

Макова Анна Сергеевна

Синтез цеолита со структурой феррьерита: влияние метода синтеза на физико-химические и каталитические характеристики

Шифр специальности – 1.4.14 – кинетика и катализ

Химические науки

Шифр диссертационного совета 24.1.092.02

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук

119991, Москва, Ленинский проспект, 47

Тел.:(499) 137-13-79

E-mail: sci-secr@ioc.ac.ru

Дата размещения полного текста диссертации на сайте Института
<http://zioc.ru/>

02 августа 2026 года

Дата приема к защите

08 сентября 2026 года

Дата размещения автореферата на сайте ВАК <https://vak.gisnauka.ru/>

09 сентября 2026 года

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. Н. Д. ЗЕЛИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИОХ РАН)**

На правах рукописи



Макова Анна Сергеевна

**Синтез цеолита со структурой феррьерита: влияние метода синтеза на
физико-химические и каталитические характеристики**

1.4.14 – Кинетика и катализ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата химических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Лаборатории разработки и исследования полифункциональных катализаторов № 14 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук (ИОХ РАН) и на Кафедре общей и неорганической химии НИТУ МИСИС

Научный руководитель:

Кустов Леонид Модестович

доктор химических наук, профессор, зав. Лабораторией разработки и исследования полифункциональных катализаторов ФГБУН Института органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН

Официальные оппоненты

Колоколов Даниил Игоревич

доктор химических наук, ведущий научный сотрудник Отдела физико-химических исследований на атомно-молекулярном уровне ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН»

Фомкин Анатолий Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Лабораторией сорбционных процессов ФГБУН Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН)

Ведущая организация

Институт химии и химической технологии СО РАН – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» (ИХХТ ФИЦ КНЦ СО РАН)

Защита диссертации состоится «17» ноября 2026 г. в 11:00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.092.02 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук (ИОХ РАН) по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОХ РАН и на официальном сайте ИОХ РАН <http://zioc.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 47, ученому секретарю Диссертационного совета ИОХ РАН.

Ученый секретарь

Диссертационного совета 24.1.092.02

Кандидат химических наук

Е. А. Редина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Цеолиты – это группа природных или синтетических алюмосиликатов, обладающих уникальной структурой и свойствами. В настоящее время основными областями применения цеолитов являются химическая и нефтеперерабатывающая отрасли промышленности. Так, например, цеолиты являются важным инструментом в современной нефтепереработке, способствующим повышению производительности, снижению экономических затрат и повышению экологической безопасности. Постоянное развитие технологии синтеза и модификации цеолитов открывает новые перспективы для оптимизации существующих процессов и разработки инновационных решений в нефтегазовом секторе.

Цеолит с топологией феррьерита (FER) применяется в различных процессах, таких как изомеризация линейных олефинов, получение диметилового эфира, разложение N_2O и другие. Однако более широкое применение данного цеолита ограничено длительностью его синтеза. Применяемый в настоящее время гидротермальный метод производства позволяет получать цеолит FER высокого качества только при длительной кристаллизации – от 5 дней до нескольких недель (в зависимости от температуры синтеза и используемого структурообразующего соединения – темплата). Разработка новых или модификация уже существующих методов синтеза цеолита FER, приводящих к существенному сокращению времени кристаллизации с сохранением высокого качества получаемого материала, является актуальной задачей. Решение данной задачи позволит расширить области применения данного цеолита и сократить экономические затраты на его производство.

Одним из возможных путей решения данной задачи является применение микроволново-гидротермального и сольвотермального методов для синтеза цеолита FER. К их преимуществам можно отнести возможность регулирования физико-химических характеристик получаемых материалов и значительное сокращение времени синтеза (до нескольких часов).

Выбор оптимальных реагентов для синтеза также является важным фактором при получении цеолита FER высокого качества. В частности, использование различных источников алюминия приводит к различной степени встраивания ионов алюминия в структуру цеолита при одинаковых условиях синтеза (температуре и времени кристаллизации).

Катализаторы на основе цеолита FER высокоэффективны в удалении парниковых газов (N_2O , CO_2) из атмосферы. Например, проведение реакции прямого разложения закиси азота на катализаторах Me-FER (где Me – Fe, Cu, Co) позволяет значительно сократить температуру

проведения реакции до 400-500 °С, в то время как на оксидных и перовскитных катализаторах реакцию проводят при температуре 600-700 °С. Проведение реакции гидрирования CO₂ на катализаторах, содержащих в своем составе цеолит FER, позволяет не только сократить количество парниковых газов, но и получать продукты с добавленной стоимостью, в частности диметиловый эфир (ДМЭ). Разработка оптимального метода синтеза, позволяющего получать цеолит FER с наилучшим набором физико-химических свойств для данных реакций при минимальных экономических затратах, благоприятно скажется на внедрении катализаторов на их основе в промышленном масштабе.

