

Статья поступила в редакцию: 05.08.2026

Статья принята к публикации: 16.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 661.8+546.11

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23338

Получение микропористых адсорбентов из местного каолина Султунувайс гидротермальным методом (на основании обзора литературы)

Султанов Мирибек Жаббарбергенович

ассистент-преподаватель

Нукусский государственный педагогический институт

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: miribek_sultanov@ndpi.uz

Джуманова Зияда Кеунимжаевна

канд. хим. наук, доц.

Каракалпакский государственный университет им. Бердаха

Республика Узбекистан, г. Нукус

E-mail: ziyada07@list.ru

Obtaining microporous adsorbents from local Sultunuvaiss kaolin by hydrothermal method (based on a literature review)

Sultanov Miribek Jabbarbergenovich

Assistant, Lecturer

at Nukus State Pedagogical Institute

Uzbekistan, Nukus

Jumanova Ziyada Keunimzhaevna

PhD in Chem. Sci., Associate Professor

of the Karakalpak State University named after Berdakh

Uzbekistan, Nukus

Аннотация

В данной научно-исследовательской работе выполнен анализ современных отечественных и зарубежных источников, посвящённых технологическим аспектам получения высокоэффективных микропористых адсорбентов методом гидротермального синтеза с использованием каолинового сырья месторождения Султунувайс. Рассмотрены физико-химические закономерности термической активации каолинита с образованием реакционноспособной метакаолиновой фазы и механизмы гидротермальной кристаллизации синтетических цеолитов. Проанализированы основные технологические факторы, определяющие процессы цеолитообразования: молярные соотношения компонентов

Библиографическое описание: Султанов М.Ж., Джуманова З.К. Получение микропористых адсорбентов из местного каолина Султунувайс гидротермальным методом (на основании обзора литературы) // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23338>

реакционной смеси ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$), концентрация щелочного агента, температура синтеза, продолжительность предварительного старения геля и время кристаллизации. Особое внимание уделено формированию фазового состава, пористой структуры, удельной поверхности и сорбционной ёмкости синтезируемых материалов. Проведённый анализ научно-технических данных подтверждает экономическую эффективность и перспективность использования каолинового сырья месторождения Султунуайс для получения высококачественных цеолитов с заданными структурными и сорбционными свойствами, предназначенных для применения в процессах адсорбции, очистки воды, газоразделения и катализа, обеспечивающих высокую эффективность удаления загрязняющих веществ из жидких и газовых сред, а также расширяющих возможности промышленного использования синтезированных материалов в экологических, химико-технологических и энергетических процессах различного назначения в будущем.

Abstract

This research study presents an analysis of contemporary domestic and international scientific literature devoted to the technological aspects of producing highly efficient microporous adsorbents by hydrothermal synthesis using kaolin raw materials from the Sultunuais deposit. The physicochemical principles of the thermal activation of kaolinite leading to the formation of a highly reactive metakaolin phase, as well as the mechanisms of hydrothermal crystallization of synthetic zeolites, are examined. The main technological factors governing the zeolite formation process have been analyzed, including the molar ratios of the reaction mixture components ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, and $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$), the concentration of the alkaline agent, synthesis temperature, gel aging time, and crystallization duration. Particular attention is given to the development of the phase composition, porous structure, specific surface area, and adsorption capacity of the synthesized materials. The analysis of the available scientific and technical data confirms the economic feasibility and promising potential of utilizing kaolin raw materials from the Sultunuais deposit for the production of high-quality zeolites with tailored structural and adsorption properties. These materials are intended for applications in adsorption, water purification, gas separation, and catalysis, providing high efficiency in the removal of contaminants from liquid and gaseous media. Furthermore, they expand the prospects for the industrial application of the synthesized materials in environmental, chemical-technological, and energy-related processes of various purposes in the future.

Ключевые слова: каолин, Султунувайс, гидротермальный синтез, цеолит, микропористый адсорбент, алюмосиликат, исследования ученых Узбекистана.

Keywords: kaolin, Sultunuvais, hydrothermal synthesis, zeolite, microporous adsorbent, aluminosilicate, research by scientists of Uzbekistan.

