

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО СИНТЕЗА ЦЕОЛИТА ZSM-5  
С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ  $Na^+$**

Севергина Е.С., Каманова Т.А., Кравчук Д.А., Румянцев Р.Н., Гордина Н.Е.

Севергина Екатерина Сергеевна, ORCID: 0000-0001-5522-7948 Каманова Татьяна Андреевна, ORCID: 0009-0006-0080-8036 Кравчук Данила Александрович, ORCID: 0009-0003-2369-8296 Румянцев Руслан Николаевич, ORCID: 0000-0002-7763-2028 Гордина Наталья Евгеньевна, ORCID: 0000-0002-1067-4688 Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.  
E-mail: esevergina@yandex.ru

*В работе рассматривается синтез высококремнеземных цеолитов типа ZSM-5 с модулем 50,0 и пониженным содержанием ионов  $Na^+$  для процессов каталитического пиролиза биомассы, химической и смежных отраслей промышленности. Показано влияние различного содержания  $Na_2O$  (мольное соотношение  $Na_2O$  в реакционной смеси варьировалось от 0 до 3,4 моль) на структуру получаемых высококремнеземных цеолитов типа ZSM-5. При помощи методов рентгенофазового анализа, ИК-спектроскопии определено оптимальное соотношение компонентов  $Na_2O/SiO_2$  в цеолите ZSM-5, которое позволяет получить цеолит с высоким содержанием кристаллической фазы, соответствующее параметрам промышленного образца ZSM-5. Доказано, что при отсутствии в исходной смеси щелочных реагентов процесс кристаллизации продукта невозможен. Полученные в работе результаты интересны как с практической точки зрения при оптимизации процессов синтеза, так и с фундаментальной, при разработке новых способов получения цеолитов.*

**Ключевые слова:** цеолит, ZSM-5, синтез, содержание кристаллической фазы, темплат, оксид натрия

**OPTIMAL PARAMETERS OF HYDROTHERMAL SYNTHESIS OF ZSM-5 ZEOLITE  
WITH A REDUCED  $Na^+$  CONTENT**

Severgina E.S., Kamanova T.A., Kravchuk D.A., Rumyantsev R.N., Gordina N.E.

Severgina Ekaterina Sergeevna, ORCID: 0000-0001-5522-7948 Kamanova Tatyana Andreevna, ORCID: 0009-0006-0080-8036 Kravchuk Danila Aleksandrovich, ORCID: 0009-0003-2369-8296 Rumyantsev Ruslan Nikolaevich, ORCID: 0000-0002-7763-2028 Gordina Natalia Evgenevna, ORCID: 0000-0002-1067-4688 Ivanovo State University of Chemical Technology, Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.  
E-mail: esevergina@yandex.ru

*The paper considers the synthesis of high-silica zeolites of the ZSM-5 type with a modulus of 50.0 and a reduced content of  $Na^+$  ions for the processes of catalytic pyrolysis of biomass, chemical and related industries. The effect of different  $Na_2O$  contents (the molar ratio of  $Na_2O$  in the reaction mixture varied from 0 to 3.4 mol) on the structure of the resulting high-silica zeolites of the ZSM-5 type is shown. Using X-ray phase analysis and IR spectroscopy methods, the optimal ratio of  $Na_2O/SiO_2$  components in ZSM-5 zeolite was determined, which makes it possible to obtain zeolite with a high content of the crystalline phase corresponding to the parameters of the ZSM-5 industrial sample. It is proved that in the absence of alkaline reagents from the initial mixture, the crystallization process of the product is impossible. The results obtained in this work are interesting both from a practical point of view when optimizing synthesis processes, and from a fundamental point of view when developing new methods for obtaining zeolites.*

**Keywords:** zeolite, ZSM-5, synthesis, crystal phase content, template, sodium oxide

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Значительную долю химических соединений, производимых промышленностью, получают каталитическими процессами. Такие процессы, как пиролиз, изомеризация, алкилирование, этерификация и крекинг катализируются кислотно-основными катализаторами, среди которых особое место занимают цеолиты. К числу цеолитных материалов, способных не только трансформировать углеводороды, но и бороться с загрязнениями относится цеолит ZSM-5 структурного типа MFI [1,2].