Цель работы – разработка микроволново-гидротермального и сольвотермального методов синтеза цеолита FER, обеспечивающих регулирование физико-химических и каталитических свойств этого цеолита.

Для осуществления поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработать методику синтеза цеолита FER путем микроволново-гидротермального способа, позволяющего сократить время синтеза цеолита по сравнению с гидротермальным способом; определить основные параметры синтеза, позволяющие направленно регулировать его физико-химические свойства;
2. Разработать методику синтеза цеолита FER путем сольвотермального способа, позволяющего сократить время синтеза цеолита по сравнению с гидротермальным способом; определить основные параметры синтеза, позволяющие направленно регулировать его физико-химические свойства;
3. Изучить физико-химические характеристики цеолитов FER, полученных микроволново-гидротермальным, сольвотермальным и гидротермальным методами, с использованием широкого набора методов анализа (РФА, СЭМ, низкотемпературная адсорбция-десорбция N₂, ИК-Фурье спектроскопия, ИК-спектроскопия диффузного отражения с использованием молекул-зондов – дейтероацетонитрила и монооксида углерода (ИК-CD₃CN, ИК-CO), ЯМР спектроскопия, УФ-видимая спектроскопия, СЭМ-ЭДС);
4. Исследовать каталитические свойства синтезированных цеолитов FER в реакциях разложения закиси азота и гидрирования CO₂ с получением ДМЭ.

Научная новизна и практическая значимость работы

В настоящей работе впервые разработан способ получения цеолита со структурой FER микроволново-гидротермальным методом с использованием этилендиамина в качестве структурообразующего соединения. Применение этилендиамина в качестве темплата при синтезе цеолитов FER обеспечивает получение материалов высокого качества и характеризуется экономической эффективностью за счет использования недорогого сырья

отечественного производства. Установлено, что повышение времени синтеза от 4 до 12 ч позволяет увеличить удельную площадь поверхности ($S_{БЭТ}$) и общий объем пор ($V_{общ}$) с 285 м²/г и 0.155 см³/г до 337 м²/г и 0.179 см³/г, соответственно, а также повысить соотношение Бренstedовских и Льюисовских кислотных центров (БКЦ/ЛКЦ) с 1.9 до 3.0. Сравнение характеристик серий образцов, полученных микроволново-гидротермальным и гидротермальным методами, показало преимущества микроволнового нагрева перед традиционным термическим, поскольку образцы гидротермальной серии обладали меньшей пористостью, а также содержали примесные фазы. Было показано, что скорость разложения N₂O на катализаторах Fe-FER зависела от концентрации ЛКЦ и текстурных характеристик полученных цеолитов.

Разработан способ получения цеолита FER сольвотермальным методом с использованием пиридина, выступающего и как растворитель, и как структурообразующее соединение. Применение пиридина в сольвотермальном синтезе позволяет получать цеолиты типа FER с воспроизводимо высокими качественными характеристиками. Доступность и низкая себестоимость отечественного пиридина повышают технологическую и экономическую целесообразность данного подхода. Выявлены наилучшие прекурсоры Al для синтеза цеолита FER (сульфат и изопропоксид алюминия), позволяющие получать высококачественные материалы: $S_{БЭТ} = 390$ м²/г, $V_{общ} = 0.177$ см³/г, соотношение БКЦ/ЛКЦ = 5.71 и $S_{БЭТ} = 376$ м²/г, $V_{общ} = 0.168$ см³/г, соотношение БКЦ/ЛКЦ = 6.03 для цеолитов FER, полученных из сульфата и изопропоксида алюминия, соответственно. Показано, что на селективность образования ДМЭ в реакции гидрирования CO₂ оказывают влияние кислотные свойства полученных материалов, а также содержание примесных фаз.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработан микроволново-гидротермальный способ получения цеолита FER с использованием органического темплата – этилендиамина, позволяющий сократить время кристаллизации ~ в 10 раз по сравнению с традиционным гидротермальным методом.
2. Впервые установлено, что использование сульфата или изопропоксида алюминия в качестве прекурсоров при сольвотермальном синтезе цеолита FER за 96 ч позволяет получить образцы с высокой кристалличностью, развитой системой пор и высоким содержанием БКЦ, тогда как при применении иных источников алюминия (нитрата алюминия, алюмината натрия, бемита или оксида алюминия) для достижения сопоставимого качества требуется увеличить длительность кристаллизации.

3. Установлена взаимосвязь между количеством ЛКЦ, текстурными характеристиками цеолитов (количеством мезопор) и каталитической активностью Fe-содержащих катализаторов на основе цеолита FER (Fe-FER) в реакции разложения N_2O : увеличение количества ЛКЦ повышает скорость данной реакции, а повышение доли мезопор способствует более равномерному распределению активной фазы Fe по поверхности цеолита.
4. Высокое содержание БКЦ в применяемом цеолите выступает ключевым фактором, положительно влияющим на селективность образования диметилового эфира в процессе гидрирования CO_2 на катализаторах состава Cu-Zn/SiO₂-FER.