Введение

С каждым годом на промышленных предприятиях нефтегазового комплекса возрастает спрос на применение высокоэффективных адсорбентов при использовании химических и экологических технологий. В частности, микропористые алюмосиликатные материалы

отличаются высокой удельной поверхностью, катионообменной способностью и термической стабильностью. По этой причине цеолиты и другие микропористые материалы широко применяются для очистки воды от ионов тяжелых металлов, осушки газов, разделения углеводородов и в качестве носителей катализаторов [5; 7; 13; 23].

Из-за высокой стоимости высокочистых источников кремния и алюминия при производстве синтетических цеолитов широко развивается технология получения цеолитов путем гидротермального синтеза из природного каолина [7; 14; 17]. Природный каолин является перспективным минеральным сырьем благодаря своей дешевизне, широкой распространенности и алюмосиликатному составу [2; 19]. Разведанные в Узбекистане месторождения каолина позволяют производить продукцию с высокой добавленной стоимостью из местных минеральных ресурсов. Среди них особое значение имеют запасы каолина в районе Султунувайс, и оценка возможности получения высокоэффективных микропористых адсорбентов путем их гидротермальной переработки является одной из актуальных научных задач [1; 2; 24; 9].

Каолин является одним из важных видов природного алюмосиликатного минерального сырья и состоит в основном из минерала каолинита. Идеальная химическая формула каолинита выражается как $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, и он относится к группе слоистых алюмосиликатных минералов [5]. Его кристаллическая структура состоит из кремнекислородных тетраэдрических (SiO_4) и алюминий-кислородно-гидроксильных октаэдрических (AlO_6) слоев, связанных между собой водородными связями, что и определяет физико-химические свойства каолина [6]. Состав природного каолина, помимо каолинита, включает в себя такие минеральные примеси, как кварц, полевошпат, иллит, монтмориллонит, кальцит, оксиды железа и титана. Количество этих примесей зависит от геологического происхождения и условий образования месторождения, оказывая существенное влияние на химический состав, дисперсность и реакционную способность каолина [6; 16; 20]. В частности, высокое содержание кварца может снижать реакционную способность, а оксиды железа могут изменять цвет и некоторые физико-химические свойства синтезированного материала.

Материалы и методы

Методологической основой данной работы является систематический аналитический обзор отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных методам гидротермальной переработки алюмосиликатного сырья. Поиск литературных источников осуществлялся в ведущих международных и отечественных научно-метрических базах данных (Scopus, Web of Science, Google Scholar и ScienceDirect) по профильной тематике получения микропористых адсорбентов из каолинового сырья.

Временной рамкой поиска охвачены публикации за последние 10 лет (2016–2026 гг.). В качестве основных критериев отбора выступали их прямая тематическая направленность на переработку каолина, детальный анализ технологических параметров синтеза, а также публикация результатов в рецензируемых научных изданиях.

Пригодность каолина для гидротермального синтеза прежде всего определяется содержанием в нем SiO_2 и Al_2O_3 , а также их молярным соотношением. Эти показатели напрямую влияют на тип образующейся цеолитной фазы, степень кристалличности, пористую структуру и адсорбционные свойства в процессе синтеза [10; 14; 17]. В связи с этим перед гидротермальным синтезом важно оценить минералогический и химический состав каолина с использованием современных методов анализа, таких как рентгенофазовый анализ (XRD), рентгенофлуоресцентный анализ (XRF), инфракрасная спектроскопия (FTIR) и сканирующая электронная микроскопия (SEM) [6; 18].

Синтез цеолитов из каолина традиционно состоит из двух основных этапов:

Термическая активация (метакаолинизация). Прокаливание сырого каолина при температуре 650–800 °С, в результате чего разрушается кристаллическая решетка каолинита с образованием аморфного метакаолина, обладающего высокой реакционной способностью [12; 15].

