

**ТЕРМОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЧ-АКТИВАЦИИ
НА МЕХАНИЗМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЦЕОЛИТА ZSM-5****Е.С. Севергина, О.П. Смирнова, Р.Н. Румянцев, Н.Е. Гордина**

Лаборатория синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Россия, 153000

E-mail: esevergina@yandex.ru, smirnowa07@rambler.ru, rnr86@ya.ru, gordinane@mail.ru

В представленной работе проводится детальное сравнительное исследование двух методов синтеза цеолита ZSM-5 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=50$) с целью получения материала с пониженным содержанием натрия: классического гидротермального синтеза и инновационного метода с применением СВЧ-активации реакционной смеси. Актуальность работы обусловлена поиском энергоэффективных и быстрых способов получения цеолитных катализаторов с улучшенными структурными и функциональными свойствами для процессов нефтепереработки и органического синтеза. Экспериментально доказано, что использование СВЧ-активации не только существенно сокращает время кристаллизации по сравнению с традиционным гидротермальным синтезом, но и оказывает влияние на морфологию и качество получаемых кристаллов. Методами рентгенофазового анализа было однозначно подтверждено образование целевой цеолитной структуры типа MFI во всех образцах, однако выявлены значимые различия в их фазовой чистоте и степени кристалличности. На основе комплексного дифференциального термического анализа был предложен детальный механизм фазовых и структурных превращений, происходящих в процессе синтеза и последующего нагрева, который объясняет особенности поведения материалов при дегидратации и их повышенную термическую стабильность. Данные ИК спектроскопии продемонстрировали прямую корреляцию между выбранным методом синтеза и состоянием гидроксильных групп в полученных цеолитах, что критически важно для их кислотных и, как следствие, каталитических свойств. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие фундаментальных основ цеолитного синтеза и имеют важное практическое значение для разработки перспективных, энергосберегающих технологий получения цеолитных катализаторов с заданными и регулируемые структурно-адсорбционными и каталитическими характеристиками.

Ключевые слова: цеолит, ZSM-5, гидротермальный синтез, СВЧ-активация, термогравиметрический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, термическая стабильность

**THERMOANALYTICAL STUDY OF THE MICROWAVE ACTIVATION EFFECT
ON THE CRYSTALLIZATION MECHANISM OF ZEOLITE ZSM-5****E.S. Severgina, O.P. Smirnova, R.N. Rumyantsev, N.E. Gordina**

Laboratory of Synthesis, Research and Testing of Catalytic and Adsorption Systems for Hydrocarbon Processing, Ivanovo State University of Chemical Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: esevergina@yandex.ru, smirnowa07@rambler.ru, rnr86@ya.ru, gordinane@mail.ru

In this paper, a detailed comparative study of two methods for the synthesis of zeolite ZSM-5 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=50$) is carried out in order to obtain a material with a reduced sodium content: classical hydrothermal synthesis and an innovative method using microwave activation of the reaction mixture. The relevance of the work is due to the search for energy-efficient and fast ways to obtain zeolite catalysts with improved structural and functional properties for oil refining and organic synthesis processes. It has been experimentally proven that the use of microwave activation not only significantly reduces the crystallization time compared to traditional hydrothermal synthesis,

but also affects the morphology and quality of the crystals obtained. X-ray phase analysis methods unambiguously confirmed the formation of the target MFI-type zeolite structure in all samples, however, significant differences in their phase purity and degree of crystallinity were revealed. Based on a comprehensive differential thermal analysis, a detailed mechanism of phase and structural transformations occurring during synthesis and subsequent heating has been proposed, which explains the behavior of materials during dehydration and their increased thermal stability. The IR spectroscopy data demonstrated a direct correlation between the chosen synthesis method and the state of hydroxyl groups in the obtained zeolites, which is critically important for their acidic and, consequently, catalytic properties. The results obtained make a significant contribution to the development of the fundamental foundations of zeolite synthesis and are of great practical importance for the development of promising, energy-saving technologies for the production of zeolite catalysts with specified and controlled structural, adsorption and catalytic characteristics.

Keywords: zeolite, ZSM-5, hydrothermal synthesis, microwave activation, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, thermal stability

Для цитирования:

Севергина Е.С., Смирнова О.П., Румянцев Р.Н., Гордина Н.Е. Термоаналитическое исследование влияния СВЧ-активации на механизм кристаллизации цеолита ZSM-5. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 3. С. 117–124. DOI: 10.6060/rcj.2025693.13.

