Статья поступила в редакцию: 10.10.2026
Статья принята к публикации: 17.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 544.723+549.67

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23573

Физико-химический анализ структурных и пористых характеристик натриевой и цинковой форм

Комолова Гульнора Комиловна
базовый докторант
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: gulnorakomolova26@gmail.com

Юсупова Лола Азимовна
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: lolayusupova111@gmail.com

Исмаилов Бобурбек Махмуджанович
д-р филос. в обл. техн. наук, PhD, доц.
кафедра Химическая технология переработки нефти и газа, Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: boburbek.89@mail.ru

Physicochemical analysis of the structural and porous characteristics of the sodium and zinc forms

Komolova Gulnora
Basic doctoral student
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Yusupova Lola
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Ismailov Boburbek
doctor of Philosophy in Technical Sciences, PhD, Associate Professor
Department of Chemical technology of oil and gas refining, Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Комолова Г.К., Юсупова Л.А., Исмаилов Б.М. Физико-химический анализ структурных и пористых характеристик натриевой и цинковой форм // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23573

Аннотация

В статье представлены результаты сравнительного исследования натриевой и цинковой форм цеолита с использованием комплекса физико-химических методов анализа. Цель работы заключается в установлении взаимосвязи между катионным составом, структурными характеристиками и параметрами пористой системы исследуемых алюмосиликатных материалов. Для исследования использованы данные рентгенофазового анализа (XRD), инфракрасной Фурье-спектроскопии (FTIR), низкотемпературной адсорбции–десорбции азота, рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (SEM–EDS и TEM–EDS), а также термического анализа (TGA/DTA). По результатам многоточечного метода Брунауэра–Эммета–Теллера удельная поверхность натриевого образца составляет 12,681 м²/г, а цинкового — 21,633 м²/г. Таким образом, для исследованного цинксодержащего образца установлено увеличение удельной поверхности приблизительно на 70,6 %. Площадь микропористой поверхности, рассчитанная методом t-графика, увеличивается с 3,513 до 13,797 м²/г, а объём микропор — с 0,001628 до 0,006612 см³/г. По данным FTIR, основная полоса колебаний алюмосиликатного каркаса смещается с 989 до 991 см$^{-1}$, тогда как полоса валентных колебаний O–H — с 3373 до 3358 см$^{-1}$. Сохранение основных спектральных особенностей и характерных дифракционных максимумов свидетельствует о сохранении признаков кристаллической цеолитной структуры после введения цинка. Результаты XRF, SEM–EDS и TEM–EDS подтверждают присутствие цинка в исследуемом образце, хотя количественные значения содержания элемента различаются в зависимости от метода анализа. Полученные результаты показывают, что цинксодержащая форма характеризуется более высокими значениями удельной поверхности и расчётных параметров микропористости. При этом интерпретация различий требует учёта фазового состава, условий гидратации и особенностей применённых методов измерения. Установленные закономерности представляют интерес для дальнейшей оценки возможности применения модифицированных цеолитов в процессах адсорбции, разделения газов и катализа.

Abstract

This paper presents a comparative study of sodium and zinc forms of zeolite using a comprehensive set of physicochemical characterization methods. The aim was to evaluate the relationship between cation composition, structural characteristics, and pore-system parameters of the investigated aluminosilicate materials. The study draws on X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), nitrogen adsorption–desorption, X-ray fluorescence analysis (XRF), scanning and transmission electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (SEM–EDS and TEM–EDS), and thermogravimetric and differential thermal analysis (TGA/DTA). According to the multipoint Brunauer–Emmett–Teller method, the specific surface area of the sodium sample is 12.681 m²/g, compared with 21.633 m²/g for the zinc-containing sample, corresponding to an increase of approximately 70.6 %. The microporous surface area calculated using the t-plot method increases from 3.513 to 13.797 m²/g, while the micropore volume increases from 0.001628 to 0.006612 cm³/g. FTIR analysis shows a shift in the main aluminosilicate framework band from 989 to 991 cm^{-1} and a shift in the O–H stretching band from 3373 to 3358 cm^{-1}. The retention of the principal spectral features and characteristic diffraction maxima indicates

that the zinc-containing sample retains important features of a crystalline zeolitic structure. XRF, SEM–EDS, and TEM–EDS results support the presence of zinc, although the reported concentrations differ between analytical techniques. The findings indicate that the zinc-containing sample exhibits higher specific surface area and calculated microporosity parameters. However, these differences must be interpreted in conjunction with phase composition, hydration state, and the limitations of the individual analytical methods. The results provide a basis for further investigation of modified zeolites for adsorption, gas separation, and catalytic applications.