Личный вклад соискателя

Маковой А. С. проведен анализ современной научной литературы, на основании которого были предложены возможные направления исследований, сформулированы задачи и цели диссертационной работы, подробно рассмотрены и исследованы различные пути получения цеолита FER, а также изучены его свойства в двух каталитических реакциях: разложении N_2O и гидрировании CO_2 . Автором был выполнен самостоятельный синтез серий цеолита FER различными методами, проведен подробный анализ полученных результатов физико-химических методов анализа для синтезированных образцов.

Степень достоверности и апробация работы

Серии цеолитов, полученных разными методами синтеза, были охарактеризованы набором современных методов физико-химического анализа (РФА, СЭМ, низкотемпературная адсорбция-десорбция N_2 , ИК-Фурье спектроскопия, ИК-спектроскопия диффузного отражения с использованием молекул-зондов – дейтероацетонитрила и монооксида углерода (ИК-CD₃CN, ИК-CO), ЯМР спектроскопия, УФ-видимая спектроскопия, СЭМ-ЭДС). Реакции разложения N_2O и гидрирования CO_2 проводили на лабораторных проточных каталитических установках, продукты каталитических реакций анализировали методом газовой хроматографии.

Основные результаты работы представлены на международных и всероссийских конференциях в виде 10 докладов: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023» (10-21 апреля 2023 г., Москва); X Молодежная конференция ИОХ РАН (29-31 мая 2023 г., Москва); VII Международная молодежная научная конференция «Tatarstan UpExPro 2023» (6-9 апреля 2023 г., Казань); VII Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (28 июня – 1 июля 2023 г., Суздаль);

77-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2023» (11-15 сентября 2023 г., Москва); XXVII Всероссийская конференция молодых ученых-химиков (16-18 апреля 2024 г., Нижний Новгород); XXV Международная научно-практическая конференция «Химия и химическая технология в XXI веке» (20-24 мая 2024 г., Томск); 10-ая Всероссийская цеолитная конференция «Цеолиты и мезопористые материалы: достижения и перспективы» (24-27 июня 2024 г., Москва); XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (7-12 октября 2024 г., Федеральная территория «Сириус»); V Российский конгресс по катализу «РОСКАТАЛИЗ» (21-26 апреля 2025 г., Санкт-Петербург).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 3 из которых входят в список журналов первого квартиля, и получен 1 патент РФ.

Объем и структура работы

Диссертация изложена на **137** страницах, содержит **14** таблиц, **47** рисунков, **2** схемы. Работа состоит из введения, литературного обзора, экспериментальной части, обсуждения результатов, выводов, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений. Список литературы содержит **177** источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проблемы, поставлена цель исследования, обозначены задачи, обсуждены научная новизна и практическая значимость работы.

В **Главе 1** представлен обзор современной научной литературы, в котором подробно рассмотрены возможные способы получения цеолита FER. Установлена перспективность микроволново-гидротермального и сольвотермального методов синтеза данного типа цеолита, которые позволяют сократить время кристаллизации цеолита FER (в сравнении с гидротермальным методом) без ухудшения физико-химических свойств получаемых материалов.

В **Главе 2** приведены предлагаемые методики синтеза цеолита FER микроволново-гидротермальным, гидротермальным и сольвотермальным методами, а также представлено описание методов анализа полученных материалов и условия проведения каталитических экспериментов.

Структура, состав и морфология синтезированных материалов, полученных в настоящей работе, были подтверждены следующими современными физико-химическими методами анализа: порошковым рентгенофазовым анализом (РФА), сканирующей электронной микроскопией (СЭМ), низкотемпературной адсорбцией-десорбцией азота,

инфракрасной спектроскопией диффузного отражения с использованием в качестве молекулы-зонда дейтероацетонитрила (ИК-CD₃CN).

В **Главе 3** приведено обсуждение результатов исследования синтезированных образцов FER физико-химическими методами и их каталитической активности в реакциях разложения закиси азота и гидрирования углекислого газа.

Синтез цеолита FER различными методами

Синтез цеолита FER микроволново-гидротермальным и гидротермальным методами

Цеолит со структурой FER был впервые получен микроволново-гидротермальным методом с использованием этилендиамина (EDA) в качестве структурообразующего соединения. Для сравнения была получена серия образцов гидротермальным методом. Обозначения образцов и условия синтеза представлены в таблице 1. Буквы «МГ» и «Г» в шифре образцов обозначают метод получения цеолита (микроволново-гидротермальный и гидротермальный, соответственно), цифра – время синтеза цеолита.

Таблица 1 – Обозначения и условия синтеза образцов FER, полученных микроволново-гидротермальным и гидротермальным методами.

