

Научная статья
УДК 544.723.21

ХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА И ОЦЕНКА ЕГО СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ

Татьяна Андреевна Михайличенко¹, Людмила Анатольевна
Новикова²

^{1, 2} Воронежский государственный лесотехнический университет,
Воронеж, Россия

¹ tatyana290904@yandex.ru

² novikov-la@yandex.ru

Аннотация. Изучены физико-химические свойства и сорбционная способность природного цеолита, модифицированного растворами H_2SO_4 , $NaOH$, NH_4OH . Показана наиболее высокая емкость природного цеолита к формальдегиду и цефтриаксону, тогда как кислотнo-модифицированный цеолит проявил наибольшую степень очистки раствора (~75 %) от метило-ранжа.

Ключевые слова: цеолиты, модификация, сорбция, очистка воды, промышленность

Для цитирования: Михайличенко Т. А., Новикова Л. А. Химическая модификация природного цеолита и оценка его сорбционной способности // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России = Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia : материалы XXII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 1076–1080.

Original article

CHEMICAL MODIFICATION OF NATURAL ZEOLITE AND ASSESSMENT OF ITS SORPTION CAPACITY

Tatiana A. Mikhailichenko¹, Lyudmila A Novikova²

^{1, 2} Voronezh State Forest Engineering University, Voronezh, Russia

¹ tatyana290904@yandex.ru

² novikov-la@yandex.ru

Abstract. The physicochemical properties and sorption capacity of native zeolite modified with H_2SO_4 , $NaOH$, and NH_4OH solutions have been researched. The highest capacity of natural zeolite to formaldehyde and ceftriaxone was

shown, while acid-modified zeolite showed the highest degree of purification of the solution (~75 %) from methyl orange.

Keywords: zeolites, modification, sorption, water purification, industry

For citation: Mikhailichenko T. A., Novikova L. A. (2026) Ximicheskaya modifikaciya prirodnogo ceolita i ocenka ego sorbcionnoj sposobnosti [Chemical modification of natural zeolite and assessment of its sorption capacity]. Nauchnoe tvorчество molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii [Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia] : materials of the XXII All-Russian (national) Scientific and Technical Conference of undergraduate and postgraduate students. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 1076–1080. (In Russ).

Очистка промышленных токсикантов играет важнейшую роль в обеспечении устойчивого развития промышленности и сохранении окружающей среды. Эта деятельность направлена на защиту здоровья населения, рациональное использование природных ресурсов и повышение конкурентоспособности предприятий. Применение передовых методов очистки позволяет значительно снизить уровень выбросов вредных веществ, делая производственные процессы экологически безопасными [1].

В настоящее время использование сорбционных материалов находит отражение в различных технологических процессах, научных исследованиях и химическом анализе [2]. Сорбция представляет собой процесс поглощения веществ поверхностью или объемом пористого материала, механизмы сорбции которой могут включать физическую адсорбцию, хемосорбцию и ионный обмен. Сорбционные процессы применяются для очистки воды, воздуха, разделения газов и жидкостей, а также в катализе.

Одним из перспективных материалов, используемых для решения проблем промышленной экологии, являются природные цеолиты. Эти уникальные алюмосиликатные минералы обладают высокоразвитой микропористой структурой и высокими катионообменными свойствами, что делает их востребованными адсорбентами для удаления различных видов загрязнений из промышленных вод и воздушных потоков. Тем не менее природная форма минералов зачастую характеризуется ограниченной емкостью поглощения отдельных классов веществ, включая тяжелые металлы и трудно разлагаемые органические соединения.

Химическая модификация природных цеолитов представляет собой эффективный метод повышения их сорбционной активности [3]. Этот процесс включает обработку минералов различными реагентами, такими как растворы минеральных кислот (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) и оснований ($NaOH$, KOH , NH_4OH) [4]. Цеолиты обладают высокой селективностью и устойчивостью к химическим воздействиям. Их преимущество – возможность регенерации и многократного использования [5].