Ключевые слова: цеолит, натриевая форма, цинковая форма, ионный обмен, рентгенофазовый анализ, ИК-Фурье-спектроскопия, удельная поверхность, микропористость, адсорбция азота, алюмосиликатный каркас.

Keywords: zeolite, sodium form, zinc form, ion exchange, X-ray diffraction, FTIR spectroscopy, specific surface area, microporosity, nitrogen adsorption, aluminosilicate framework.

Введение

Цеолиты представляют собой кристаллические алюмосиликаты с развитой системой каналов и полостей, размеры которых определяются особенностями пространственной организации тетраэдров кремния и алюминия. Благодаря регулируемой пористой структуре, способности к катионному обмену и наличию внутренних активных центров цеолиты широко рассматриваются как перспективные материалы для адсорбционных, разделительных и каталитических процессов. Их функциональные характеристики зависят от типа кристаллического каркаса, соотношения кремния и алюминия, природы компенсирующих катионов, степени гидратации и условий предварительной обработки [5, 9, 10]. Одним из наиболее распространённых способов модифицирования цеолитов является замещение исходных катионов другими катионами посредством ионного обмена. Такой подход позволяет изменять локальное электрическое поле внутри пор, распределение адсорбционных центров и взаимодействие поверхности с молекулами адсорбата. При этом изменение катионного состава не обязательно сопровождается разрушением основного алюмосиликатного каркаса [6, 7, 1, 3]. В зависимости от природы катиона, условий обработки и исходной структуры могут изменяться положение молекул воды, доступность отдельных пор, параметры элементарной ячейки и измеряемые адсорбционные характеристики. Особый интерес представляет сравнение натриевой и цинковой форм цеолита. Ионы натрия участвуют в компенсации отрицательного заряда алюмосиликатного каркаса, тогда как введение цинка может изменять локальные взаимодействия внутри пористой системы. Потенциальные изменения проявляются в результатах спектроскопических исследований, рентгенофазового анализа и измерения удельной поверхности. Однако увеличение измеряемой площади поверхности не следует рассматривать как прямое доказательство образования новых пор: оно также может быть связано с изменением доступности существующих пор, степени гидратации, состояния агломератов или особенностей предварительной обработки образца. Для корректной интерпретации таких изменений необходимо использовать взаимодополняющие методы анализа. Рентгенофазовый анализ позволяет оценивать кристаллическую структуру и фазовый состав. ИК-Фурье-спектроскопия используется для исследования колебаний

связей в алюмосиликатном каркасе и взаимодействий с водой. Адсорбция азота при низкой температуре даёт возможность оценивать удельную поверхность и характеристики пористой системы. Рентгенофлуоресцентный анализ характеризует валовой элементный состав, а электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией позволяет исследовать морфологию и локальный элементный состав. Термический анализ, в свою очередь, используется для изучения изменения массы и тепловых эффектов при нагревании. Актуальность комплексного подхода заключается в том, что отдельный метод не позволяет исчерпывающе описать состояние модифицированного цеолита. Например, обнаружение цинка в составе образца подтверждает его присутствие, но не устанавливает однозначно положение атомов цинка в структуре [4, 2]. Аналогично сохранение характерных дифракционных максимумов указывает на сохранение кристаллического порядка, но само по себе не доказывает полного отсутствия структурных изменений.