Обозначение образца	Метод синтеза	Время синтеза, ч	Температура синтеза, °C	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ , моль/моль
FER-МГ-4	Микроволново-гидротермальный (МГ)	4	190	20
FER-МГ-6		6		
FER-МГ-8		8		
FER-МГ-12		12		
FER-Г-72*	Гидротермальный (Г)	72		
FER-Г-96*		96		
FER-Г-120		120		
FER-Г-168		168		

* в исходный гель при синтезе данных образцов были добавлены затравочные кристаллы цеолита FER (5 % масс. на исходное количество SiO₂).

Мольный состав исходного геля для образцов, полученных микроволново-гидротермальным и гидротермальным методами, был следующим: 1SiO₂:0.05Al₂O₃:0.6Na₂O:1.3EDA:50H₂O. В качестве источника кремния применялся тетраэтоксисилан (TEOS), в качестве источника алюминия – NaAlO₂. После кристаллизации образцы промывали дистиллированной водой, сушили при температуре 120 °C в течение 12 ч и прокаливали при температуре 550 °C в течение 6 ч для удаления органического темплата.

Для получения Н-форм полученные цеолиты подвергали ионному обмену с 1 М раствором NH_4NO_3 (3 цикла по 2 ч при 80 °С) с последующим прокаливанием в потоке воздуха при 600 °С в течение 5 ч.

Синтез цеолита FER сольвотермальным методом

Обозначения образцов и условия синтеза образцов FER сольвотермальным методом представлены в таблице 2. Буква «С» в шифре образцов перед цифрой обозначает сольвотермальный метод получения цеолита, цифра – время синтеза цеолита, последняя буква в шифре – используемый источник алюминия («С» – сульфат алюминия, «Н» – нитрат алюминия и т.д.).

Таблица 2 – Обозначения и условия синтеза образцов FER, полученных сольвотермальным методом.

Обозначение образца	Время синтеза, ч	Температура синтеза, °C	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ , моль/моль	Источник Al
FER-C-48-C	48	190	20	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O
FER-C-72-C	72			
FER-C-96-C	96			
FER-C-120-C	120			
FER-C-96-H	96			Al(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O
FER-C-96-И				Al(O- <i>i</i> -Pr) ₃
FER-C-96-Б				AlO(OH)
FER-C-96-A				NaAlO ₂
FER-C-96-O				Al ₂ O ₃

Мольный состав исходного геля для образцов, полученных сольвотермальным методом, был следующим: $1.5\text{SiO}_2:0.075\text{Al}_2\text{O}_3:8.0\text{H}_2\text{O}:2.0\text{HF}:4.0\text{n-BuNH}_2:16\text{Pyr}$. В качестве источника кремния применялся TEOS, используемые для синтеза источники алюминия представлены в таблице 2. Смесь пиридина (Pyr) и н-бутиламина (n-BuNH_2) использовалась и в качестве структурообразующих соединений, и в качестве реакционной среды, в которой проводилась кристаллизация. После кристаллизации образцы промывали дистиллированной водой, сушили при температуре 120 °С в течение 12 ч и прокаливали при температуре 600 °С в течение 8 ч для удаления органического темплата.

Для образца FER-C-96-A Н-форма также была получена методом ионного обмена с раствором NH_4NO_3 .

Результаты РФА анализа синтезированных микроволново-гидротермальным (МГ) и гидротермальным (Г) методами образцов представлены на рисунке 1. При сравнении полученных рентгенограмм с типичной структурой FER (#82-1395) было установлено, что цеолит FER был получен из всех исходных гелей.