Применение конкретного цеолита в практике напрямую зависит от его химических характеристик и структурных свойств. Химический состав цеолитов определяет их кислотно-основные свойства, которые в свою очередь влияют на активность и селективность цеолитов в различных реакциях. Ионообменные свойства цеолитов, в свою очередь, регулируют их гидрофобные свойства и способность адсорбировать как полярные, так и неполярные соединения [3-5]. Поэтому для придания необходимых свойств, при синтезе цеолита важными факторами являются состав исходного материала, время кристаллизации и температура. Эти параметры оказывают влияние на степень кристалличности конечного продукта, что обуславливает необходимость более строгих условий процесса синтеза, требующих тщательного исследования для определения оптимальных параметров. Необходимо отметить, что при синтезе цеолита ZSM-5 одним из важных компонентов является неорганическая щелочь, чаще NaOH, поскольку именно ее присутствие обеспечивает полноту взаимодействия компонентов исходной смеси, повышенную скорость кристаллизации продукта [6]. Натрий часто присутствует в структуре цеолитов в виде ионов натрия, которые обычно не вызывают негативных эффектов на последующие функциональные свойства данных материалов. Однако для ряда каталитических процессов повышенное содержание  $\text{Na}^+$  в цеолитах может негативно сказываться на их эффективности, поэтому содержание ионов натрия в цеолитах корректируют, пытаясь уменьшить. Вот несколько причин для этого:

-повышение кислотности: натрий, являясь щелочным элементом, может нейтрализовать кислотные свойства цеолита, что приводит к снижению его каталитических и сорбционных характеристик [7];

-повышение селективности: высокое содержание натрия влияет на селективность цеолита

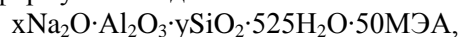
в ряде конкретных реакций, снижая эффективность его использования [8];

-открытие активных центров: натрий может окислять и блокировать активные центры цеолита, что препятствует их взаимодействию с реагентами [3].

Таким образом, управление содержанием натрия в высококремнеземных цеолитах ZSM-5 является важным аспектом исследований и разработок в области синтеза каталитических материалов с целью обеспечения их оптимальной эффективности (активности и селективности).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходную реакционную смесь для кристаллизации ZSM-5 с различным содержанием  $\text{Na}^+$ , где мольное соотношение  $\text{Na}_2\text{O}$  в реакционной смеси варьировалось от 0 до 3,4 моль, готовили по формуле осаждения:



где  $x$  – мольное содержание оксида натрия в реакционной смеси.

Гидротермальный синтез осуществляли в автоклаве объемом 250 мл 24-130ч при температуре 150 °С. Эксперименты по гидротермальной кристаллизации происходили без температурного градиента  $\Delta T=0$  и без перемешивания реакционной массы. Сравнение экспериментальных образцов производили с промышленным цеолитом ZSM-5 ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=50$ ), производимых в ООО «Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов».

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). Для идентификации данных рентгенофазового анализа использовались база данных American Mineralogist Crystal Structure Database и кристаллографическая база данных МИНКРИСТ). ИК-спектроскопия выполнялась на приборе Avatar 360 FT-IR ESP в области  $400\text{-}2000\text{ см}^{-1}$ .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы оценивали оптимальный состав исходных смесей для синтеза цеолита ZSM-5, исходя из показателя – содержание кристаллической фазы синтезируемого материала. Для этого варьировали мольные соотношения компонентов:  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ , тогда как соотношения  $\text{R}/\text{SiO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  оставались постоянными.