For citation:

Severgina E.S., Smirnova O.P., Rumyantsev R.N., Gordina N.E. Thermoanalytical study of the microwave activation effect on the crystallization mechanism of zeolite ZSM-5. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 3. P. 117–124. DOI: 10.6060/rcj.2025693.13.

ВВЕДЕНИЕ

Современная химическая промышленность находится в сильной зависимости от наличия отечественных высокоэффективных каталитических систем. Ведь от их использования напрямую зависят задачи любого предприятия, занимающегося вопросами энерго- и ресурсосбережения. Согласно статистическим данным, более 80 % промышленных химических процессов реализуются с использованием катализаторов, среди которых приоритетное внимание уделяется цеолитным материалам [1]. В современных исследованиях особое положение занимает цеолит типа ZSM-5, отличающийся уникальной возможностью контролируемого изменения свойств посредством направленного синтеза и модификации. Данные процессы имеют двухсторонние последствия, позволяя как поддерживать высокую скорость кристаллизации, так и обеспечивая требуемый выход целевого продукта. Эта ключевая особенность является фундаментом для разработки перспективных каталитических систем нового поколения с улучшенными эксплуатационными характеристиками [2–4].

Однако, несмотря на отработанную методику, традиционный гидротермальный синтез ZSM-5 характеризуется существенными недостатками,

включая длительное время кристаллизации и высокие энергозатраты [5]. СВЧ-активация (сверхвысокочастотная активация), как современный метод синтеза, представляет собой перспективную альтернативу, обеспечивая ускоренное образование зародышей, более высокую скорость кристаллизации и улучшенную фазовую чистоту продукта [6]. Однако фундаментальные различия в механизмах кристаллообразования между этими двумя методами до сих пор остаются малоизученными.

Термоаналитические методы, такие как термogravиметрический анализ (ТГА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), являются мощными инструментами для исследования процессов дегидратации, разложения органического шаблона и фазовых превращений в цеолитных материалах. Комбинация этих методов дает возможность выявить ключевые различия в кинетике и термодинамике синтеза ZSM-5 с пониженным содержанием натрия при использовании СВЧ-нагрева по сравнению с классическим гидротермальным методом.

Таким образом, целью данной работы является сравнительное исследование механизмов кристаллизации цеолита ZSM-5 с пониженным содержанием натрия при гидротермальном и СВЧ-синтезе с применением комплекса ТГА, ДСК.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходную реакционную смесь для кристаллизации цеолитов с пониженным содержанием Na^+ готовили по формуле осаждения [3]:



где МЭА – моноэтаноламин.

Образцы цеолита ZSM-5 синтезировали двумя методами. Традиционную гидротермальную кристаллизацию (ГК) осуществляли в тefлоновом автоклаве объемом 250 мл при постоянной температуре 150 °С в течение 130 ч в статических условиях ($\Delta T=0$, без перемешивания). Альтернативный метод включал предварительную СВЧ-активацию реакционной смеси в микроволновой печи «НАМиLab-V1500» (частота 2,45 ГГц, мощность 4 кВт) в течение 5 мин с последующей ГК при идентичных условиях (150 °С, $\Delta T=0$, без перемешивания), но с сокращенным временем синтеза до 48 ч. Такой подход позволяет оценить влияние СВЧ-активации на ускорение процесса кристаллизации ZSM-5 при сохранении остальных параметров синтеза.

Сравнение экспериментальных образцов производили с промышленным цеолитом ZSM-5 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=50$), производимых компанией «Zeolyst».

При выполнении экспериментальной части работы были использованы стандартные методы физико-химических исследований: рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре Powdix 600 (Республика Беларусь) с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda = 0,15406$ нм, Ni-фильтр). Питание устройства характеризовалось значением в 30 кВ и током 10 мА. Использовался высокоскоростной линейный детектор на кремниевой основе для регистрации данных. Процесс захвата изображений осуществлялся в реальном времени, без каких-либо задержек. Исследование с использованием рентгеноструктурного метода дало возможность определить такие параметры, как средние расстояния между плоскостями d , размеры зон, где происходит когерентное рассеяние ($D_{\text{окр}}$), а также среднеквадратичные показатели микродеформаций ζ .