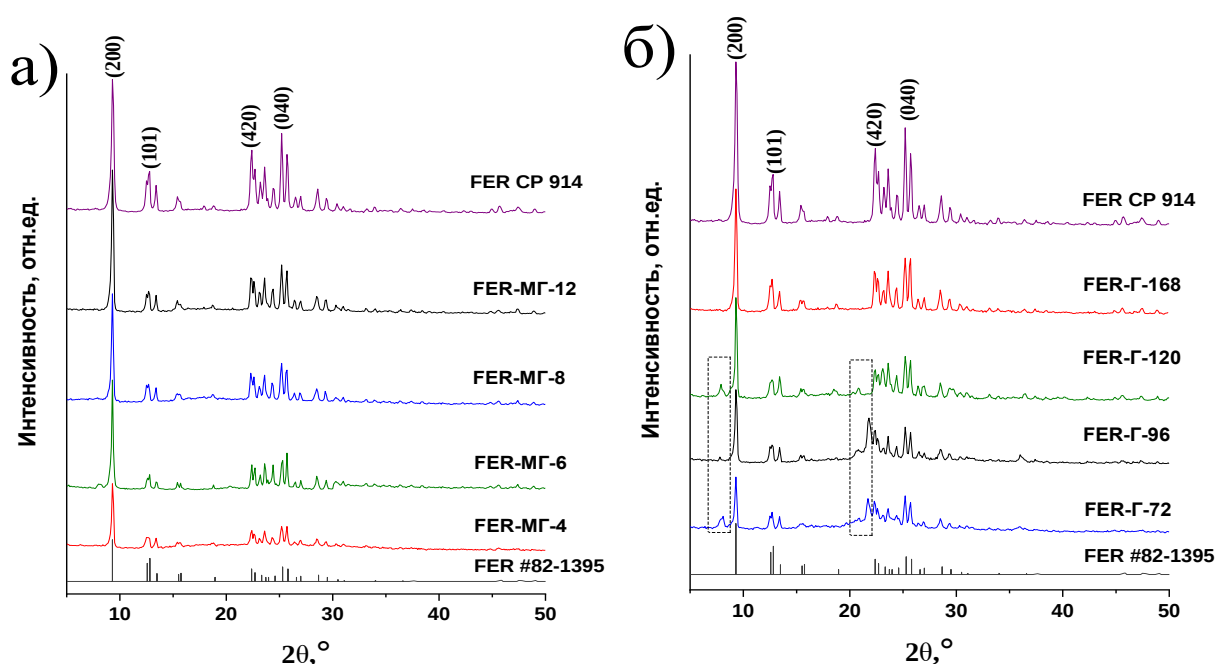


Рисунок 1 – Рентгенограммы образцов, полученных микроволново-гидротермальным (а) и гидротермальным(б) методами.

На основе полученных результатов была рассчитана относительная степень кристалличности (ОСК) полученных образцов, где ОСК представляет собой сумму интенсивностей характерных рефлексов ($2\theta = 9.3; 12.7; 22.3; 25.2^\circ$). В качестве образца-сравнения для данных серий образцов был использован промышленный образец FER CP 914 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 55$), его ОСК была принята за 100 %. Полученные результаты представлены в таблице 3. С увеличением времени синтеза ОСК растет как для образцов серии FER-МГ, так и для образцов серии FER-Г. При этом наибольшее значение ОСК продемонстрировал цеолит FER-МГ-12, полученный методом МГ.

Детальный анализ рентгенограмм образцов, полученных гидротермальным методом, позволил обнаружить в них примесные фазы SiO_2 , цеолитов MOR, ZSM-5 (данные области выделены пунктиром на рисунке 1б). В то же время, микроволново-гидротермальный метод позволил получить фазово-чистые цеолиты (исключение – образец FER-МГ-4, в котором обнаружена аморфная фаза).

Таблица 3 – Основные характеристики образцов серий FER-МГ и FER-Г.

Обозначение образца	ОСК, %	Текстурные характеристики					Кислотные характеристики		
		$S_{БЭТ}$, м ² /г	S_{μ} , м ² /г	$V_{общ}$, см ³ /г	V_{μ} , см ³ /г	$\frac{V_{\mu}}{V_{общ}}$	I_{2294*} , К-М	I_{2320*} , К-М	$\frac{I_{2294}}{I_{2320}}$
FER-МГ-4	46	285	257	0.155	0.104	0.67	3.3	1.7	1.9
FER-МГ-6	69	297	273	0.166	0.114	0.69	3.4	1.6	2.1
FER-МГ-8	78	348	328	0.175	0.126	0.72	3.8	1.7	2.2
FER-МГ-12	91	353	337	0.179	0.134	0.75	4.2	1.4	3.0
FER-Г-72	46	212	199	0.103	0.064	0.62	2.8	1.3	2.2
FER-Г-96	53	244	232	0.114	0.085	0.75	2.9	1.1	2.6
FER-Г-120	61	274	259	0.124	0.098	0.79	3.8	1.3	2.9
FER-Г-168	75	302	276	0.154	0.124	0.81	4.6	1.5	3.1

*Полосы при 2294 и 2320 см⁻¹ в ИК-спектре адсорбированного дейтероацетонитрила соответствуют комплексам с Бренстедовскими и Льюисовскими кислотными центрами, соответственно.

Полученные на сканирующем электронном микроскопе микрофотографии позволили определить, что для всех цеолитов серии FER-МГ и FER-Г, в основном, характерна пластиноподобная форма кристаллов (рисунок 2). При этом образцы представляют собой нерегулярную смесь мелких и крупных кристаллов. Увеличение времени синтеза способствует формированию однородной правильной формы кристаллов. Серия образцов FER-Г демонстрирует наличие более регулярных частиц (наблюдается меньший разброс в размерах частиц). В образцах FER-Г-72 и FER-Г-96 преобладают частицы размером менее 1 мкм, что, вероятно, связано с добавлением затравочных кристаллов в исходный гель. Растворение затравочных кристаллов приводит к образованию новых центров кристаллизации (в случае полного растворения) или продолжению роста кристаллов (в случае частичного растворения).

Текстурные характеристики синтезированных образцов представлены в таблице 3. Образцы серии FER-МГ обладают более развитой удельной площадью поверхности ($S_{БЭТ}$ = 285-353 м²/г) и большим объемом пор ($V_{общ}$ = 0.155-0.179 см³/г), в сравнении с образцами серии FER-Г ($S_{БЭТ}$ = 212-302 м²/г, $V_{общ}$ = 0.103-0.154 см³/г). Наблюдается следующая закономерность: с повышением времени синтеза увеличиваются показатели $S_{БЭТ}$ и $V_{общ}$, а также доля микропор по отношению к общему объему пор ($V_{\mu}/V_{общ}$), что, по-видимому, связано с ростом упорядоченности системы. Большее количество мезопор в образцах серии FER-МГ может быть связано с так называемой «вторичной» мезопористостью, объясняемой существованием межкристаллических пустот.