Влияние концентрации компонентов реакционной смеси на качество продуктов кристаллизации цеолита ZSM-5  
**Table 1. The effect of the concentration of the components of the reaction mixture on the quality of the crystallization products of zeolite ZSM-5**

№ образцов	Состав реакционной смеси (мольные отношения компонентов) при $R/SiO_2 = 1$ , $H_2O/SiO_2 = 10,5$		Показатели качества продуктов кристаллизации	
	$SiO_2/Al_2O_3$	$Na_2O/SiO_2$	Содержание кристаллической фазы по отношению к эталону, %	Содержание $Na_2O$ , мас. %
1	20	0,02	80	0,39
2	20	0,03	84	0,58
3	20	0,05	90	0,69
4	50	0,02	67	0,40
5	50	0,03	98	0,59
6	50	0,05	99	0,98
7	75	0,02	60	0,29
8	75	0,03	92	0,69
9	75	0,05	96	0,83
10	100	0,02	10	0,79
11	100	0,03	28	0,83
12	100	0,05	35	0,89

Из анализа данных таблицы 1 следует, что цеолиты с содержанием  $Na_2O = 0,40-0,98$  мас. % с содержанием кристаллической фазы цеолита ZSM-5 на уровне 92–99% получены из реакционных смесей с мольным отношением компонентов  $SiO_2/Al_2O_3 = 50-75$ ;  $MЭА/SiO_2 = 1$ ;  $Na_2O/SiO_2 = 0,02-0,05$ ;  $H_2O/SiO_2 = 10,5$ .

В случае кристаллизации цеолита из высококремнеземной реакционной смеси (образцы 10-12 табл. 1), где относительное содержание кремния в образце значительно ( $SiO_2/Al_2O_3 = 75-100$ ), ожидаемо было бы наблюдать уменьшение содержания натрия в цеолите. Однако, как видно из таблицы, содержание  $Na_2O$  в цеолите не снизилось, это говорит о том, что силикагель в данных образцах в условиях эксперимента не растворяется. Для полного протекания процесса синтеза надо придерживаться условий, при которых мольное отношение  $Na_2O/SiO_2$  должно быть не менее 0,03. Именно в этом случае удается получать образцы с содержанием кристаллической фазы более 90% и  $Na_2O$  в системе от 0,49 до 0,98 мас. %. Снижение мольного отношения  $Na_2O/SiO_2$  до 0,02 при  $H_2O/SiO_2 = 10,5$  в исходной реакционной смеси вне зависимости от силикатного модуля приводит к получению продукта, содержащего в своем составе аморфную фазу. Результаты кристаллизации образцов 10-12 табл.1 (с высоким силикатным модулем  $SiO_2/Al_2O_3=100$ ) показывают, что мольных отношений  $Na_2O/SiO_2 = 0,02, 0,03$  и  $0,05$ , а также  $H_2O/SiO_2 = 10,5$  в исходной реакционной смеси недостаточно для полного растворения силикаге-

ля, что является препятствием для процесса сборки каркаса цеолита, количество фазы цеолита в этих образцах изменяется в пределах 10-35%, остальное, судя по дифрактограммам – аморфная фаза и кварц. Исходя из полученных результатов для дальнейшего исследования в данной работе была выбрана система  $SiO_2/Al_2O_3=50$ . Выбор соотношения обоснован следующими факторами:

- соотношение  $SiO_2/Al_2O_3=50$  обеспечивает формирование крупных кристаллов цеолита с высокой степенью кристалличности, что улучшает его каталитические свойства;

- при соотношении  $SiO_2/Al_2O_3=50$  образуется достаточное количество сильных кислотных центров, которые способствуют эффективному протеканию реакций пиролиза, изомеризации, алкилирования и др [2, 3]. Рентгенограммы полученных продуктов кристаллизации с варьированием количества  $Na_2O$  оценивались наличием на ней наиболее интенсивных дифракционных пиков, наблюдаемых при следующих углах: 7-9; 22-25 град, присутствующих только цеолиту ZSM-5, именно данный диапазон углов дифракции отвечает за фазовую чистоту продукта [9]. На рисунке 1 представлены рентгенограммы образцов. Образец «а» (рис. 1а) – промышленный ZSM-5, с которым проводились сравнения образцов с различным содержанием натрия в исходной реакционной смеси.

