

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ХИМИЯ

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 07.08.2026

Статья принята к публикации: 14.08.2026

Статья опубликована: 07.09.2026

УДК 546.11+549.67+661.183

DOI: 10.32743/UniChem.2026.147.9.23317

Синтез NaL цеолита на основе алюмосиликатного сырья

Абдурахмонов Элдор Баратович

д-р хим. наук, Термезский государственный педагогический институт

Республика Узбекистан, г. Термез

E-mail: eldor011085@gmail.com

Турабов Баходир Аликул угли

ассистент-преподаватель

Андижанский государственный технический институт

Республика Узбекистан, г. Андижан

E-mail: bahodir01011992@gmail.com

Худайбергенов Мансур Сабуирович

PhD, доц.

Чирчикский государственный педагогический университет

Республика Узбекистан, г. Чирчик

E-mail: turabovbahodir99@gmail.com

Synthesis of NaL zeolite based on aluminosilicate raw materials

Abdurakhmonov Eldor Baratovich

doctor of Chemical Sciences

Termez State Pedagogical Institute

Republic of Uzbekistan, Termez

Bahodir Aliqul ugli Turabov

Assistant, Lecturer

Andijan State Technical Institute

Republic of Uzbekistan, Andijan

Khudayberganov Mansur Saburovich

PhD, Associate Professor

Chirchik State Pedagogical University

Republic of Uzbekistan, Chirchik

Аннотация

В статье представлены результаты получения цеолита NaL гидротермальным методом с использованием алюмосиликатного сырья. В качестве исходного алюмосиликатного компонента использовали каолин, предварительно переведённый в метакаолин посредством термической активации, а дополнительным источником кремния служило жидкое стекло. Рассмотрена последовательность подготовки сырья, формирования реакционной смеси и гидротермальной кристаллизации. Согласно технологической схеме, исходные компоненты после предварительной щелочной обработки смешивали с метакаолином и жидким стеклом, после чего реакционную смесь подвергали гидротермальной обработке при 160–175 °С в течение 48 часов. Полученный твёрдый продукт отделяли фильтрованием и прокаливали при 450 °С в течение 12 часов. Для оценки структурных особенностей синтезированного материала использовали ИК-спектроскопию и рентгенофазовый анализ. ИК-спектр характеризуется полосами, связанными с колебаниями гидроксильных групп, молекул воды и алюмосиликатного каркаса, а рентгенограмма содержит выраженные дифракционные максимумы, указывающие на формирование кристаллической цеолитной фазы L-типа. Полученные результаты подтверждают перспективность использования местного алюмосиликатного сырья для получения NaL-цеолита.

Abstract

The article presents the results of obtaining NaL zeolite by a hydrothermal method using aluminosilicate raw materials. Kaolin, preliminarily converted into metakaolin by thermal activation, was used as the main aluminosilicate component, while liquid glass served as an additional silicon source. The sequence of raw-material preparation, reaction-mixture formation, and hydrothermal crystallization was considered. According to the technological scheme, the initial components were subjected to alkaline treatment and mixed with metakaolin and liquid glass, followed by hydrothermal treatment at 160–175 °C for 48 h. The resulting solid product was

Библиографическое описание: Абдурахмонов Э.Б., Турабов Б.А.У., Худайбергенов М.С. Синтез NaL цеолита на основе алюмосиликатного сырья // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 9(147). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23317>

separated by filtration and calcined at 450 °C for 12 h. Infrared spectroscopy and X-ray diffraction were used to characterize the structural features of the synthesized material. The IR spectrum contains bands associated with hydroxyl groups, water molecules, and vibrations of the aluminosilicate framework, whereas the X-ray diffraction pattern contains pronounced reflections indicating the formation of a crystalline L-type zeolitic phase. The results confirm the potential of local aluminosilicate raw materials for the preparation of NaL zeolite.