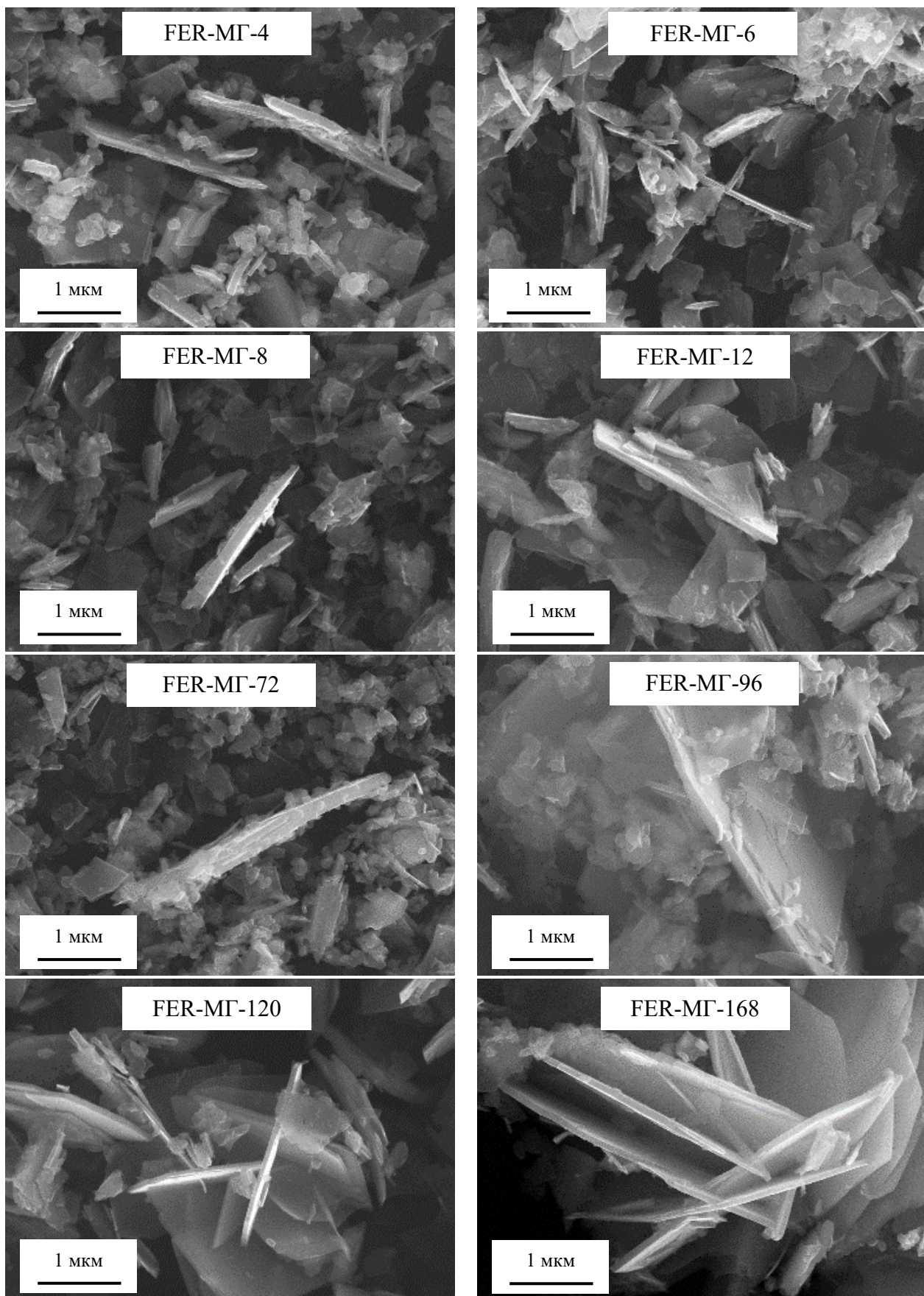


Рисунок 2 – Микрофотографии образцов FER, полученных микроволново-гидротермальным и гидротермальным методами.