Гидротермальная кристаллизация. Смешивание метакаолина с раствором NaOH 2–4 М, выдержка (созревание геля) при комнатной температуре для формирования зародышей кристаллов, с последующим гидротермальным синтезом в автоклавах при температуре 80–120 °С в течение 12–48 часов. По завершении синтеза полученный осадок промывается дистиллированной водой до нейтрального pH, фильтруется и высушивается [2; 11; 12; 20].

Результаты и обсуждение

В исследованиях, проведенных отечественными учеными Н.И. Файзуллаевым, И.И. Мамадолиевым и др., доказана возможность получения высококремнистых цеолитов и микропористых адсорбентов путем химической и термической активации алюмосиликатного сырья Узбекистана [10; 13]. На основе анализа литературы основные технологические параметры синтеза различных типов цеолитов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные технологические параметры синтеза различных типов цеолитов

Тип цеолита	Сыр-ье	Тем-ра прокаливания, °С	Конц. NaOH, М	Тем-ра кристаллизации, °С	Время, ч	Основное применение	Источ ник
LTA (Zeolite A)	Мета каолин	650–700	2–3	80–100	12-24	Умягчение воды, ионный обмен	[13]
NaA	Мета каолин	650–700	2–4	90–100	12-24	Адсорбент, детергенты	[4; 20]
NaX	Мета каолин	650–750	3–4	90–110	24-48	Разделение газов, адсорбция	[14; 23]
FAU (NaY)	Мета каолин	650–750	3–4	100–120	24-48	Катализ, нефтепереработка	[8; 24]
Содалит	Мета каолин	700–800	4–5	100–120	24-48	Сорбент, керамика	[12]

Из данных таблицы видно, что при синтезе различных типов цеолитов температура прокаливания, концентрация щелочи, температура кристаллизации и продолжительность процесса различаются. В частности, если цеолиты типов LTA и NaA образуются при относительно низких температурах, то для получения цеолитов типов FAU и NaX требуются более высокая температура и более длительное время кристаллизации [7; 10].

В научных изысканиях ученых Узбекистана [10; 12; 20] определены оптимальные режимы активации метакаолина и гидротермальной кристаллизации. В частности, указано, что температура метакаолинизации 600–7000 °C и время выдержки (созревания) 24–48 часов обеспечивают высокую степень кристалличности. При температуре гидротермальной кристаллизации 80–1000 °C образуются в основном цеолиты типа LTA и NaA, а при более высоких температурах — цеолиты типа FAU и NaX [12; 14].

Гидротермальный синтез является одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов получения микропористых адсорбентов из каолина [11]. При использовании данного метода каолин предварительно прокаливается с переводением в высокореакционноспособный метакаолин, после чего в щелочной среде при определенных температурах и давлении осуществляется гидротермальная кристаллизация. В результате образуются цеолитные материалы с упорядоченной микропористой алюмосиликатной структурой [2; 20].

Синтез микропористых цеолитных адсорбентов начинается с этапа измельчения и обогащения природного каолина. Обогащенный каолин прокаливается при температуре 650–700°C и переводится в фазу метакаолина. Полученный метакаолин смешивается с раствором NaOH до гомогенного состояния. Образовавшийся алюмосиликатный гель перед высокотемпературной гидротермальной кристаллизацией выдерживается (созревает) при комнатной температуре в течение определенного времени с целью формирования центров кристаллизации. Выдержанная смесь подвергается гидротермальной кристаллизации в автоклаве при температуре 80–120 °C. По завершении синтеза полученный осадок промывается дистиллированной водой до нейтрального значения pH среды, фильтруется и высушивается, в результате чего получается микропористый цеолитный адсорбент с высокой удельной поверхностью. Каждый из этих этапов напрямую влияет на кристаллическую структуру, объем пор и адсорбционные свойства образующегося цеолита [11; 12].

Концентрация NaOH определяет скорость растворения и перекристаллизации алюмосиликатов. В большинстве исследований раствор 2–4 М NaOH отмечается как наиболее оптимальная щелочная среда для синтеза цеолитов типов LTA и NaX [18; 11]. Вместе с тем температура гидротермальной кристаллизации также определяет тип синтезируемого цеолита. В интервале температур 80–1200°C зафиксировано образование цеолитов типов LTA и FAU с высокой степенью кристалличности [7]. Время кристаллизации обычно составляет 12–48 часов. Увеличение продолжительности процесса может повысить степень кристалличности, однако чрезмерное увеличение времени может привести к образованию вторичных фаз.