Ключевые слова: цеолит NaL, алюмосиликатное сырьё, каолин, метакaoлин, гидротермальный синтез, кристаллизация, адсорбент.

Keywords: NaL zeolite, aluminosilicate raw materials, kaolin, metakaolin, hydrothermal synthesis, crystallization, adsorbent.

Введение

В настоящее время разработка эффективных микропористых материалов на основе доступного минерального сырья является одним из актуальных направлений физической химии и технологии адсорбентов. Особый интерес представляют цеолиты, поскольку их регулярная микропористая структура, развитая внутренняя поверхность и наличие компенсирующих катионов определяют способность к селективной адсорбции и ионному обмену. Благодаря этим свойствам цеолитные материалы применяются в процессах осушки и разделения газов, очистки технологических потоков, катализа, ионного обмена и очистки воды [5; 6].

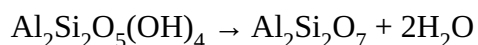
Цеолиты L-типа отличаются характерной структурой с одномерной системой каналов, образованных 12-членными кислородными кольцами. В NaL-форме отрицательный заряд алюмосиликатного каркаса компенсируется катионами натрия. Такое строение обуславливает доступность внутрикристаллического пространства для молекул адсорбата и определяет молекулярно-ситовые и адсорбционные свойства материала [1].

Формирование цеолитной фазы при гидротермальном синтезе связано с последовательным растворением и перестройкой исходных алюмосиликатных компонентов. Термическая активация каолина приводит к дегидроксилированию и образованию метакaoлина, структура которого характеризуется более высокой реакционной способностью по сравнению с исходным кристаллическим каолином. В щелочной среде компоненты метакaoлина переходят в более реакционноспособное состояние, после чего при гидротермальной обработке происходят зародышеобразование и рост кристаллов цеолитной фазы [2].

Материалы и методы

Целью исследования являлось получение NaL-цеолита на основе алюмосиликатного сырья и установление структурных признаков образующегося материала по данным ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа.

Образцы и методы исследования: в качестве алюмосиликатного сырья использовали каолин (рис. 1), который подвергали термической активации с целью разрушения исходной упорядоченной структуры и удаления структурных гидроксильных групп. При нагревании каолин претерпевает дегидроксилирование по общей схеме:



В результате образуется метаколин — более реакционноспособная форма алюмосиликатного сырья. Полученный метаколин измельчали и использовали на последующей стадии гидротермального синтеза. Жидкое стекло применяли как источник кремния. Подготовку реакционной смеси и последовательность технологических операций осуществляли в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.

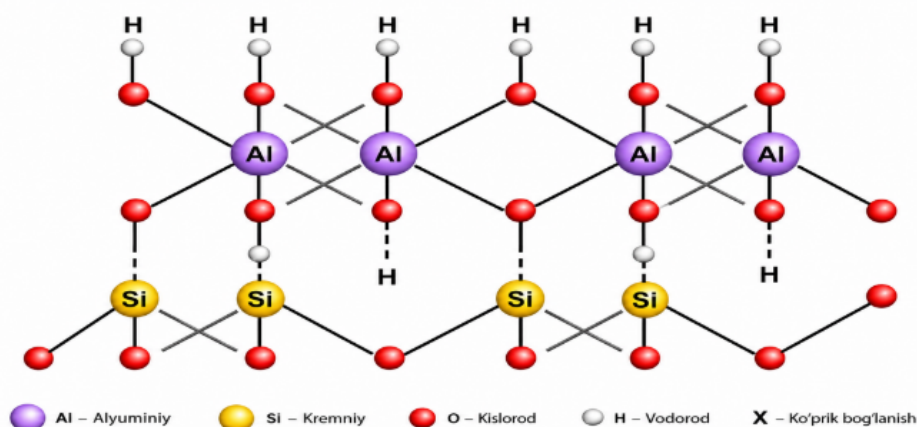


Рисунок 1. Структура каолина

На схеме показана слоистая организация алюмосиликатной структуры с участием тетраэдрически координированных атомов алюминия и кремния и атомов кислорода. Наличие гидроксильных групп в исходной структуре обуславливает необходимость термической активации перед гидротермальным синтезом. При нагревании происходит дегидроксилирование и переход каолина в метаколин, что повышает доступность алюмосиликатных компонентов для последующей щелочной обработки [4; 3].