Цель работы. Целью настоящей работы является сравнительная оценка физико-химических, структурных и пористых характеристик исследованных натриевого (Na) и цинксодержащего (Zn) образцов цеолита, направленная на выявление взаимосвязей между их катионным и фазовым составом, особенностями алюмосиликатного каркаса, состоянием гидратации и доступностью пористой системы. Для достижения этой цели предусматривается комплексное сопоставление результатов рентгенофазового анализа (XRD), ИК-Фурье-спектроскопии (FTIR), низкотемпературной адсорбции–десорбции азота с расчётом параметров BET и t-plot, рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (SEM–EDS и TEM–EDS) и термического анализа (TGA/DTA). Особое внимание уделяется оценке сохранности кристаллических признаков цеолита, различий в удельной поверхности и расчётных характеристиках микропористости, а также разграничению наблюдаемых экспериментальных различий и возможных причин их возникновения с учётом фазового состава, гидратации и условий подготовки образцов.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись два архивных образца цеолита, обозначенные в исходных материалах как Na и Zn. Образец Na рассматривался как натриевая форма, а образец Zn — как цинксодержащая форма материала. Согласно приведённым результатам рентгенофазового анализа, натриевый образец преимущественно идентифицирован как цеолит X с небольшой долей цеолита A. Для цинксодержащего образца представлены варианты идентификации цинксодержащих фаз цеолита X и миноритарной фазы цеолита A. При интерпретации результатов следует учитывать, что образцы различаются не только обозначенным катионным составом, но потенциально могут отличаться фазовым соотношением, гидратацией и историей предварительной обработки. Поэтому выявленные различия корректно описывать как различия между исследованными образцами Na и Zn. Для строгого доказательства причинной связи между ионным обменом и изменениями характеристик требуется подтверждение одинакового исходного материала и документирование процедуры модифицирования.

Использованные методы анализа. В работе использованы результаты следующих методов:

• **XRD** — исследование кристаллической структуры, положения дифракционных максимумов и фазового состава.

• **FTIR** — определение характерных полос колебаний O–H, H–O–H и связей алюмосиликатного каркаса.

• **Адсорбция–десорбция азота** — оценка удельной поверхности методом BET и характеристик пористой системы с использованием t-метода, DFT и BJH.

• **XRF** — оценка валового элементного и оксидного состава.

• **SEM–EDS** — исследование морфологии частиц и локального элементного состава.

• **TEM–EDS** — исследование ультраструктуры и локального элементного состава в исследуемых областях.

• **TGA/DTA** — анализ изменения массы и тепловых эффектов при нагревании [8].

Согласно отчёту, измерения адсорбции азота проводились на анализаторе Autosorb iQ при температуре 77,35 K. Перед измерениями образцы дегазировали при 200 °C в течение 1,6 ч. Масса натриевого образца составляла 0,1227 г, цинкового — 0,1086 г. Для расчёта многоточечной удельной поверхности BET использовался диапазон относительного давления $P/P_0 = 0,051–0,251$. Указанные условия являются существенными для сопоставления результатов, поскольку степень дегазации и удаления адсорбированной воды может влиять на доступность пор и величины, получаемые при адсорбционных измерениях.

Принципы обработки и интерпретации данных. Для сравнения адсорбционных характеристик использовали абсолютные значения параметров, приведённые в отчёте, и относительное изменение показателя для образца Zn по сравнению с Na:

$$\Delta X = \frac{X_{Zn} - X_{Na}}{X_{Na}} \times 100\%.$$

Этот показатель характеризует относительное различие между двумя образцами, но не является оценкой статистической значимости. Поскольку сведения о числе независимых повторных измерений и доверительных интервалах адсорбционных параметров не представлены, результаты рассматриваются как сравнительные значения измеренных образцов. Методы BET, t-plot, DFT и BJH характеризуют различные аспекты пористой структуры и основаны на разных моделях. Поэтому их результаты не следует непосредственно отождествлять. В частности, метод BET используется для оценки удельной поверхности, t-метод позволяет разделять условный вклад микропористой и внешней поверхности, DFT применяется для моделирования распределения пор, а BJH обычно используют для оценки мезопористой составляющей в пределах применимости выбранной модели [10, 9].