В ходе научного исследования применялись расчеты, выполненные по формуле Вульфа-Брегга, для расчета расстояния между плоскостями [7]:

$$d = \lambda / (2 \cdot \sin \theta), \quad (1)$$

где λ – длина волны, Å; $\theta = X_0/2$ – угол дифракции, который был рассчитан по положению центра тяжести рефлекса:

$$X_0 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I(\theta) d\theta}{I_{\text{max}}} \text{ или } X_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (I_i + I_{i+1}) \Delta \theta}{2 I_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где X_0 – центр тяжести рефлекса; I – интенсивность рефлекса при угле дифракции 2θ ; I_{max} – максимальная интенсивность рефлекса; $\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$, где θ_1 и θ_2 – границы сечения пика, N – количество участков, на которое разбивается рефлекс при его математической обработке.

После линеаризации и обновления было возможно рассчитать размеры когерентной зоны рассеяния благодаря применению модифицированной версии уравнения Шеррера [8]:

$$\beta_{\phi} \cdot \cos \Theta = \lambda / D_{\text{окр}} + 4 \cdot \zeta \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

где $D_{\text{окр}}$ – размер области когерентного рассеяния, ζ – значение среднеквадратичных микродеформаций, β_{ϕ} – интегральное физическое уширение рентгеновского профиля образца, которое было рассчитано с использованием функции Гаусса:

$$\beta^2 = \beta_{\phi}^2 + \beta_{\text{инстр}}^2, \quad (4)$$

где $\beta_{\text{инстр}}$ – инструментальное уширение. В качестве инструментального уширения использовалось расширение рентгеновского профиля эталона.

Исследование было сфокусировано на анализе расширения интегрального профиля рентгеновских лучей, как указывает уравнение:

$$\beta = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I(\theta) \theta d\theta}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(\theta) d\theta} \text{ или } \beta = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} I_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N I_i}, \quad (5)$$

где β – интегральное уширение рентгеновского профиля образцом.

Применение определенной формулы позволяет провести анализ мелких деформаций, вызванных нарушениями в структуре кристаллов:

$$\zeta = \frac{\beta}{4 \cdot \tan \theta}. \quad (6)$$

Для идентификации данных рентгенофазового анализа использовались база данных American Mineralogist Crystal Structure Database и кристаллографическая база данных МИНКРИСТ.

Для получения ИК спектров образцов, спрессованных с KBr в 0,5%-ном разведении, использовался ИК-Фурье спектрофотометр "Avatar 360" (Nikolet) в диапазоне волн 450–4000 cm^{-1} . Идентификацию образцов осуществляли путем сравнения полученных спектров с данными из литературы [9].

Энергодисперсионный анализ работы был выполнен с использованием микроскопа Vega 3SBH, произведенного чешской компанией TESCAN.

Исследование проводили на синхронном термоанализаторе STA 449 F Jupiter® (Netzsch, Германия) в динамическом режиме нагрева. Образцы нагревали в атмосфере аргона со скоростью 5 °С/мин в интервале температур от комнатной до 900 °С.

Для выражения количественных характеристик термических превращений ZSM-5 (десорбция воды, разложение моноэтаноламина, дегидроксирование ОН-групп) в молях использовалась следующая формула:

$$n_i = \frac{m \cdot \omega_i}{100\% \cdot M_i}, \quad (7)$$

где n_i – количество молей вещества i в навеске; m – масса навески (г); ω_i – процент потери массы на этапе i (%), M_i – молярная масса выделяемого вещества i (г/моль).

Для определения расчетного количества десорбированной воды, разложенного моноэтаноламина и дегидроксирования ОН-групп на 1 моль ZSM-5 применялась следующая формула:

$$v_i = \frac{n_i}{n_{\text{ZSM-5}}}, \quad (8)$$

где v_i – расчетное количество молекул вещества i на 1 моль ZSM-5, полученное из массовых процентов термогравиметрического анализа (ТГ); $n_{\text{ZSM-5}}$ – количество молей ZSM-5 в навеске.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

При интерпретации данных рентгенофазового анализа особое внимание уделялось характерным дифракционным пикам в диапазонах $2\theta = 7-9^\circ$ и $22-25^\circ$, которые являются диагностическими для цеолитной структуры ZSM-5. Наличие этих хорошо выраженных рефлексов свидетельствует о высокой фазовой чистоте синтезированных материалов [10].

На представленных рентгенограммах (рис. 1) образец «а», полученный гидротермальным методом при пониженном содержании натрия, наблюдается высокая фазовая чистота целевого соединения с незначительной примесью кристаллического кремнезема (кварца). Такое снижение кристалличности связано с замедленной скоростью кристаллизации из-за недостатка натрия, который играет роль минерализующего компонента [11]. Применение СВЧ-активации перед гидротермальной обработкой позволило увеличить степень кристалличности материала до 96% и ускорить процесс кристаллизации в 2,7 раза за счет эффектов сверхбыстрого объемного нагрева, увеличения скорости нуклеации и активации реакционных компонентов [12]. Однако в этом случае на рентгенограмме (рис. 1, б) появляются пики кварца ($2\theta \approx 26,2^\circ$; $2\theta \approx 52,9^\circ$), образование которого может быть обусловлено локальными перегревами в СВЧ-поле, неполным растворением кремнеземистых компонентов или изменением баланса Si/Al в жидкой фазе при ускоренной кристаллизации [13].