Кислотные характеристики образцов были изучены методом инфракрасной спектроскопии диффузного отражения с использованием ацетонитрила в качестве молекулы-зонда (ИК-CD₃CN). ИК-спектры образцов серий FER-МГ и FER-Г в области валентных колебаний ОН-групп (3400–3800 см⁻¹) после вакуумирования при 400 °С в течение 2 ч до адсорбции ацетонитрила показаны на рисунке 3(а, б). В спектрах можно выделить полосы нескольких групп. Полоса поглощения при 3743 см⁻¹ связана с концевыми силанольными группами (Si-OH), расположенными на внешней поверхности цеолита, а плечо при 3710 см⁻¹ – с силанолами, расположенными внутри пор. Поглощение при 3655 см⁻¹ обычно указывает на гидроксилы, связанные с внекаркасными формами алюминия (Al-OH). Полоса поглощения в области 3600 см⁻¹ свидетельствует о наличии мостиковых кислотных групп Si-(OH)-Al – кислотных центров Бренстеда (БКЦ).

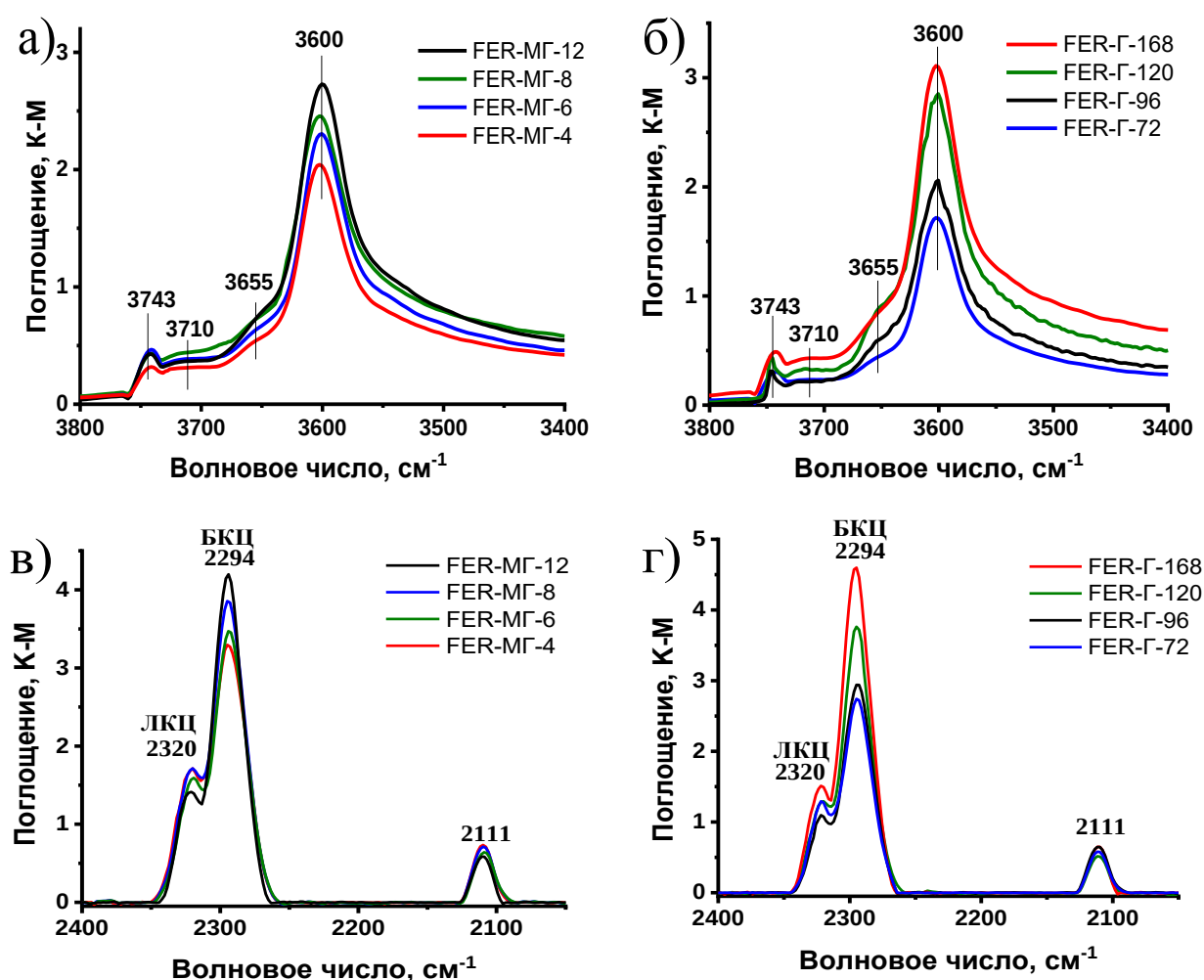


Рисунок 3 – ИК-спектры цеолитов FER, синтезированных микроволново-гидротермальным и гидротермальным методами, в области ОН-групп после вакуумирования (а, б), после адсорбции CD₃CN (в, г).

ИК-спектры CD_3CN , адсорбированного на цеолитах FER-МГ и FER-МГ, в области характерных колебаний представлены на рисунке 3(в, г). На полученных спектрах наблюдались полосы поглощения при 2320 см^{-1} , 2294 см^{-1} и 2111 см^{-1} . Согласно литературным данным, полоса с максимумом при 2320 см^{-1} соответствует координации молекул ацетонитрила Льюисовскими кислотными центрами (ЛКЦ), полоса с максимумом при 2294 см^{-1} – координации молекул ацетонитрила Бренстедовскими кислотными центрами (БКЦ). Полоса поглощения при 2111 см^{-1} относится к деформационным колебаниям C-D связей в CD_3 -группе.