Результаты и их обсуждение

Результаты рентгенофазового анализа. Сравнение дифракционных картин. На рисунке 1 представлены нормированные дифрактограммы натриевой и цинксодержащей форм цеолита. В обоих образцах отмечаются дифракционные максимумы приблизительно

при 7,45°, 12,82–12,83°, 17,60–17,65°, 20,91°, 25,85° и около 30°. Дополнительные интенсивные особенности присутствуют в области 34,4° для натриевого образца и около 43,3° для цинксодержащего образца.

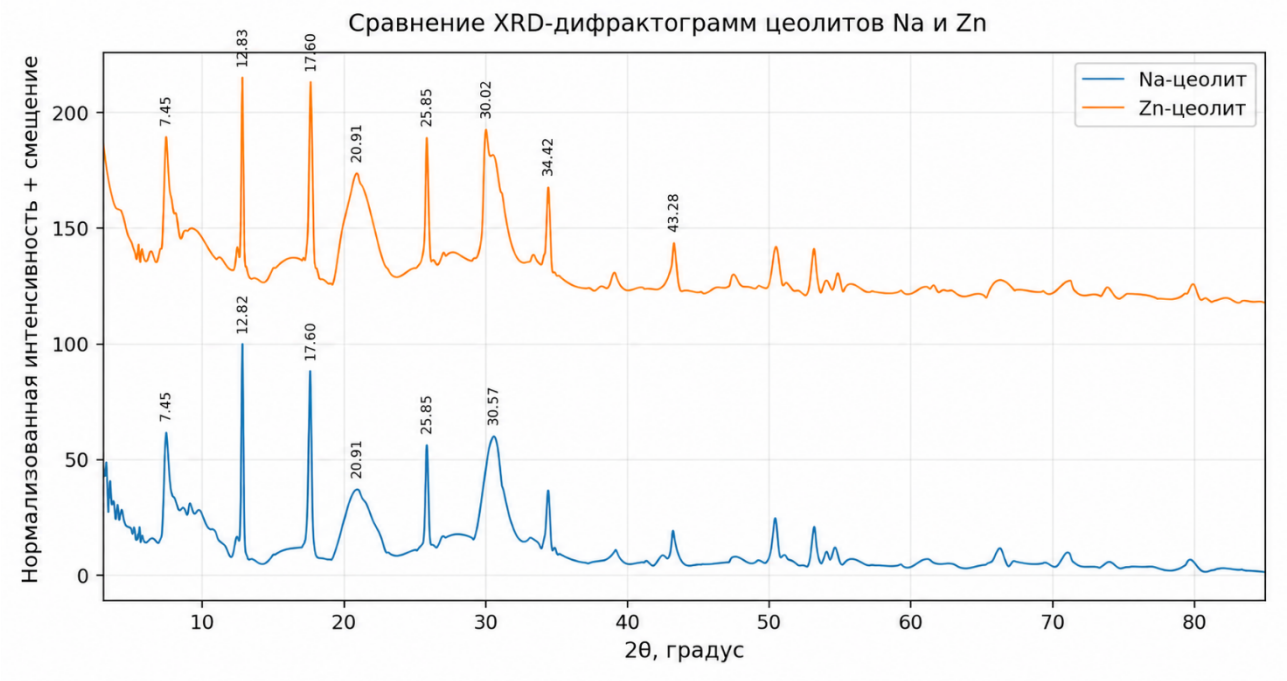


Рисунок 1. Сравнение нормированных дифрактограмм натриевой и цинковой форм цеолита

Сохранение ряда характерных дифракционных максимумов указывает на то, что оба образца содержат кристаллическую составляющую. В цинксодержащем образце сохраняются положения нескольких основных пиков, присутствующих в натриевом образце. При этом наблюдаются различия в относительной интенсивности и форме отдельных максимумов. Такие различия могут быть обусловлены несколькими факторами: изменением катионного состава, различной степенью гидратации, перераспределением интенсивности между фазами, текстурной ориентацией кристаллитов и особенностями подготовки образцов. При сравнении нормированных дифрактограмм необходимо учитывать, что нормирование изменяет относительное представление интенсивностей и не позволяет напрямую определять абсолютное количество кристаллической фазы. Следовательно, сходство положений основных максимумов согласуется с сохранением существенных элементов кристаллической структуры после модифицирования, но для количественной оценки структурных изменений необходимо дополнительно анализировать исходные дифракционные данные, фон, ширину пиков и параметры использованной модели уточнения.