При полном отсутствии  $Na_2O$  в исходной смеси (рис. 1б), видно, что продукт не кристаллизуется и представляет аморфную фазу даже после 120ч взаимодействия компонентов в автоклаве.

Следующую партию образцов готовили с содержанием в исходной смеси  $\text{Na}_2\text{O} = 0,40$  мас. % и мольным соотношением  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,02$  моль (рис. 1с). Из рентгенограмм видно, что продукт имеет дифракционные полосы, практически идентичные рефлексам чистого ZSM-5. Следует отметить, что продукт кристаллизовался полностью на 5 сутки, при этом содержание кристаллической фазы цеолита в нем составило 67 %.

Дальнейшее повышение содержания  $\text{Na}_2\text{O} = 0,98$  мас. % в образце «d», при соотношении  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,05$  моль (рис. 1 d), позволило нарастить степень кристалличности цеолита ZSM-5 до 98 %. Последующий рост ионов натрия в смеси исходных компонентов показал, что образец, характеризующийся 99% содержанием кристаллической фазы цеолита (рис. 1e) синтезируется при условиях:  $\text{Na}_2\text{O} = 1,33$  мас. % и соотношением  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,068$  моль.

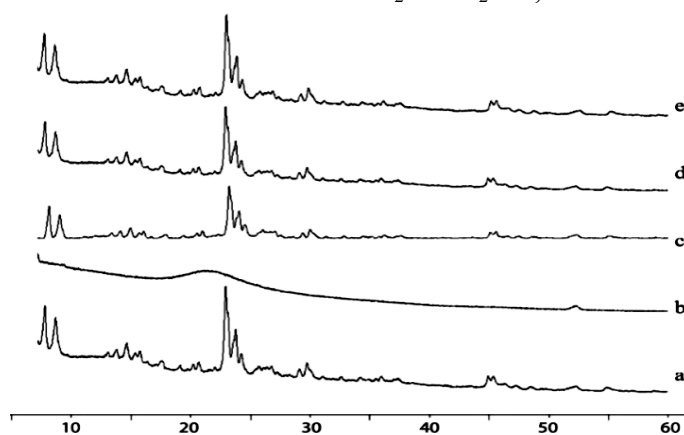


Рис. 1. Рентгенограммы ZSM-5 и экспериментальных образцов в течении 130 ч при температуре 150 °С: а– промышленный цеолит ZSM-5; б–экспериментальный образец, не содержащий  $\text{Na}^+$ ; с–экспериментальный образец (содержание  $\text{Na}_2\text{O} = 0,40$  мас.%) ; д–экспериментальный образец (содержание  $\text{Na}_2\text{O} = 0,98$  мас.%) ; е–экспериментальный образец (содержание  $\text{Na}_2\text{O} = 1,33$  мас.%)  
 Fig. 1. X-ray patterns of ZSM-5 and experimental samples for 130 h at a temperature of 150 °C: a - industrial zeolite ZSM-5; b - experimental sample not containing  $\text{Na}^+$ ; c - experimental sample ( $\text{Na}_2\text{O}$  content = 0.40 wt%); d - experimental sample ( $\text{Na}_2\text{O}$  content = 0.98 wt%); e - experimental sample ( $\text{Na}_2\text{O}$  content = 1.33 wt.%)

Таблица 2

Характеристика микроструктуры ZSM-5  
 Table 2. Characteristics of the microstructure of ZSM-5

Система	Содержание кристаллической фазы цеолита в реакционной смеси, %	ОКР <sup>1</sup> , Å	d, Å	МД <sup>2</sup>
Цеолит ZSM-5 (промышленный) «а»	99±1	213±2	3,88±0,05	0,67±0,05
Экспериментальный образец «б», не содержащий $\text{Na}^+$	-	-	-	-
Экспериментальный образец «с» (содержание $\text{Na}_2\text{O} = 0,40$ масс. %)	67±2	211±2	3,86±0,05	0,67±0,05
Экспериментальный образец «д» (содержание $\text{Na}_2\text{O} = 0,98$ масс. %)	98±2	216±2	3,87±0,05	0,68±0,05
Экспериментальный образец «е» (содержание $\text{Na}_2\text{O} = 1,33$ масс. %)	99±1	213±2	3,88±0,05	0,67±0,05

<sup>1</sup>ОКР – область когерентного рассеивания, Å;

<sup>2</sup>МД – микродеформации.