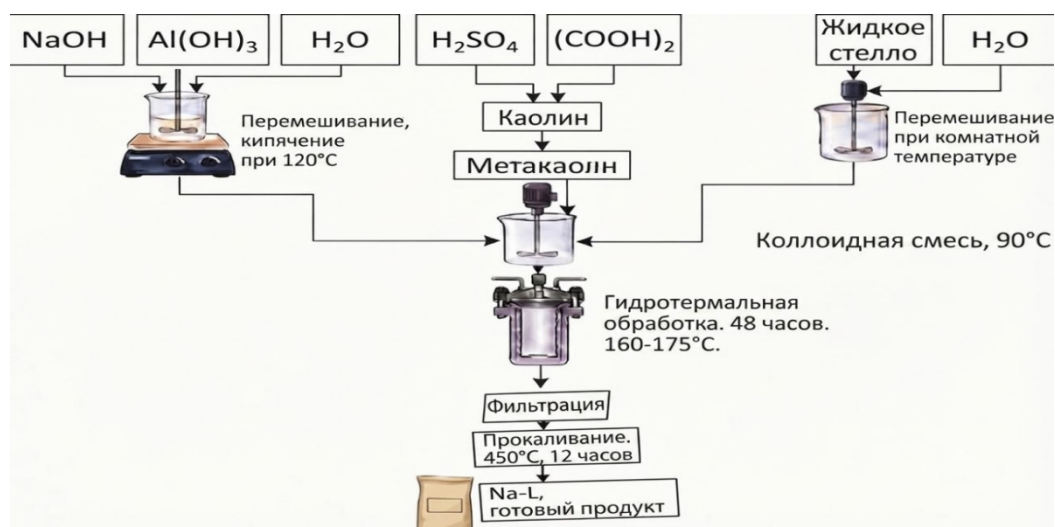


Рисунок 2. Технологическая схема получения NaL-цеолита

Согласно технологической схеме, предварительно подготовленный каолин переводили в метакаолин. Параллельно осуществляли подготовку щелочной компоненты и алюминиевого источника; после этого компоненты объединяли с метакаолином и жидким стеклом. Полученную реакционную смесь перемешивали при повышенной температуре, после чего формировали коллоидную реакционную систему. Гидротермальную обработку проводили в течение 48 часов при 160–175 °С. После завершения синтеза твёрдый продукт отделяли фильтрованием, а затем подвергали прокаливанию при 450 °С в течение 12 часов. Такая последовательность операций обеспечивает переход исходных алюмосиликатных компонентов в кристаллическую цеолитную фазу.

При подготовке продукта после гидротермальной стадии необходимо удалять свободную щёлочь и водорастворимые компоненты промывкой дистиллированной водой до состояния, близкого к нейтральному. Последующая сушка и термическая обработка обеспечивают получение образца, пригодного для структурно-аналитических исследований.

Результаты и обсуждения

Эффективность получения NaL-цеолита оценивали по результатам ИК-спектроскопического и рентгенофазового анализа. Совокупность этих методов позволяет установить наличие характерных функциональных групп и оценить формирование упорядоченной алюмосиликатной кристаллической структуры.