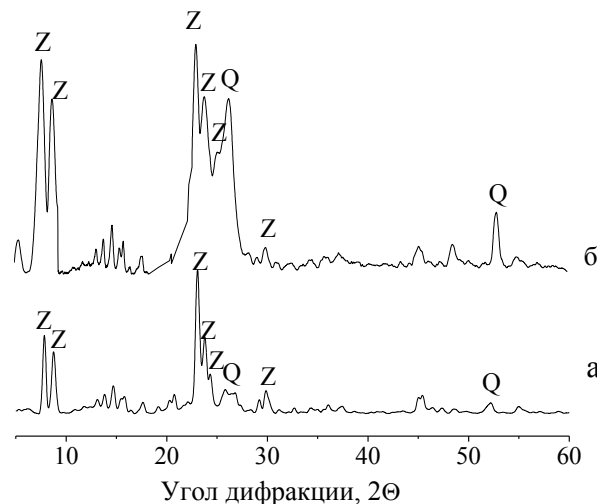


Рис. 1. Рентгенограммы экспериментальных образцов ZSM-5: а – ГК при 150°C , 130 ч; б – СВЧ-активация 5 мин, ГК при 150°C , 48 ч. Z – цеолит ZSM-5; Q – кварц

Fig. 1. X-ray images of experimental samples of ZSM-5: а – hydrothermal crystallization at 150°C , 130 h; б – microwave activation for 5 min, hydrothermal crystallization at 150°C , 48 h. Z – zeolite ZSM-5; Q – quartz

На основании рентгенофазового анализа были определены основные параметры кристаллической решетки исследуемых образцов (табл. 1). Установлено, что такие ключевые структурные характеристики как: область когерентного рассеяния, межплоскостные расстояния, величина микродеформаций имеют сопоставимые значения для всех исследуемых образцов. Данный факт свидетельствует о сохранении фундаментальных особенностей кристаллической структуры независимо от наблюдаемых различий в степени кристалличности. Полученные результаты позволяют предположить существование единого механизма кристаллообразования в изучаемой системе.

Проведенное исследование ИК спектров полученных материалов (рис. 2) показало наличие характерных полос поглощения в области $4000-400\text{ см}^{-1}$, что соответствует спектральным особенностям цеолитов пентасилового типа [14]. Сравнительный анализ спектров выявил значимые различия в:

гидроксильном составе – наблюдаются вариации интенсивности и положения полос, относящихся к ОН-группам;

степени упорядоченности алюмокремнекислородного каркаса.

В области $3700-2850\text{ см}^{-1}$ наблюдается широкая полоса поглощения (3430 см^{-1}), соответствующая колебаниям гидроксильных групп и адсорбированной воды, интенсивность которой значи-

тельно снижается в СВЧ-образце, что свидетельствует о более эффективной дегидратации. Характерный дублет в области 1810–1520 см⁻¹ (деформационные колебания воды) также демонстрирует уменьшение интенсивности при СВЧ-синтезе. Наиболее информативными оказались изменения в области 1350–400 см⁻¹: усиление полосы при ~790 см⁻¹ (асимметричные колебания Si-O-Si) ука-

зывает на более упорядоченную структуру каркаса, тогда как уменьшение интенсивности пика ~550 см⁻¹ (колебания пятичленных колец MFI-структуры) может свидетельствовать об изменении распределения алюминия в кристаллической решетке. Интенсивность полосы ~450 см⁻¹ практически не изменяется, что подтверждает наличие следов кварца в системе [15–17].