Далее в работе на основании рентгенофазового анализа рассчитаны параметры кристаллической решетки, показывающие, что значения об-

Изучение и сравнение ИК-спектров каркаса промышленного ZSM-5 и синтезированных цеолитов показало, что синтезированные образцы

ласти когерентного рассеивания, межплоскостного расстояния и микродеформаций близки и находятся в пределах погрешности измерений (рис. 1). имеют спектр поглощения в области 2000-400  $\text{cm}^{-1}$ , характерный для цеолитов со структурой пентасил (рис. 2) [10, 12]. Наблюдаемые в спектре по-

лосы поглощения относятся к двум типам колебаний:

- колебаниям внутри тетраэдров  $TO_4$  ( $AlO_4$  и  $SiO_4$ );
- колебаниям по внешним связям тетраэдров. Увеличение интенсивности этой полосы характеризует рост содержания кристаллической фазы в синтезируемых системах (табл. 2).

Ожидаемо, что набор пиков для каждого образца, исключая только тот, что синтезировали из систем с полным отсутствием ионов  $Na^+$  в составе, идентичен. Для оценки скорости взаимодействия компонентов исходных смесей были отобраны 3 образца с наибольшим содержанием

кристаллической фазы (с, d, e). Полученные кинетические кривые (рис. 3) наглядно свидетельствуют о том, что снижение содержание  $Na^+$  в исходной смеси компонентов не оказывает влияние на скорость протекания процесса кристаллизации ZSM-5. В случае всех исследуемых образцов процесс синтеза завершился примерно после 5 часов взаимодействия компонентов в автоклаве. При этом выход продукта в зависимости от времени синтеза образцов, содержащих в своем составе  $Na_2O$ , мас. %: 0,98 и 1,33, отличался в пределах ошибки эксперимента.

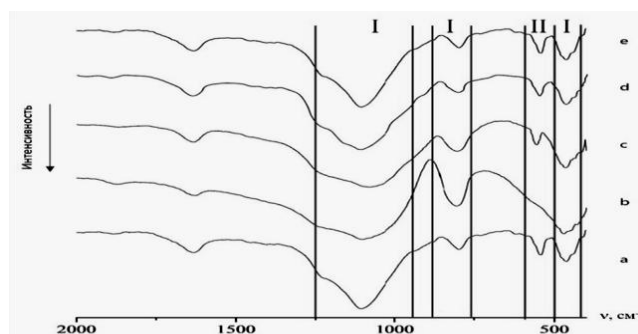


Рис. 2 ИК-спектры каркаса цеолитов: а– промышленный цеолит ZSM-5; б– экспериментальный образец, не содержащий  $Na^+$ ; с– экспериментальный образец (содержание  $Na_2O = 0,40$  масс. %); д– экспериментальный образец (содержание  $Na_2O = 0,98$  масс. %); е– экспериментальный образец (содержание  $Na_2O = 1,33$  масс. %).

