility to pump open pit and mine “Udachny” drainage brines into Middle Cambrian aquiferous complex. *iPolytech Journal*, 7(78), 32–40. (in Russ.). https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2013/07.
6. Raza A., Mahmoud M., Alafnan S., Arif M., Kirmani F.U.D., Kamal M.S., Mustafa M., & Rana A. (2024). Role of high-density brines in reservoir development stages: a review. *Energy Geoscience*. 5(3), 100304. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2024.100304>.
7. Luo X., Li X., Wei C., Deng Z., Liu Y., Li M., Zheng S., & Huang X. (2022). Recovery of NaCl and Na2SO4 from high salinity brine by purification and evaporation. *Desalination*. 530, 115631. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115631>.
8. Korneev V.V., & Danilov V.I. (1996). *Soluble liquid glasses*. SPb.: Stroiizdat (in Russ.).
9. Iler R. (1979). *The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry of silica*. Wiley, Chichester.
10. Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A., Mikhailova R.I., Ryzhova I.N., & Kochetkova M.G. On the hygienic rating of silicon compounds in drinking water (literature review). *Hygiene and Sanitation*. 100(10), 1077–1083. (in Russ.). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-10-1077-1083>.
11. Shabanova N.A., & Sarkisov P.D. (2004). *Fundamentals of sol-gel technology of nanodispersed silica*. M.: Akademkniga (in Russ.).
12. Prokofev V.Yu., Razgovorov P.B., Smirnov K.V., Shushkina E.A., & Il'in A.P. (2007). Extrusion molding of kaolin sorbents. *Glass and Ceramics*. 64(7–8), 287–290. <https://doi.org/10.1007/s10717-007-0072-x>.
13. Hong S.K., Voon. M.Y., & Hwang H.J. (2011). Fabrication of Spherical Silica Aerogel Granules from Water Glass by Ambient Pressure Drying. *Journal of the American Ceramic Society*. 94(10), 3198–3201. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04765.x>.

14. Inoue S., Morita K., Asai K., & Okamoto H. (2004). Preparation and properties of elastic polyimide-silica composites using silanol sol from water glass. *Journal of Applied Polymer Science*. 92(4), 2211–2219. <https://doi.org/10.1002/app.20239>.
15. Figovsky O.L., & Kudryavtsev P.G. (2014). Liquid glass and aqueous solutions of silicates, as a promising basis for technological processes of new nanocomposite materials. *Engineering journal of Don*. 29(2), 117. (in Russ.). <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448>.
16. Ramazanov A.Sh., Ataev D.R., & Kasparova M.A. (2021). Obtaining high quality lithium carbonate from natural lithium-containing brines. *ChemChemTech*. 64(4), 52–58. (in Russ.) <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216404.6238>.
17. Usova N.T., Lotov V.A., & Lukashevich O.D. (2013). Waterproof autoclaveless silicate building materials on the basis of sand, soluble glass compositions and mud of water purifications. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building*. 2, 276–284. (in Russ).