Таблица 1

Характеристика микроструктуры и молярные отношения компонентов ZSM-5
Table 1. Microstructure characteristics and molar ratios of ZSM-5 components

Система	Показатели качества продукта кристаллизации			
	Содержание кристаллической фазы цеолита по отношению к эталону, %	ОКР ¹ , Å	d, Å	МД ²
Экспериментальный образец (ГК – 130 ч)	67±2	211±2	3,86±0,05	0,67±0,05
Экспериментальный образец (СВЧ – 5 мин, ГК – 48 ч)	96±3	216±2	3,86±0,05	0,69±0,05

¹ОКР – область когерентного рассеивания, Å;

²МД – микродеформации

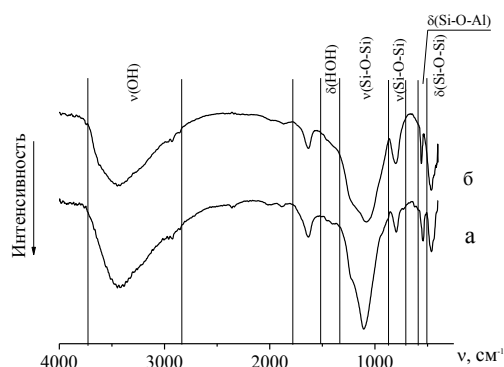


Рис. 2. ИК спектры каркаса экспериментальных образцов ZSM-5: а – ГК при 150 °С, 130 ч; б – СВЧ-активация 5 мин, ГК при 150 °С, 48 ч (ν – валентные колебания; δ – деформационные колебания)

Fig. 2. IR spectra of the frame of ZSM-5 experimental samples: а – hydrothermal crystallization at 150 °C, 130 h; б – microwave activation for 5 min, hydrothermal crystallization at 150 °C, 48 h (ν – valence vibrations; δ – deformation vibrations)

Методы термического анализа (ДСК и ТГА) выявили значительные различия в поведении об-

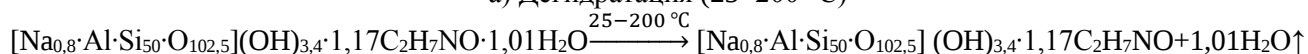
разцов, полученных разными способами (рис. 3). Для гидротермального синтеза характерно плавное трехстадийное разложение с общей потерей массы 4,3%, сопровождаемое серией эндотермических эффектов. В случае СВЧ-активированного образца наблюдается уникальный феномен увеличения массы на 0,22% в диапазоне 170–250 °С, при этом основной этап разложения шаблона происходит в более узком температурном интервале (250–400 °С) с потерей 2,67% массы, также процессы сопровождаются серией эндотермических эффектов.

По полученным результатам термогравиметрических измерений представляется возможным произвести расчет преобразования полученных образцов (табл. 2).

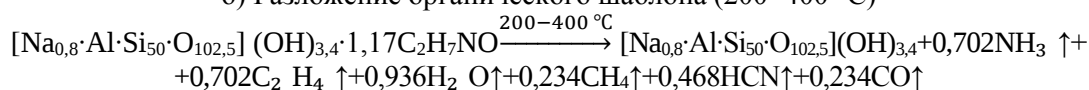
На основании расчетных данных и элементного анализа после термического анализа (табл. 3) установлены механизмы дегидратации и детемплатирования на 1 моль цеолита, описываемые следующими реакциями:

1) Экспериментальный образец (ГК – 130 ч)

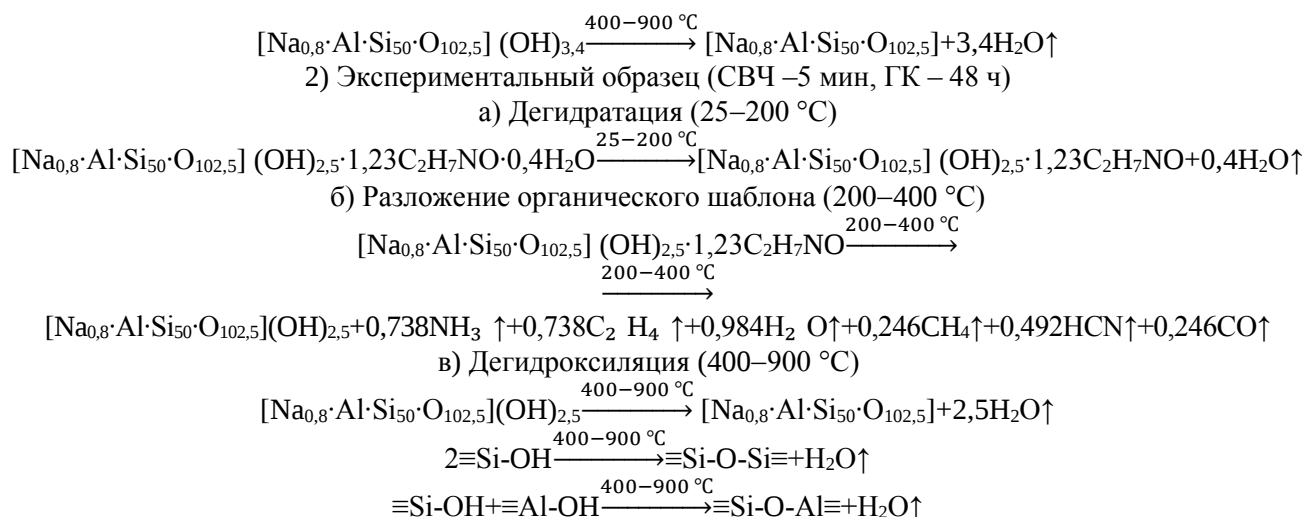
а) Дегидратация (25–200 °С)



