

Сорбенты на основе Ц и ШГ были исследованы в процессах опреснения соленой воды, в частности, для извлечения ионов натрия и калия (таблицы 4-5).

Следует отметить, что для исходных Ц/ШГ, а также обработанных солью форм Ц-Na/ШГ-Na наблюдается небольшое увеличение содержания ионов натрия в растворе после контакта с сорбентом. Это может быть обусловлено тем, что в данных формах сорбентов содержится значительное количество натрия, который в процессе взаимодействия с соленой водой выделяется в раствор, т.е. происходит десорбция. Таким образом, данные формы сорбентов являются неэффективными в процессах опреснения. Однако, обработка натрием является важной ступенью получения сорбента, способного извлекать ионы натрия из водных растворов. Из [11] известно, что предварительная обработка цеолита Na^+ в результате последующей кислотной обработки приводит к более полному замещению обменных катионов на протоны. Авторами было установлено, что без предварительной обработки ионами натрия перевод цеолита в гомоионную H-форму был менее полным. Также, предварительная обработка натрием уменьшает разрушение структуры минерала и деалюминирование при обработке кислотой [24].

Как видно из таблицы 4, наилучшие показатели достигаются у сорбентов, полученных путем последовательной обработки Ц и ШГ хлоридом натрия и кислотой (Ц-Na-H и ШГ-Na-H), которые составляют 15,44% и 28,45% соответственно.

Таблица 4 – Результаты извлечения ионов Na^+ из модельных растворов

Образцы	C(Na^+), мг/л	E, %	A, мг/г
NaCl (модельный раствор)	24,96±1,50	-	-
Ц	29,25±2,01	десорбция	десорбция
Ц-Na	34,61±2,25	десорбция	десорбция
Ц-H	22,31±1,34	11,90±0,84	0,16±0,01
Ц-Na-H	21,62±1,47	15,44±0,95	0,20±0,01
ШГ	31,09±2,74	десорбция	десорбция
ШГ-Na	25,45±1,54	десорбция	десорбция
ШГ-H	22,20±1,42	12,43±0,81	0,17±0,01
ШГ-Na-H	19,43±1,34	28,45±1,83	0,33±0,02

В таблице 5 приведены результаты извлечения ионов K^+ сорбентами на основе Ц и ШГ. Сорбенты на основе ШГ демонстрируют более высокие значения степени извлечения в пределах 67,96-76,28%. Это, вероятно, связано с тем, что ШГ содержит в своем составе, в основном, ионы Na^+ , которые максимально замещают ионы K^+ , содержащиеся в модельном растворе. Результаты

извлечения ионов K^+ сорбентами на основе Ц ниже по сравнению с сорбентами на основе ШГ. Возможно, это связано с тем, что в составе Ц содержатся ионы и Na^+ и K^+ , поэтому при извлечении ионов K^+ из модельных растворов, ионообменным процессам подвергаются только ионы натрия.

Анализ результатов, представленных в таблице 5, указывает на относительно высокие сорбционные характеристики для Ц и ШГ, обработанных хлоридом натрия, что, вероятно, обусловлено переводом исходных материалов в гомоионную Na-форму.

Таблица 5 – Результаты извлечения ионов K^+ из модельных растворов

Образцы	C(K^+), мг/л	E, %	A, мг/л
KCl (модельный раствор)	49,54±2,98	-	-
Ц	33,23±2,01	32,93±2,05	0,98±0,06
Ц-Na	19,58±1,27	60,47±3,83	1,80±0,11
Ц-H	36,92±2,39	25,49±1,55	0,76±0,05
Ц-Na-H	36,95±2,28	25,40±1,71	0,76±0,04
ШГ	15,22±1,03	69,28±4,41	2,10±0,13
ШГ-Na	11,75±0,79	76,28±4,71	2,27±0,14
ШГ-H	15,87±1,02	67,96±4,08	2,02±0,13
ШГ-Na-H	15,50±0,98	68,70±4,25	2,04±0,12

Однако, в данном случае эффективность обработанных хлоридом натрия форм сорбентов являются спорными при опреснении, так как может происходить замещение одного засоряющего иона на другой – калия на натрий. При этом степень солености раствора может не уменьшаться. Но данная форма обработки алюмосиликатов может иметь практический интерес в других сферах, где необходимо концентрирование и извлечение ионов калия. Например, Ц и ШГ после извлечения ионов калия могут применяться в качестве удобрений как источник калия, который является важным микроэлементом для растений [25].

Таким образом, в процессах опреснения лучше использовать обработанные кислотой, либо последовательно солью и кислотой формы сорбентов.

3.2 Сравнение эффективности полученных сорбентов с известными из литературы данными

Известно, что сорбенты на основе углерода, такие как активированный уголь, углеродные нанотрубки и графены, обладают значительными адсорбционными свойствами по отношению к различным органическим и неорганическим соединениям [6]. Так, в работе [26] использована активированная углеродная ткань для извлечения ионов Na^+ и K^+ из воды. Было установлено, что извлечение ионов Na^+ углеродным сорбентом составило 9%, а ионов K^+ – 50%.