Результаты фазовой идентификации

В отчёте приведены следующие результаты уточнения фазового состава.

Таблица 1. Фазовый состав по данным XRD/WPPF согласно исходному отчёту

Образец	Идентифицированная фаза	Массовая доля, %	Параметр решётки, Å
Na	Na-цеолит X, обезвоженный	89,5 ± 0,2	25,76530
Na	Na-цеолит A, обезвоженный	10,4 ± 0,2	12,19334
Na	Na-цеолит X, обменённый, следовая фаза	0,05 (оценка отчёта)	25,63613
Na	Na-цеолит X, гидратированный, следовая фаза	0,05 (оценка отчёта)	25,61778
Zn	Zn-цеолит X, гидратированный	47 ± 10	11,95371
Zn	Zn-цеолит A, вакуумированный	6 ± 4	11,93171
Zn	Zn-цеолит X	47 ± 11	11,93947

Примечание: значения воспроизведены из предоставленного отчёта. Приведённые оценки требуют проверки по исходному протоколу уточнения фаз.

Согласно таблице, натриевый образец преимущественно идентифицирован как цеолит X, тогда как для цинксодержащего образца представлены два варианта цеолита X и один вариант цеолита A. При этом оценённые параметры решётки цинксодержащих фаз находятся в диапазоне 11,9317–11,9537 Å, что требует дополнительной проверки единиц, индексации и модели кристаллической ячейки. Эти значения заметно отличаются от параметра решётки натриевой фазы цеолита X, указанного в отчёте как 25,76530 Å. Без исходного файла уточнения нельзя уверенно заключить, связано ли различие с особенностями выбранной модели, представлением параметров ячейки или ошибкой переноса данных. Поэтому утверждение о том, что оба образца однозначно имеют идентичный тип каркаса и различаются исключительно катионным составом, на данном этапе следует формулировать осторожно. Сходство основных дифракционных максимумов поддерживает гипотезу о сохранении значительной части исходной кристаллической структуры, однако окончательное подтверждение требует проверки фазовой модели и параметров элементарной ячейки.

Обсуждение результатов XRD

Результаты рентгенофазового анализа показывают, что в обоих образцах сохраняются выраженные дифракционные особенности, характерные для кристаллических алюмосиликатных материалов. Различия в форме и интенсивности пиков могут отражать изменения состояния образцов после модифицирования, но не позволяют отдельно определить вклад каждого фактора. Для более строгого анализа необходимо повторно обработать исходные дифрактограммы с одинаковыми параметрами фона, диапазона углов и модели фаз. Дополнительно желательно привести рентгеновскую длину волны, использованную при измерении, и уточнить способ определения массовых долей фаз. Это позволит проверить согласованность положения пиков с заявленными типами цеолитов и избежать чрезмерно категоричных выводов. Таким образом, результаты XRD

поддерживают вывод о сохранении кристаллической составляющей в цинксодержащем образце. Однако вопрос о полном соответствии кристаллических каркасов Na- и Zn-образцов требует дополнительной верификации.

Результаты ИК-Фурье-спектроскопии

Основные полосы поглощения. ИК-Фурье-спектроскопия позволяет исследовать колебания связей в алюмосиликатном каркасе, а также особенности присутствия адсорбированной и структурированной воды. В предоставленных спектрах натриевого и цинксодержащего образцов наблюдаются основные полосы, соответствующие колебаниям O–H, деформационным колебаниям молекул воды и колебаниям связей в каркасе.