Fig. 2 IR spectra of the zeolite framework: a - industrial zeolite ZSM-5; b - experimental sample not containing  $Na^+$ ; c - experimental sample ( $Na_2O$  content = 0.40 wt%); d - experimental sample ( $Na_2O$  content = 0.98 wt%); e - experimental sample ( $Na_2O$  content = 1.33 wt%)

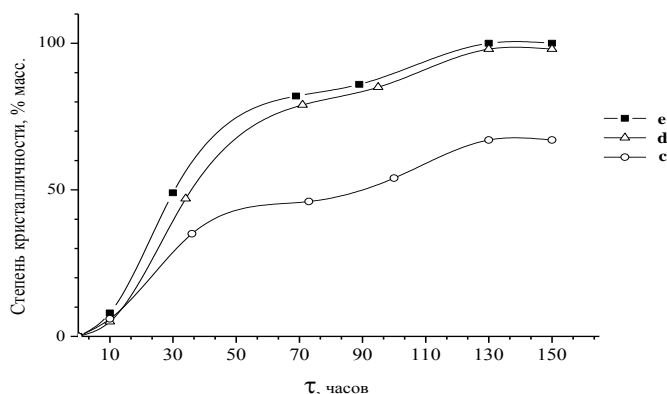


Рис. 3 Кинетика кристаллизации экспериментальных образцов при 150 °С, с различным содержанием  $Na^+$  в исходной смеси: е–экспериментальный образец (содержание  $Na_2O = 1,33$  мас. %); д–экспериментальный образец (содержание  $Na_2O = 0,98$  мас. %); с–экспериментальный образец (содержание  $Na_2O = 0,40$  мас. %); д– экспериментальный образец, не содержащий  $Na^+$

Fig. 3 Kinetics of crystallization of experimental samples at 150 °C, with different  $Na^+$  content in the initial mixture: а - experimental sample ( $Na_2O$  content = 1.33 wt%); б - experimental sample ( $Na_2O$  content = 0.98 wt%); с - experimental sample ( $Na_2O$  content = 0.40 wt%); д - experimental sample not containing  $Na^+$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально было показано, что наиболее оптимальным соотношением компонентов в цеолите ZSM-5 является  $Na_2O/SiO_2 = 0,05$ , с содержанием  $Na_2O = 0,98$  мас.%. Такое соотношение компонентов позволяет получить цеолит с

содержанием кристаллической фазы  $98 \pm 1$  %, уступающий по своим эксплуатационным характеристикам параметрам промышленного образца ZSM-5, производства ООО «Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов». Понижение количества натрия в исходной

реакционной смеси ниже 0,98 мас.% в условиях проводимого эксперимента нецелесообразно, так как сопровождается снижением процесса растворения кремния в исходной смеси и как следствие препятствует сборке скелета цеолита.