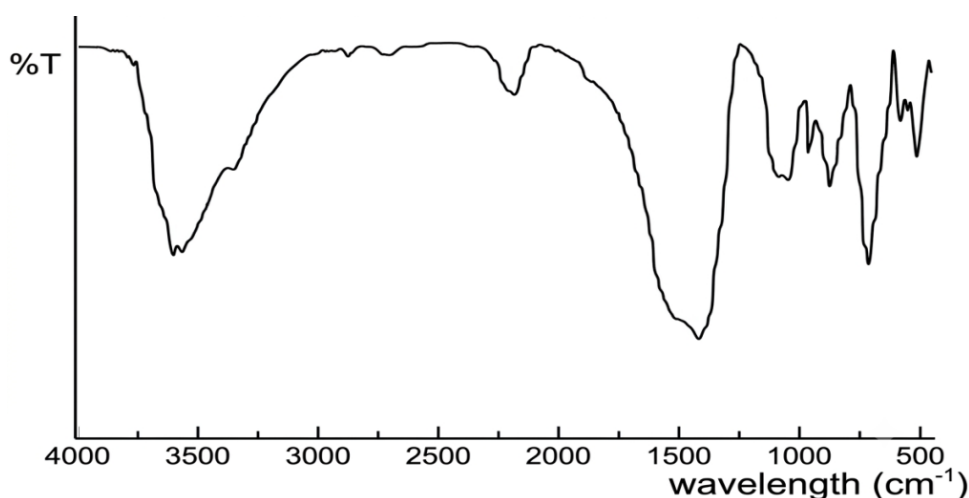


Рисунок 3. ИК-спектр синтезированного цеолита NaL

На ИК-спектре наблюдается широкая интенсивная полоса в области около 3600–3200 см⁻¹, которая может быть связана преимущественно с валентными колебаниями О–Н-групп и адсорбированной воды. Полоса в области около 1650 см⁻¹ соответствует деформационным колебаниям молекул воды. Интенсивная область поглощения в интервале примерно 1200–900 см⁻¹ обусловлена колебаниями связей Si–O–Si и Si–O–Al алюмосиликатного каркаса. Дополнительные полосы в низкочастотной области относятся к деформационным и скелетным колебаниям алюмосиликатной структуры. Наличие совокупности этих полос согласуется с формированием гидратированного алюмосиликатного материала цеолитного типа.

Следует отметить, что для ИК-спектроскопии корректнее использовать термин «волновое число», а не «длина волны», поскольку ось спектра на рисунке 3 выражена в см^{-1} . Поэтому обозначение оси следует приводить как «Волновое число, см^{-1} ». В результате гидротермальной обработки исходной смеси, приготовленной на основе метакаолина и жидкого стекла, наблюдалось образование кристаллической алюмосиликатной фазы. На начальной стадии процесса под воздействием щелочной среды происходит частичное разрушение связей Si–O–Al в составе метакаолина и переход алюмосиликатных компонентов в раствор [8; 7].