Цель данной работы – модификация природного цеолита растворами кислоты и оснований и оценка его физико-химических свойств и сорбционной способности в отношении промышленных токсикантов.

Объекты исследования: природный цеолит (Zt), содержащий 95 % клинфиллолита (*Zeoset*, Словакия), который был модифицирован растворами 2 н H_2SO_4 (Zt- H^+), 2 н NaOH (Zt- OH^-) и 2 н NH_4OH (Zt- NH_4) в течение 6 ч при 100 °С (соотношение сорбент/модификатор = 1:4). Насыпная плотность образцов определена по ГОСТ 16190–70. Сорбционная способность цеолита изучена в отношении промышленных токсикантов, в качестве которых выступали водные растворы метилового оранжевого (М. О., 12 мг/л), формальдегида (Ф., 0,01 моль/л) и цефтриаксона (Цеф., 100 мг/л). Образцы цеолита массой 0,2 г помещали в колбы с 20 мл раствора сорбата, перемешивали, оставляли на 30 мин, затем фильтровали. Остаточную концентрацию сорбата определяли: формальдегида – сульфитным методом, метиленового оранжевого – фотоколориметрически ($\lambda = 460$ нм), цефтриаксона – спектрофотометрически ($\lambda = 290$ нм).

В таблице приведены значения насыпной плотности природного и модифицированного образцов цеолита. Наибольшую насыпную плотность (0,823 г/см³) имеет образец Zt- H^+ , что может указывать на более плотную упаковку частиц или меньшую пористость. Наименьшую насыпную плотность проявил образец Zt- OH^- (0,667 г/см³), что может свидетельствовать о большей пористости или менее плотной упаковке частиц сорбента. Все образцы имеют схожую массу, но различия в объеме и насыпной плотности могут быть связаны с различиями в структуре или химическом составе цеолитов.

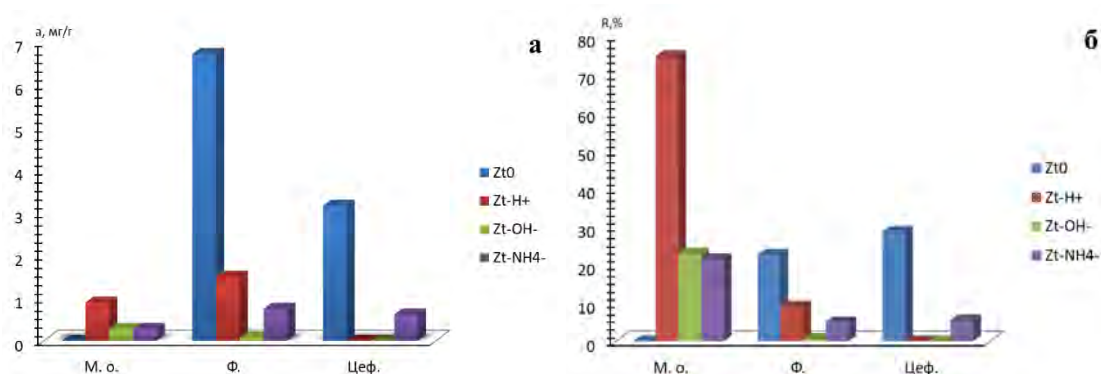
Насыпная плотность образцов цеолита

№	Образец	Насыпная плотность, г/см ³	Удельный объем, см ³ /г
1	Zt ⁰	0,761	1,31
2	Zt- H^+	0,823	1,22
3	Zt- OH^-	0,667	1,50
4	Zt- NH_4^+	0,791	1,26

Обработка минералов серной кислотой приводит к растворению карбонатов, вызывает реакции обмена между обменными катионами цеолита и ионами H_3O^+ раствора, что способствует созданию мезопористой структуры, увеличивающей общую площадь поверхности сорбента, и изменяет природу активного центра. В результате этого улучшается доступ к активным центрам на поверхности цеолита, а также происходит перераспределение числа и сил активных центров, участвующих в адсорбции.