Цеолиты, синтезированные на основе каолина, обладают удельной поверхностью 300–800 м²/г, высоким объемом микропор и катионообменной емкостью [23; 3; 22]. Они показывают высокую эффективность при адсорбции ионов тяжелых металлов (Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺), ионов аммония, органических красителей и фармацевтических загрязнителей [22; 24; 20].

Каолин Султунувайс как местный минеральный ресурс является одним из перспективных видов сырья для синтеза микропористых адсорбентов гидротермальным методом. Согласно анализу литературных источников, после перевода минерала каолинита в метакаолин при высокой температуре его реакционная способность резко возрастает, что дает возможность получать различные цеолитные структуры в щелочной среде [2; 14; 16; 17; 19; 24]. Поэтому глубокое изучение минералогического и химического состава местных каолинов, а также оценка их пригодности для гидротермального синтеза имеют важное научное и практическое значение. По данным литературы, соотношение SiO₂–и Al₂O₃ в составе природных каолинов, а также содержание кварца, оксидов железа и других минеральных примесей оказывают существенное влияние на фазу синтезируемого цеолита, степень его кристалличности и адсорбционные свойства [6; 9]. С этой точки зрения целесообразно оценить минералогический состав каолина Султунувайс с помощью современных методов исследования, таких как рентгенофазовый анализ (XRD), рентгенофлуоресцентный анализ (XRF), электронная микроскопия (SEM) и инфракрасная спектроскопия (FTIR).

Выбор оптимальных параметров гидротермального синтеза также имеет важное значение. В частности, путем оптимизации температуры прокаливания, концентрации щелочи, соотношения Si/Al, температуры и продолжительности кристаллизации можно получить цеолиты типов LTA, NaA, NaX или FAU с высокой степенью кристалличности [10; 11]. Это создает возможность производства высококачественных микропористых адсорбентов на основе местного каолина. Производство цеолитов из местного каолина имеет важное значение и с экономической точки зрения. Во-первых, создается возможность производства импортозамещающей продукции местными адсорбентами. Во-вторых, повышается уровень переработки местного минерального сырья с получением продукции с высокой добавленной стоимостью. В-третьих, появляется возможность производства эффективных сорбентов для очистки воды от ионов тяжелых металлов, аммония, красителей и других загрязнителей [20; 21]. Наряду с этим, местные цеолитные адсорбенты могут широко применяться в нефтегазовой, химической, пищевой, фармацевтической промышленности и промышленности строительных материалов, а также в технологиях очистки атмосферного воздуха и промышленных сточных вод [3; 10]. Это служит расширению производства импортозамещающей и экспортоориентированной продукции в республике. В целом, обзор литературы показывает, что каолин Султунувайс является перспективным местным минеральным сырьем для получения микропористых цеолитных адсорбентов на основе гидротермального синтеза. Проведение в дальнейшем экспериментальных исследований на основе данного каолина, определение оптимальных режимов процесса синтеза и комплексная оценка физико-химических и адсорбционных свойств полученных материалов являются важной научной задачей.

Заключение

Обзор литературы показал, что природный каолин является эффективным и экономически целесообразным минеральным сырьем для гидротермального синтеза микропористых алюмосиликатных адсорбентов. Прокаливание каолина до метакаолина и оптимизация параметров гидротермального синтеза имеют решающее значение для получения цеолитов с высокой степенью кристалличности. Синтезированные микропористые адсорбенты отличаются высокой удельной поверхностью, развитой структурой пор и катионообменной способностью, а также могут эффективно применяться при очистке водной и газовой сред, в катализе и других технологических процессах. Проанализированные научные источники подтверждают, что местный каолин Султанувайс является перспективным минеральным сырьем для производства цеолитных адсорбентов с высокой добавленной стоимостью путем гидротермального синтеза. В дальнейшем представляется целесообразным глубокое изучение минералогических особенностей данного каолина, разработка оптимальных технологических режимов синтеза и экспериментальная оценка адсорбционных свойств полученных материалов.