В работе [27], для извлечения ионов Na^+ из воды использовали тонкую пленку аморфного углерода, в результате которого степень извлечения ионов Na^+ составила 45%. Авторами [28] исследована эффективность альгинатного геля для адсорбции ионов натрия, степень извлечения которого составила 16,8%. В работах [15,29] представлены результаты по опреснению с использованием цеолита. Так, в работе [29] установлено, что степень извлечения ионов K^+ цеолитом, обработанного раствором NaCl , составила 50%. В работе [15] исследовано извлечение ионов Na^+ сорбентом на основе природного цеолита, обработанного раствором серной кислоты, степень извлечения равна 88%. Сравнительный анализ сорбционных материалов указывает на то, что многие из них являются достаточно дорогостоящими, синтезируемыми в ходе многоступенчатых процессов. Следует отметить, что полученные в настоящем исследовании сорбенты характеризуются сравнительно невысокими значениями степени извлечения ионов натрия и калия, однако являются доступными в финансовом отношении, представляют минеральное сырье Казахстана.

4. Заключение

В работе были получены сорбенты на основе природного цеолита и шамотной глины и исследованы их адсорбционные свойства по отношению к ионам Na^+ и K^+ для опреснения соленой воды. В результате обработки природного цеолита и шамотной глины хлоридом натрия и азотной кислотой были получены 4 серии сорбентов. Исследованы физико-химические характеристики

полученных сорбентов методами СЭМ, EDAX и БЭТ. В результате кислотной обработки происходит значительное увеличение удельной поверхности Ц и ШГ с $4,5 \text{ м}^2/\text{г}$ до $39,3 \text{ м}^2/\text{г}$ и с $8,4 \text{ м}^2/\text{г}$ до $15,3 \text{ м}^2/\text{г}$, соответственно. Катионообменная емкость (КОЕ) повышается в результате обработки хлоридом натрия, численные значения с 616,0 до 624,4 мэкв/100 г и с 291,3 до 352,9 мэкв/100 г для Ц и ШГ, соответственно. Это объясняется образованием «гомоионной» формы алюмосиликата, в результате чего сорбенты легче вступают в реакции ионного обмена. Установлено, что сорбенты на основе ШГ показывают большие степени извлечения ионов по сравнению с сорбентами на основе Ц . Сорбент ШГ- Na -Н характеризуется более высокой степенью извлечения ионов Na^+ ($E = 28,45\%$), а сорбент ШГ- Na эффективен для связывания ионов K^+ ($E = 76,28\%$) из модельных растворов. Среди сорбентов на основе Ц наиболее эффективными формами являются Ц - Na -Н (15,44% извлечения Na^+) и Ц - Na (60,47% извлечения K^+). В результате предварительной оценки исследуемых материалов для извлечения ионов Na^+ и K^+ , проведенной в рамках данного исследования установлено, что Ц и ШГ имеют потенциал для применения в процессах опреснения соленой воды.

Благодарности

Данная работа выполнена в рамках проекта, финансируемого Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, Грант №AP09260116 «Разработка агентов на основе минерального сырья Казахстана для опреснения соленой воды».

Литература

- 1 Данилов-Данильян В.И. Глобальная проблема пресной воды // Век Глобализации. – 2008. – №1. – P.45-56.
- 2 du Plessis A. Global Water Scarcity and Possible Conflicts. In: Freshwater Challenges of South Africa and its Upper Vaal River. – Springer Cham, 2017. – P.45-62.
- 3 Abdulstar A.R., Altemimi A., Al-Hilphy A.R.S., Watson D.G., Lakhssassi N. Water distillation using an ohmic heating apparatus // International Journal of Ambient Energy. – 2020. – P.1-11.
- 4 Franzsen S., Sheridan C., Simate G.S. Process for high recovery treatment of brackish water reverse osmosis concentrate // Desalination. – 2021. – Vol.498. – P.114792.
- 5 Godage N.H., Gionfriddo E. Use of natural sorbents as alternative and green extractive materials: A critical review // Analytica Chimica Acta. – 2020. – Vol.1125. – P.187-200.
- 6 Alaei Shahmirzadi M.A., Hosseini S.S., Luo J., Ortiz I. Significance, evolution and recent advances in adsorption technology, materials and processes for desalination, water softening and salt removal // Journal of environmental management. – 2018. – Vol.215. – P.324-344.
- 7 Reeve P.J., Fallowfield H.J. Natural and surfactant modified zeolites: A review of their applications for water remediation with a focus on surfactant desorption and toxicity towards microorganisms // Journal of Environmental Management. – 2018. – Vol.205. – P.253-261.
- 8 Uddin M.K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade // Chemical Engineering Journal. – 2017. – Vol.308. – P.438-462.
- 9 Wibowo E., Sutisna, Rokhmat M., Murniati R., Khairurrijal, et al. Utilization of natural zeolite as sorbent material for seawater desalination // Procedia Engineering. – 2017. – Vol.170. – P.8-13.
- 10 Gibb N.P., Dynes J.J., Chang W. Synergistic desalination of potash brine-impacted groundwater using a dual adsorbent // Science of the Total Environment. – 2017. – Vol.593-594. – P.99-108.
- 11 Gibb N.P., Dynes J.J., Chang W. A recyclable adsorbent for salinized groundwater: Dual-adsorbent desalination and potassium-exchanged zeolite production // Chemosphere. – 2018. – Vol.209. – P.721-729.
- 12 Sekihata F., Wajima T. Preparation of desalination agent from ca-type clay minerals // International Journal of GEOMATE. – 2020. – Vol.19, Is.71. – P.123-129.