Таблица 2. Сравнение основных полос FTIR-спектров

Область, см⁻¹	Na, см⁻¹	Zn, см⁻¹	Предварительная интерпретация
3700–3000	3373	3358	Валентные колебания O–H воды и гидроксильных групп
1800–1550	1641	1641	Деформационные колебания H–O–H
1250–850	989	991	Асимметричные колебания связей T–O–T, T = Si, Al
850–650	около 652	около 652	Колебания T–O и структурных колец
650–500	около 501	около 501	Колебания структурных единиц каркаса
500–410	около 411	около 411	Деформационные колебания каркасных связей

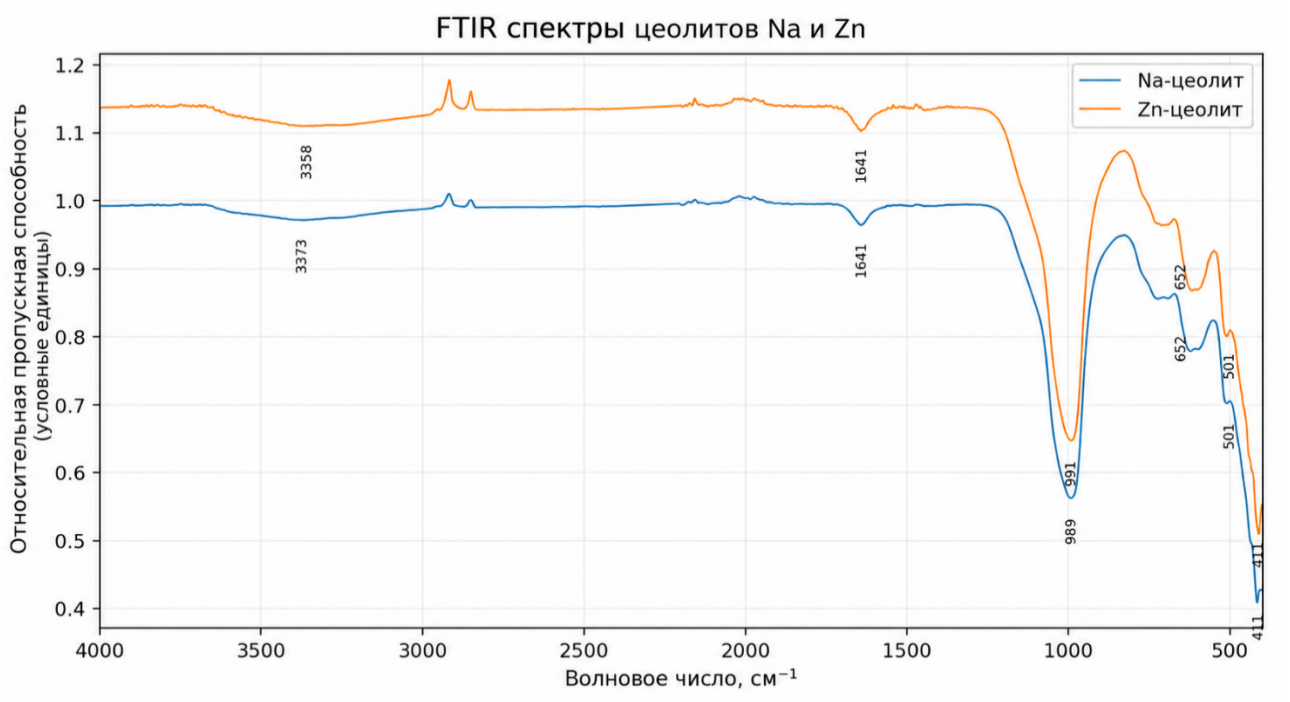


Рисунок 2. ИК-Фурье-спектры натриевой и цинксодержащей форм цеолита

Изменения в области O–H и H–O–H. В области валентных колебаний O–H максимум для натриевого образца отмечен при 3373 $см^{-1}$, а для цинксодержащего — при 3358 $см^{-1}$. Таким образом, наблюдается смещение приблизительно на 15 $см^{-1}$ в сторону меньших волновых чисел. Подобное смещение может быть связано с изменением водородных связей, локального окружения молекул воды и взаимодействия воды с компенсирующими катионами. Однако положение широкой полосы O–H зависит не только от природы катиона, но и от количества воды, её распределения и условий предварительной обработки. Поэтому наблюдаемое изменение следует интерпретировать как признак различия локального гидратационного окружения двух образцов, а не как однозначное доказательство конкретного механизма взаимодействия. Полоса около 1641 $см^{-1}$ присутствует в обоих спектрах и связывается с деформационными колебаниями H–O–H. Сохранение этой особенности согласуется с присутствием воды в обоих образцах на момент спектроскопического измерения.