Список литературы

1. Alaba P.A., Sani Y.M., Daud W.M.A.W. Kaolin-based zeolite synthesis: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Т. 78.
2. Babel S., Kurniawan T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review // *Journal of Hazardous Materials*. – 2003. – Т. 97, № 1.
3. Belviso C. State-of-the-art applications of natural zeolites // *Minerals*. – 2020. – Т. 10, № 7. – Art. 624. – P. 1–18.
4. Breck D.W. *Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use*. – New York: John Wiley & Sons, 1974. – 771 P.
5. Čejka J., Corma A., Zones S. *Zeolites and Catalysis: Synthesis, Reactions and Applications*. – Weinheim: Wiley-VCH, 2010. – 864 P.
6. Chandrasekhar S., Pramada P.N. Synthesis of zeolite A from metakaolin // *Applied Clay Science*. – 2008. – Т. 41, № 1.
7. Cundy C.S., Cox P.A. The hydrothermal synthesis of zeolites // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2005. – Т. 82, № 1.
8. Cundy C.S., Cox P.A. The hydrothermal synthesis of zeolites: History and development from the earliest days to the present time // *Chemical Reviews*. – 2003. – Т. 103, № 3.
9. Eshmetov I.D., Abdurakhimov S.A., Rakhimov E.B. Production of effective adsorbents based on local mineral raw materials and their application in purification processes // *Uzbek Chemical Journal*. – 2021. – № 3.
10. Fayzullaev N.I., Mamadoliev I.I. Obtaining high-silicon zeolites from kaolin // *Universum: технические науки*. – 2020. – № 10.

11. Fayzullaev N.I., Mamadoliev I.I., Pardaeva S.B. Synthesis of High Silicon Zeolites From Kaolin and Bentonite // Technological Advancement in Industrial and Intellectual Research. – 2021. – T. 2, № 1.
12. Flanigen E.M. Zeolites and molecular sieves: An historical perspective // Studies in Surface Science and Catalysis. – 2001. – T. 137.
13. Hartati H., Nur H., Mohamad H. Synthesis of zeolites from natural kaolin: A review // Materials Today: Proceedings. – 2020. – T. 31.
14. He H., Guo J., Xie X. Thermal activation of kaolinite into metakaolin and its structural evolution // Applied Clay Science. – 2013. – T. 73.
15. Johnson E.B.G., Arshad S.E. Hydrothermally synthesized zeolites based on kaolinite: A review // Applied Clay Science. – 2014. – T. 97.
16. Kucharov H.H., Rakhmatov A.M., Zhuraev U.O. Enrichment of local kaolins and study of their physicochemical properties // Chemistry and chemical technology. – 2022. – № 2.
17. Mozgawa W. The influence of structure on FTIR spectra of zeolites // Journal of Molecular Structure. – 2001. – T. 596, № 1.
18. Murray H.H. Applied clay mineralogy: Occurrences, processing and application of kaolins // Developments in Clay Science. – 2007. – T. 2. – P. 85–109.
19. Ouki S.K., Kavannagh M. Treatment of metals-contaminated wastewaters using natural zeolites // Water Science and Technology. – 1997. – T. 35, № 7.
20. Rakhimov A.A., Sodikov M.M. Synthesis of zeolites from aluminosilicate raw materials and determination of their sorption capacity // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. – 2023. – № 4.
21. Visa M. Synthesis and characterization of new zeolite materials obtained from fly ash for heavy metals removal // Powder Technology. – 2016. – T. 294.
22. Wang S., Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment // Chemical Engineering Journal. – 2010. – T. 156, № 1.
23. Zdretsov I., Gerasimov A. Hydrothermal synthesis of zeolites from kaolin: Recent advances and future prospects // Ceramics International. – 2024. – T. 50, № 10.
24. Zhang Y., Wang J., Li H. Adsorption of ciprofloxacin from aqueous solution using zeolite A synthesized from kaolin // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – T. 12, № 1. – Art. 111820.