б) Разложение органического шаблона (200–400 °С)



в) Дегидроксиляция (400–900 °С)



Наблюдаемые различия в степени дегидратации могут быть обусловлены особенностями процессов термического синтеза и СВЧ-активации. При ГК длительное нагревание (~130 ч) способствует образованию более гидратированной структуры (потеря массы 0,65%) за счет заполнения пор водой, тогда как кратковременная СВЧ-активация (5 мин) приводит к формированию менее гидратированного материала (потеря массы 0,22%) вследствие ускоренного роста кристаллов [18–20].

Кроме того, при ГК происходит постепенное разложение темплата, в то время как при СВЧ-активации наблюдается незначительное увеличение массы (~0,22%) при 250 °С, вероятно, связанное с реадсорбцией воды на вновь образованных активных центрах [21]. При этом в обоих случаях сохраняются термически стабильные Bronsted-кис-

лотные центры, что подтверждается близкими значениями потери массы (1,1% и 0,8% для ГК и СВЧ-активации, соответственно). Таким образом, различия в дегидратационном поведении объясняются кинетическими особенностями применяемых методов активации.

Анализ кривых ДСК выявил характерные эндотермические эффекты, соответствующие стадиям десорбции воды и разложения моноэтаноламина. Принципиально важно отметить, что при СВЧ-активации образцов эндотермический пик, связанный с удалением моноэтаноламина, проявляется значительно интенсивнее по сравнению с данными традиционной ГК. Это различие может быть обусловлено возможностью селективного воздействия микроволнового излучения на определенные типы поверхностных комплексов.

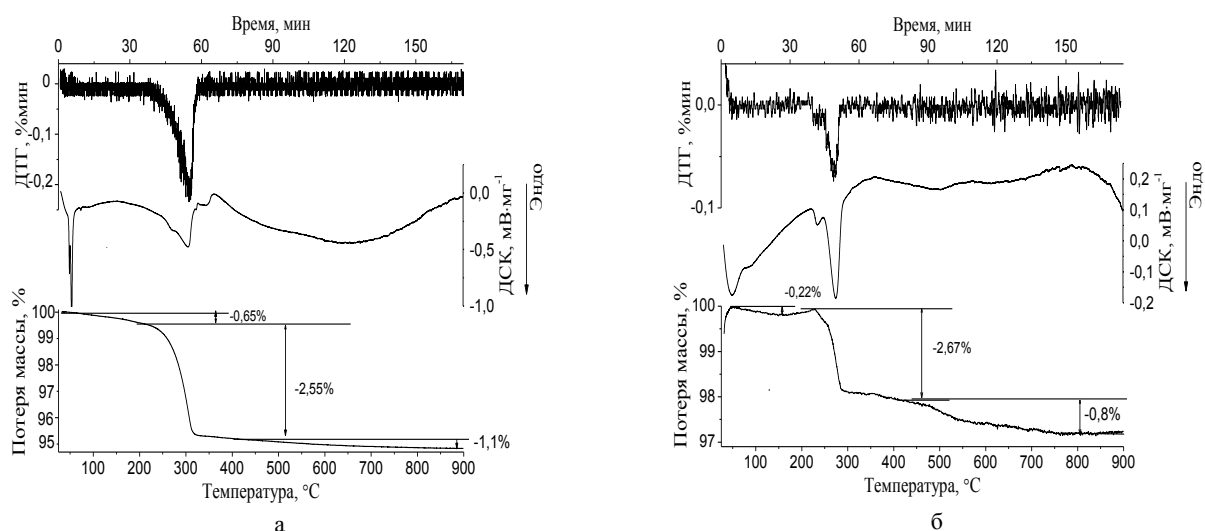


Рис. 3. Термогравиметрический и дифференциально-термический анализы экспериментальных образцов ZSM-5: а – ГК при 150 °С, 130 ч; б – СВЧ-активация 5 мин, ГК при 150 °С, 48 ч
 Fig. 3. Thermogravimetric and differential thermal analyses of ZSM-5 experimental samples: а – hydrothermal crystallization at 150 °C, 130 h; б – microwave activation for 5 min, hydrothermal crystallization at 150 °C, 48 h