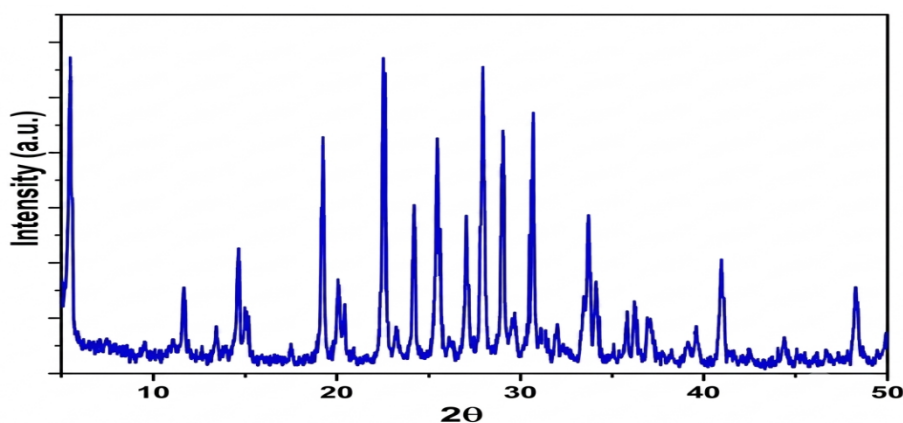


Рисунок 4. Рентгенограмма синтезированного цеолита NaL

Рентгенограмма характеризуется рядом выраженных дифракционных максимумов в диапазоне 2θ примерно от 5 до 50° . Наиболее интенсивные рефлексы наблюдаются в низко- и среднеугловой областях, что свидетельствует о наличии упорядоченной кристаллической составляющей. Согласно исходным данным исследования, совокупность наблюдаемых рефлексов соответствует формированию цеолитной фазы L-типа. Наличие достаточно узких и интенсивных максимумов указывает на значительную степень кристаллического упорядочения по сравнению с аморфным алюмосиликатным материалом.

Формирование кристаллической фазы можно связать с последовательным растворением реакционноспособных компонентов метакаолина в щелочной среде, переносом алюминиевых и кремниевых структурных единиц в реакционную среду и их последующей реорганизацией при гидротермальной обработке. При повышенной температуре и продолжительном времени выдержки создаются условия для зародышеобразования и роста кристаллов. Таким образом, режим 160–175 °C в течение 48 часов, представленный в технологической схеме, обеспечивает условия, при которых перестройка исходной алюмосиликатной системы сопровождается формированием кристаллической цеолитной фазы.

Важным фактором является также состав исходной реакционной смеси. Соотношение кремниевого и алюминиевого компонентов, щелочность среды, содержание воды и температура определяют скорость растворения исходных фаз и направление последующей кристаллизации. Поэтому получение NaL-цеолита следует рассматривать как результат согласованного действия состава реакционной смеси и гидротермального режима, а не отдельного технологического параметра.

Сопоставление данных ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа показывает согласованную картину: ИК-спектр подтверждает наличие алюмосиликатного каркаса и гидратированной структуры, тогда как рентгенограмма свидетельствует о формировании кристаллически упорядоченной фазы. Вместе эти результаты подтверждают получение материала цеолитного типа на основе использованного алюмосиликатного сырья.

Заключение

В работе рассмотрена возможность получения NaL-цеолита гидротермальным методом с использованием алюмосиликатного сырья. Предварительная термическая активация каолина обеспечивает его переход в метакаолин с повышенной реакционной способностью, что создаёт благоприятные условия для последующего взаимодействия алюмосиликатных компонентов в щелочной среде.

Согласно технологической схеме, сформированную реакционную смесь подвергали гидротермальной обработке при 160–175 °С в течение 48 часов, после чего продукт отделяли фильтрованием и прокаливали при 450 °С в течение 12 часов. ИК-спектроскопические данные характеризуются полосами, соответствующими гидроксильным группам, воде и колебаниям алюмосиликатного каркаса. Рентгенограмма содержит выраженные дифракционные максимумы, согласующиеся с формированием кристаллической цеолитной фазы L-типа.

Полученные результаты показывают перспективность использования местного алюмосиликатного сырья для синтеза NaL-цеолита. Для дальнейшего количественного определения степени кристалличности и фазовой чистоты целесообразно сопоставить экспериментальную рентгенограмму с эталонной дифрактограммой NaL/LTL и выполнить расчёт относительной кристалличности по выбранной методике.

Список литературы

1. Абдухаев А.Б., Ергашев О.К., Тошматова Б.А. Синтез цеолита А из комплексно очищенного Ангренского каолина // *Universum: химия и биология*. – 2026. – № 5. – DOI: 10.32743/UniChem.2026.143.5.22703.
2. Арипова М.Х., Кадиров О.Ш., Тиллаев С.У., Рузиева Ф.О. Получение синтетических цеолитов на основе местного сырья // *Universum: химия и биология*. – 2023. – № 11. – DOI: 10.32743/UniChem.2023.113.11.16095.
3. Арипова М.Х., Кадиров О.Ш., Тиллаев С.У., Файзиева Ф.М., Худайназаров Ж.О., Рузиева Ф.О. Получение низкомодульных синтетических цеолитов на основе местного сырья // *Universum: химия и биология*. – 2022. – № 2. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/12967> (дата обращения: 22.08.2026).
4. Мамадолиев И.И., Файзуллаев Н.И., Юсупова С.С. Текстульные свойства высококремниевых цеолитов, полученные из Навбахорского бентонита // *Universum: химия и биология*. – 2021. – № 10. URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/12355> (дата обращения: 23.08.2026).