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

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

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

ЛИТЕРАТУРА

REFERENECES

- Król M.** Natural vs. Synthetic zeolites//*Crystals*. 2020. V. 10. N. 7. P. 622. DOI: 10.3390/cryst10070622.
- Ma Qing Yuan, Huang Zhen et al.** Effects of ZSM-5 zeolite on pyrolysis of polystyrene: from stabilizing to catalyzing// *Turkish Journal of Chemistry*. 2023. V. 47: N. 4, Article 6. DOI: 10.55730/1300-0527.3574.
- Эминова С. Ф., Гахраманов Т. О., Мамедов С. Э.** Влияние модифицирования на кислотные и каталитические свойства высококремеземных цеолитов в реакции метилирования этилбензола // *Kimya Problemleri*. 2017. №. 3. С. 309-314.
- Gordina, N. E., Prokof'ev, V. Y., Borisova, T. N., & Elizarova, A. M.** Синтез гранулированных низкомолекулярных цеолитов из метакаолина с использованием механохимической активации и ультразвуковой обработки. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 7. С. 99-106. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5725.
- Шавалеев Д. А., Травкина О. С., Алехина И. Е. и др.** Синтез и исследование физико-химических свойств каталитической системы на основе цеолита ZSM-5 // *Вестник Башкирского университета*. 2015. Т. 20. №. 1. С. 58-65.
- 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.
- Сейлханова Г.А., Рахым А.Б., Кан А.В. и др.** Применение сорбентов на основе природного цеолита и шамотной глины для извлечения ионов натрия и калия из соленой воды: предварительное исследование // *Chem Bull Kaz Nat Univ*. 2022. Т. 105. №. 2. DOI: 10.15328/cb1276.
- Zou Q., Liu M., Fan M. et al.** Effect of Na<sup>+</sup> on catalytic performance of CoCe/ZSM-5 catalysts for oxidation of toluene // *Journal of Rare Earths*. 2021. V. 39. N. 4. P. 409-418. DOI: 10.1016/j.jre.2020.07.017.
- Павлов М. Л., Шавалеев Д. А., Кутепов Б. И. и др.** Синтез и исследование катализаторов алкилирования бензола этиленом на основе цеолита ZSM-5 // *Нефтехимия*. 2016. Т. 56. №. 2. С. 171. DOI: 10.7868/S0028242116020118.
- Коробицына Л. Л., Величкина Л. М., Восмериков А. В.** Синтез и свойства сверхвысококремнеземных цеолитов типа ZSM-5 // *Журнал неорганической химии*. 2008. Т. 53. №. 2. С. 209-214.
- Натареев С.В., Захаров Д.Е., Снигирев М.Ю.** Исследование структуры катионита на основе древесных опилок и хитозана. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 3 (71). С. 67-71. DOI:10.6060/snt.20227103.0008
- Król M.** Natural vs. Synthetic zeolites//*Crystals*. 2020. V. 10. N. 7. P. 622. DOI: 10.3390/cryst10070622.
- Ma Qing Yuan, Huang Zhen et al.** Effects of ZSM-5 zeolite on pyrolysis of polystyrene: from stabilizing to catalyzing// *Turkish Journal of Chemistry*. 2023. V. 47: N. 4, Article 6. DOI: 10.55730/1300-0527.3574.
- Eminova S. F., Gakhramanov T. O., Mammadov S. E. et al.** The effect of modification on the acidic and catalytic properties of high silica zeolites in the methylation reaction of ethylbenzene // *Kimya Problemleri*. 2017. N. 3. P. 309-314
- Gordina, N. E., Prokof'ev, V. Y., Borisova, T. N., & Elizarova, A. M.** Synthesis of granular low-modulus zeolites from metakaolin using mechanochemical processing and ultrasonic treatment. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N7. P. 99-106. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5725
- Shavaleev D. A., Travkina O. S., Alyokhina I. E. et al.** Synthesis and investigation of the physico-chemical properties of a catalytic system based on zeolite ZSM-5 // *Bulletin of Bashkir University*. 2015. V. 20. N. 1. P. 58-65
- 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
- Seilkhanova G.A., Rakhim A.B., Kan A.V. et al.** The use of sorbents based on natural zeolite and chamotte clay for the extraction of sodium and potassium ions from salt water: a preliminary study // *Chem Bull Kaz Nat Univ*. 2022. V. 105. N. 2. DOI: 10.15328/cb1276 (in Russian)
- Zou Q., Liu M., Fan M. et al.** Effect of Na<sup>+</sup> on catalytic performance of CoCe/ZSM-5 catalysts for oxidation of toluene // *Journal of Rare Earths*. 2021. V. 39. N. 4. P. 409-418. DOI: 10.1016/j.jre.2020.07.017
- Pavlov M. L., Shavaleev D. A., Kutepov B. I. et al.** Synthesis and investigation of catalysts for alkylation of benzene with ethylene based on zeolite ZSM-5 // *Petrochemistry*. 2016. V. 56. N. 2. P. 171. DOI: 10.7868/S0028242116020118. (in Russian)
- Korobitsyna L. L., Velichkina L. M., Vosmerikov A.V.** Synthesis and properties of ultrahigh silica zeolites of the ZSM-5 type // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2008. V. 53. N. 2. P. 209-214. (in Russian)
- Natareev S.V., Zakharov D.E., Snigirev M.Yu.** Study of the structure of the cation exchange resin based on sawdust and chitosan. *Modern high technologies. Regional application. Ivanovo*. 2022. N 3 (71). P. 67-71. DOI:10.6060/snt.20227103.0008

Поступила в редакцию (Received) 10.05.2024  
Принята к опубликованию (Accepted) 10.07.2024