Щелочное модифицирование, напротив, формирует на поверхности цеолита функциональные группы, содержащие атомы кислорода. Это повышает способность материала взаимодействовать с положительно заряженными частицами загрязнений, включая ионы тяжелых металлов. Щелочи разрушают кристаллическую структуру цеолита, формируя новые активные центры и расширяя размер пор, что увеличивает потенциал минерала для адсорбции широкого спектра загрязняющих веществ [4].

Из рисунка, *а* видно, что наибольшую метилового оранжевого адсорбцию показывает образец $Zt-H^+$ (0,894 мг/г), тогда как природный образец Zt^0 проявил наибольшую адсорбцию формальдегида (6,72 мг/г) и цефтриаксона (3,165 мг/г). Увеличение удельной поверхности и пористости цеолита после кислотной модификации приводит к росту сорбционной способности по отношению к крупным органическим молекулам, таким как М. О. Обработка растворами оснований в меньшей степени изменила сорбционную способность к М. О., поскольку, очевидно, преобразования пористости и удельной поверхности были незначительными. Большая адсорбция Ф. природным цеолитом, вероятно, связана с физической адсорбцией на полярной поверхности цеолита. Заметная адсорбция формальдегида и цефтриаксона на поверхности образца $Zt-NH_4$ обусловлена химическим взаимодействием с ионами NH_4^+ (хемосорбция).



Адсорбция метилового оранжевого, формальдегида и цефтриаксона:
а – на природных и модифицированных образцах цеолита; *б* – степень очистки воды

Из рисунка, *б* следует, что наиболее высокую и эффективную степень очистки оказывает образец $Zt-H^+$ в случае очистки раствора М. О. Для остальных образцов сорбентов и сорбатов степень очистки невысока, что обусловлено более высокой концентрацией растворов и требует дальнейших исследований по оптимизации сорбционного процесса и модификации.

Проведенные исследования подтверждают, что химическая модификация природного цеолита путем обработки кислотами и основаниями значительно улучшает его сорбционные свойства. Особенно эффективным оказалось применение серной кислоты и гидроксида натрия, что позволило повысить показатели адсорбции и степени очистки для различных промышленных токсикантов. Высокий потенциал модифицированных цеолитов в качестве эффективных средств для борьбы с промышленными загрязнениями способствует достижению целей устойчивого развития общества и природы и минимизации экологического ущерба.

Список источников

1. Новые подходы к разработке многофункциональных сорбентов / Л. С. Кочева, О. Б. Котова, А. П. Карманов, Н. И. Богданович // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения : сборник статей по материалам докладов XV Российского семинара по технологической минералогии, Иркутск, 17–18 мая 2023 года. Петрозаводск : Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН», 2023. С. 53–56.
2. Юрченко В. В., Никифоров А. Ф., Свиридов А. В. Получение сорбционных материалов на основе модифицированных алюмосиликатов // Проблемы теоретической и экспериментальной химии : тезисы докладов XXII Российской молодежной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А. А. Тагер (Екатеринбург, 24–28 апреля 2012 г.). Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. С. 7–8.
3. Использование модифицированного природного цеолита для извлечения ионов металлов из водных растворов / Ю. А. Тунакова, Г. Н. Габдрахманова, В. С. Валиев [и др.] // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26, № 11. С. 177–180.
4. Регулирование сорбционных процессов на природных нанопористых алюмосиликатах. Кислотная и основная модификация / Л. И. Бельчинская, Н. А. Ходосова, О. Ю. Стрельникова [и др.] // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2015. Т. 51, № 5. С. 487–494.
5. Бибанаева С. А., Скачков В. М. Сорбция тяжелых металлов из водных растворов синтетическими цеолитами // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2023. № 15. С. 924–929. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.924