5. Мухаммаджонов М.М., Ойдинов М.Х., Диметова Ф.Д., Рахматкариева Ф.Г. Физико-химический анализ цеолита КА, полученного на основе каолина марки АКФ-78 // *Universum: химия и биология*. – 2025. – № 5(131). – DOI: 10.32743/UniChem.2025.131.5.19940.
6. Ойдинов М.Х., Каюмов А.А. Синтез NaX цеолита на основе Ангренского каолина и анализ в ИК-спектре // *Universum: химия и биология*. – 2025. – № 7. – DOI: 10.32743/UniChem.2025.133.7.20476.
7. Тураборов В.А. L zeolitining kristall o'lchamini boshqarish // *Социальные науки в современном мире*. – 2026. – № 5. URL: <https://www.in-academy.uz/index.php/ZDIF/article/view/54280> (дата обращения: 14.08.2026).
8. Turabov B.A., Xudoyberganov M.S., Abduraxmonov E.B. NaL seolitida n-geksan adsorbsiya entropiyasi // “Mahalliyashtirishda innovatsion yondashuvlar” xalqaro konferensiya materiallari to'plami. – 2023.

References

1. Abdukhaev A.B., Ergashev O.K., Toshmatova B.A. [Synthesis of zeolite A from complexly purified Angren kaolin] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2026. – № 5. – DOI: 10.32743/UniChem.2026.143.5.22703. (In Russ.)
2. Aripova M.Kh., Kadirov O.Sh., Tillaev S.U., Ruzieva F.O. [Obtaining synthetic zeolites based on local raw materials] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2023. – № 11. – DOI: 10.32743/UniChem.2023.113.11.16095. (In Russ.)
3. Aripova M.Kh., Kadirov O.Sh., Tillaev S.U., Fajzieva F.M., Khudajnazarov Zh.O., Ruzieva F.O. [Obtaining low-modulus synthetic zeolites based on local raw materials] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2022. – № 2. (In Russ.)
4. Mamadoliyev I.I., Fajzullaev N.I., Yusupova S.S. [Textural properties of high-silica zeolites obtained from Navbahor bentonite] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2021. – № 10. (In Russ.)
5. Mukhammadzhonov M.M., Ojdinov M.Kh., Dimetova F.D., Rakhmatkarieva F.G. [Physico-chemical analysis of zeolite KA obtained based on kaolin grade AKF-78] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2025. – № 5. – DOI: 10.32743/UniChem.2025.131.5.19940. (In Russ.)
6. Ojdinov M.Kh., Kayumov A.A. [Synthesis of NaX zeolite based on Angren kaolin and analysis by IR spectroscopy] // *Universum: khimiya i biologiya*. – 2025. – № 7. – DOI: 10.32743/UniChem.2025.133.7.20476. (In Russ.)
7. Turaborov V.A.B.A.Turabov. [Control of crystal size in L zeolite. Social Sciences in the Modern World 5(16), (2026). 4–6] – URL: <https://www.in-academy.uz/index.php/ZDIF/article/view/54280>. (accessed 04.09.2026). (In Russ.)
8. Turarov V.A., Khudoibergenov M.S., Abdurakhmonov E.V. Turabov B.A. [M.S. Khudoyberganov; E.B. Abdurakhmonov Entropy of n-hexane adsorption on NaL zeolite // Proceedings of the international conference «Innovative approaches in localization». – 2023. (In Russ.)