Таблица 2

Количественная характеристика термических превращений ZSM-5
Table 2. Quantitative characteristics of thermal transformations of ZSM-5

Система	Масса навески, мг	Σ потерь, %	Физически адсорбированная H ₂ O·10 ⁶ , моль	C ₂ H ₇ NO·10 ⁶ , моль	ОН·10 ⁶ , моль
Экспериментальный образец (ГК – 130 ч)	8,992	4,3	3,24	3,75	5,5
Экспериментальный образец (СВЧ – 5 мин, ГК – 48 ч)	14,649	3,69	1,79	5,89	6,5

Таблица 3

Результаты энергодисперсионного анализа
Table 3. Results of energy dispersion analysis

Система	Экспериментальный образец (ГК – 130 ч), %	Экспериментальный образец (СВЧ – 5 мин, ГК – 48 ч.), %
Элемент		
O	52,90	51,37
Na	0,62	0,56
Al	0,88	0,84
Si	45,60	47,23
Всего:	100,00	100,00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что применение СВЧ-активации исходной реакционной смеси позволяет существенно оптимизировать процесс синтеза цеолитов ZSM-5. Результаты исследования показали, что данный метод обеспечивает:

сокращение времени кристаллизации в 2,7 раза;

увеличение степени кристалличности полученных образцов в 1,5 раза.

Особый интерес представляет выявленная зависимость между методом синтеза и свойствами конечного продукта. Несмотря на то, что СВЧ-активация приводит к образованию примеси кварца, она одновременно способствует формированию более совершенной кристаллической структуры. Для устранения примесей кварца необходимо оптимизировать состав исходной смеси.

Полученные данные ИК спектроскопии и термогравиметрического анализа свидетельствуют о различиях в химии поверхности и термической стабильности образцов. Примечательно, что, несмотря на различия в условиях синтеза, основные структурные параметры (межплоскостное расстояние, микродеформации и ОКР), определенные методом РФА, остаются практически неизменными. Этот факт позволяет предположить существование единого механизма кристаллообразования в исследуемой системе. Полученные результаты открывают перспективы для разработки эффективных каталитических систем на основе цеолитов ZSM-5,

особенно для процессов с участием крупномолекулярных соединений.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы работы благодарят сотрудников Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ за доступ к приборной базе, закупленной при поддержке Минобрнауки России.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2024-481.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Коробицына Л.Л., Величкина Л.М., Будаев Ж.Б. Исследование влияния способа получения цеолита структурного типа MFI на его каталитическую активность в процессах переработки углеводородного сырья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 50-57. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.4t. Korobitsyna L.L., Velichkina L.M., Budaev Zh.B. et al. Investigation of the influence of the method for obtaining zeolite of the structural type MFI on its catalytic activity in the processing of hydrocarbon raw materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 50-57. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.4t.
2. Коробицына Л.Л., Козлов В.В., Шолитодов М.Р. и др. Синтез высоко-кремнеземных цеолитов с использованием глубоких эвтектических растворителей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 76-84.

- DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.14t **Korobitsyna L.L., Kozlov V.V., Sholidodov M.R.** Synthesis of high silica zeolites using deep eutectic solvents. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 76-84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.14t.
3. **Севергина Е.С., Каманова Т.А., Кравчук Д.А.** Оптимальные параметры гидротермального синтеза цеолита ZSM-5 с пониженным содержанием Na⁺. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2024. Т. 79. № 3. С. 96–101. DOI: 10.6060/snt.20247903.00015.
4. **Гордина Н.Е., Борисова Т.Н., Клягина К.С.** Сравнительный анализ свойств цеолита типа LTA в зависимости от метода получения: гидротермальный и ультразвуковой. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 90-96. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6633. **Gordina N.E., Borisova T.N., Klyagina K.S.** Comparative analysis of the properties of LTA type zeolite depending on the production method: hydrothermal and ultrasonic. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 9. P. 90-96. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6633.
5. **Nguyen D.K., Dinh V.P., Nguyen H.Q.** Zeolite ZSM-5 synthesized from natural silica sources and its applications: a critical review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2023. V. 98. N 6. P. 1339-1355. DOI: 10.1002/jctb.7380.
6. **Zeng X., Hu X., Xia G.** Microwave synthesis of zeolites and their related applications. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021. V. 323. P. 111262. DOI: 10.1016/j.micromeso.2021.111262.
7. **Epp J.** X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods. *Woodhead Publishing*. 2016. P. 81-124. DOI: 10.1016/b978-0-08-100040-3.00004-3.
8. **Muniz F.T.L., Miranda M.R., Morilla dos Santos C.** The Scherrer equation and the dynamical theory of X-ray diffraction. *Foundations of Crystallography*. 2016. V. 72. N 3. P. 385-390. DOI: 10.1107/s205327331600365x.
9. **Takeuchi M., Tsukamoto T., Kondo A.** Investigation of NH₃ and NH₄⁺ adsorbed on ZSM-5 zeolites by near and middle infrared spectroscopy. *Catalysis Science & Technology*. 2015. V. 5. N 9. P. 4587-4593. DOI: 10.1039/C5CY00753D.
10. **Павлов М.Л., Шавалеев Д.А., Кутепов Б.И.** Синтез и исследование катализаторов алкилирования бензола этиленом на основе цеолита ZSM-5. *Нефтехимия*. 2016. Т. 56. №. 2. С. 171. DOI: 10.7868/S0028242116020118. **Pavlov M.L., Shavaleev D.A., Kutepov B.I.** Synthesis and investigation of catalysts for the alkylation of benzene with ethylene based on zeolite ZSM-5. *Petrochemistry*. 2016. Vol. 56. N 2. P. 171. (in Russian). DOI: 10.7868/S0028242116020118.
11. **Chen H.L., Ding J., Wang Y.M.** One-step synthesis of mesoporous ZSM-11 composites through a dual-template method. *New Journal of Chemistry*. 2014. V. 38. N 1. P. 308-316. DOI: 10.1039/C3NJ00785E.
12. **Yuan E.H., Han R., Deng J.Y.** Acceleration of zeolite crystallization: current status, mechanisms, and perspectives. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024. V. 16. N 23. P. 29521-29546. DOI: 10.1021/acsami.4c01774.
13. **Palma V., Barba D., Cortese M.** Microwaves and heterogeneous catalysis: A review on selected catalytic processes. *Catalysts*. 2020. V. 10. N 2. P. 246. DOI: 10.3390/catal10020246.
14. **Chawla A., Li R., Jain R.** Cooperative effects of inorganic and organic structure-directing agents in ZSM-5 crystallization. *Molecular Systems Design & Engineering*. 2018. V. 3. N 1. P. 159-170. DOI: 10.1039/C7ME00097A.
15. **Liu C., Gu W., Kong D.** The significant effects of the alkali-metal cations on ZSM-5 zeolite synthesis: From mechanism to morphology. *Microporous and mesoporous materials*. 2014. V. 183. P. 30-36. DOI: 10.1016/j.micromeso.2013.08.037.
16. **Głowniak S., Szczęśniak B., Choma J.** Advances in microwave synthesis of nanoporous materials. *Advanced Materials*. 2021. V. 33. N 48. P. 2103477. DOI: 10.1002/adma.202103477.
17. **Knözinger H., Huber S.** IR spectroscopy of small and weakly interacting molecular probes for acidic and basic zeolites. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1998. V. 94. N 15. P. 2047-2059. DOI: 10.1039/A802189I.
18. **Millini R., Bellussi G.** Zeolite science and perspectives. Properties and Applications. *RSC Catalysis Series. Royal Society of Chemistry*. 2017. N 28. P. 1–36. DOI: 10.1039/9781788010610-00001.
19. **Leonelli C., Komarneni S.** Inorganic syntheses assisted by microwave heating. *Inorganics*. 2015. V. 3. N 4. P. 388-391. DOI: 10.3390/inorganics3040388.
20. **Kwimi Tchatat P., Ngally Sabouang C.J., Mache J.R.** Microwave Assist Synthesis of Na-zeolite/Hydroxysodalite from a Kaolin: Effect of the Microwave Power. *Chemistry Africa*. 2024. V. 7. N 1. P. 273-280. DOI: 10.1007/s42250-023-00745-w.
21. **Kumar K.V., Gadipelli S., Wood B.** Characterization of the adsorption site energies and heterogeneous surfaces of porous materials. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019. V. 7. N 17. P. 10104-10137. DOI: 10.1039/C9TA00287A.

Поступила в редакцию 28.04.2025
Принята к опубликованию 02.09.2025

Received 28.04.2025
Accepted 02.09.2025