Колебания алюмосиликатного каркаса

Основная полоса в области каркасных колебаний смещается с 989 $см^{-1}$ для Na-образца до 991 $см^{-1}$ для Zn-образца. Разница составляет около 2 $см^{-1}$, что указывает на близость положения соответствующих спектральных особенностей. Незначительное смещение может быть связано с изменением локального электрического окружения каркасных атомов, катионным составом, гидратацией или погрешностью определения максимума полосы. Сохранение основных полос в областях около 652, 501 и 411 $см^{-1}$ также согласуется с наличием алюмосиликатного каркаса в обоих образцах. В области около 2397 $см^{-1}$ в спектре Zn отмечена небольшая особенность. Без дополнительных контрольных измерений её не следует приписывать новой структурной группе цеолита. Возможными причинами являются атмосферный углекислый газ, особенности фоновой коррекции или оптического пути.

Выводы по FTIR. Сравнение ИК-спектров показывает, что основные полосы, связанные с алюмосиликатным каркасом, сохраняются после введения цинка. Наиболее заметное из указанных смещений относится к области O–H, тогда как полоса каркасных колебаний изменяется незначительно. Совокупность этих наблюдений согласуется с изменением локального окружения катионов и молекул воды при сохранении основных спектральных признаков цеолитной структуры. Для более детального анализа желательно использовать исходные цифровые спектры, одинаковую процедуру коррекции фона и нормирования, а также данные о влажности и предварительной обработке образцов.

Заключение

На основании сравнительного анализа натриевой и цинксодержащей форм цеолита получены следующие выводы.

1. Кристаллическая структура. В дифрактограммах обоих образцов сохраняются характерные максимумы, что свидетельствует о наличии кристаллической составляющей. При этом фазовый состав и параметры решётки, приведённые в исходном отчёте, требуют дополнительной проверки для окончательного подтверждения идентичности каркасов.

2. ИК-спектроскопия. Основные полосы алюмосиликатного каркаса сохраняются. Полоса O–H смещается с 3373 до 3358 $см^{-1}$, а полоса каркасных колебаний — с 989 до 991 $см^{-1}$. Это согласуется с изменением локального окружения молекул воды и катионов при сохранении основных спектральных признаков цеолита.

3. Удельная поверхность. По многоточечному методу BET поверхность увеличивается с 12,681 $м^2/г$ для Na до 21,633 $м^2/г$ для Zn, что соответствует приросту приблизительно 70,6 %.

4. Микропористость. Площадь микропористой поверхности по t-методу увеличивается с 3,513 до 13,797 $м^2/г$, а объём микропор — с 0,001628 до 0,006612 $см^3/г$. Одновременно уменьшается расчётная внешняя поверхность и изменяются показатели BJH и DFT, указывая на различия в распределении доступных пор.

Таким образом, основной количественный результат работы состоит в том, что исследованный цинксодержащий образец характеризуется более высокой удельной поверхностью и существенно большим расчётным вкладом микропористости по сравнению с натриевым образцом. Эти характеристики представляют интерес для последующего изучения адсорбционных и каталитических свойств материалов. При этом оценка практической эффективности требует отдельных испытаний на адсорбционную ёмкость, селективность, каталитическую активность и стабильность в конкретных рабочих условиях.

Список литературы

1. Ли С.Х., Ким С.Й., Алмейда Ж.Н., Руис-Мартинес Х., Со М.-Г., Чун С.-Х., Ли Б.Дж., Ли К.-Й. Lee, S-H., Kim, S.Y., Almeida, J.N., Ruiz-Martínez, J., Seo, M-G., Chung, S-H., Lee, B.J., & Lee, K-Y. (2026). Structure-guided control of Al sites in MFI zeolites: Toward rational catalyst design for efficient methane dehydroaromatization. Chemical Engineering Journal, 528, 172228 // Chemical Engineering Journal. – 2026. – Т. 528. – DOI: 10.1016/j.cej.2025.172228.
2. Al-Sayoud, A., Alyousef, Z., Aizaz, U., Ahmad, M.H., Alasseel, A. & Al-Shafei, E. (2026). Cobalt-based catalysts on 13X zeolite for efficient ammonia cracking to hydrogen. Fuel, 424, 139358. – DOI: 10.1016/j.fuel.2026.139358.
3. Aliyu, A., Lee, J. & Harvey, A. Comparative life cycle assessment (LCA) of Chlorella vulgaris bio-oil production: assessing the environmental performance of sulfated zirconia vs. zeolite Y catalysts. Green Carbon. – 2026. – DOI: 10.1016/j.greenca.2026.01.006.
4. Bish D.L., Howard S.A. Quantitative phase analysis using the Rietveld method // Journal of Applied Crystallography. – 1988. – Т. 21. – P. 86–91. – DOI: 10.1107/S0021889887009415.
5. Breck, D.W. Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use / D.W. Breck. – New York: John Wiley & Sons, 1974. – 771 P.
6. Coates J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. In: Meyers R.A. (ed.). Encyclopedia of Analytical Chemistry. P. 10815–10837. – Chichester: John Wiley & Sons, 2000. – DOI: 10.1002/9780470027318.a5606.
7. International Organization for Standardization. ISO 9277:2022. Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method. – Geneva: ISO, 2022. – 22 P.

8. International Organization for Standardization. ISO 13320:2020. Particle size analysis – Laser diffraction methods. – Geneva: ISO, 2020. – 59 P.
9. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure and Applied Chemistry. 1985. Vol. 57, No. 4. P. 603–619. DOI: 10.1351/pac198557040603.
10. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry. 2015. Vol. 87, No. 9–10. P. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

References

1. Ли С.Х., Ким С.Й., Алмейда Ж.Н., Руис-Мартинес Х., Со М.-Г., Чун С.-Х., Ли Б.Дж., Ли К.-Й. [Lee, S-H., Kim, S.Y., Almeida, J.N., Ruiz-Martínez, J., Seo, M-G., Chung, S-H., Lee, B.J., & Lee, K-Y. (2026). Structure-guided control of Al sites in MFI zeolites: Toward rational catalyst design for efficient methane dehydroaromatization. Chemical Engineering Journal, 528, 172228] // Chemical Engineering Journal. – 2026. – Vol. 528. – DOI: 10.1016/j.cej. 2025.172228. (In Russ.).
2. Al-Sayoud, A., Alyousef, Z., Aizaz, U., Ahmad M.H., Alasseel, A. & Al-Shafei, E. Cobalt-based catalysts on 13X zeolite for efficient ammonia cracking to hydrogen. Fuel, 424, 139358. – 2026. – DOI: 10.1016/j.fuel.2026.139358.
3. Aliyu, A., Lee, J. & Harvey, A. Comparative life cycle assessment (LCA) of Chlorella vulgaris bio-oil production: assessing the environmental performance of sulfated zirconia vs. zeolite Y catalysts. Green Carbon. – 2026. – DOI: 10.1016/j.greenca.2026.01.006.
4. Bish D.L., Howard S.A. Quantitative phase analysis using the Rietveld method // Journal of Applied Crystallography. – 1988. – Vol. 21. – P. 86–91. – DOI: 10.1107/S0021889887009415.
5. Breck D.W. Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use. – New York: John Wiley & Sons, 1974.
6. Coates J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. In: Meyers R.A. (ed.). Encyclopedia of Analytical Chemistry. P. 10815–10837. – Chichester: John Wiley & Sons, 2000. – DOI: 10.1002/9780470027318.a5606.
7. International Organization for Standardization. ISO 9277:2022. Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method. – Geneva: ISO, 2022.
8. International Organization for Standardization. ISO 13320:2020. Particle size analysis – Laser diffraction methods. – Geneva: ISO, 2020.
9. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniewska T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure and Applied Chemistry. 1985. Vol. 57, No. 4. P. 603–619. DOI: 10.1351/pac198557040603.

10. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry. 2015. Vol. 87, No. 9–10. P. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.