Значения интенсивностей полос поглощения при 2320 см^{-1} и 2294 см^{-1} , а также отношений I_{2294}/I_{2320} для полученных образцов представлены в таблице 3. С повышением времени синтеза наблюдается рост количества БКЦ (I_{2294}) и отношения I_{2294}/I_{2320} (БКЦ/ЛКЦ). Данные результаты могут свидетельствовать об увеличении количества мостиковых гидроксильных групп (Si-(OH)-Al), за счет повышения содержания кристаллической фазы.

Таким образом, микроволново-гидротермальный метод позволил значительно сократить время синтеза в сравнении с гидротермальным методом. При этом образцы серии FER-МГ продемонстрировали высокую кристалличность, не содержали примесных фаз, обладали высокими значениями текстурных характеристик, при этом не уступали по количеству БКЦ образцам, полученным гидротермальным методом.

Исследование образцов серий FER-C

На рисунке 4 представлены рентгенограммы образцов серии FER-C, полученных при различном времени синтеза (рисунок 4а) и из различных прекурсоров алюминия (рисунок 4б). Вид рентгенограмм значительно отличается от представленных на рисунке 1, так можно видеть интенсивный пик при $2\theta = 9.3^\circ$ и едва заметные пики в диапазоне $12 - 32^\circ$ (рисунок 4а). Пик высокой интенсивности в направлении (200) при $2\theta = 9.3^\circ$ свидетельствует об образовании крупных вытянутых кристаллов в этом кристаллографическом направлении. С повышением времени кристаллизации интенсивность пика при 9.3° значительно увеличивается, а также наблюдается изменение интенсивностей рефлексов в других направлениях. При анализе рентгенограмм не было обнаружено примесных фаз.

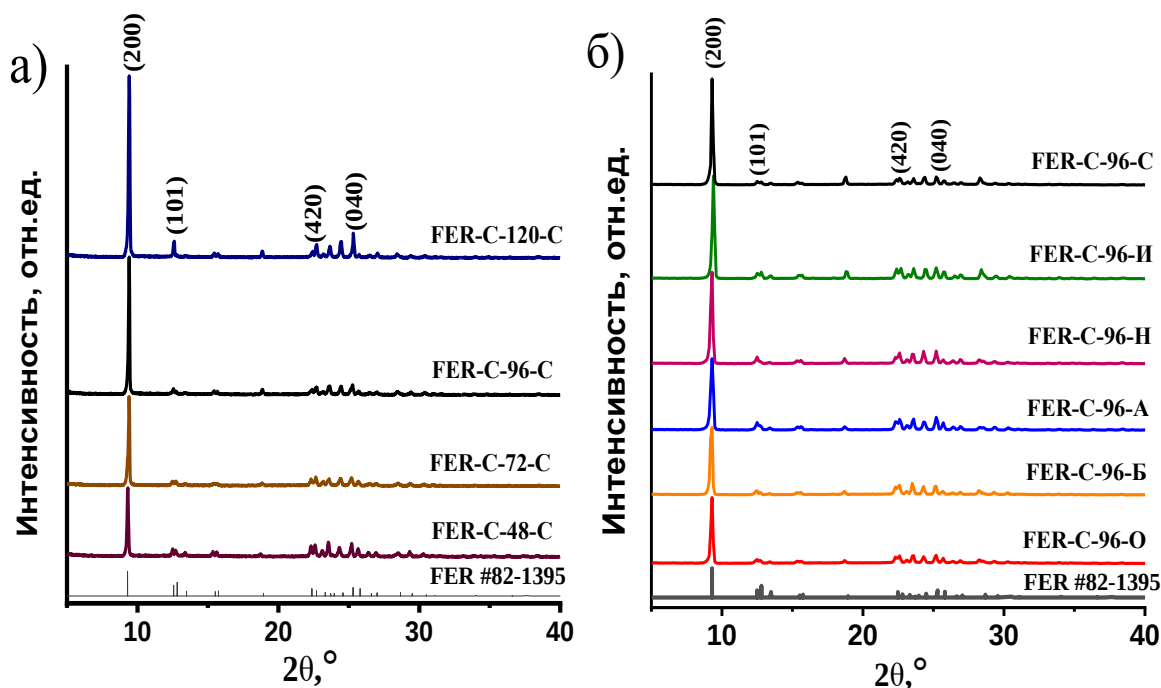


Рисунок 4 – Рентгенограммы образцов FER, полученных сольвотермальным методом при разном времени синтеза (а) и при использовании различных источников алюминия (б).

На рисунке 5 представлены снимки СЭМ образцов FER, полученных сольвотермальным методом при разном времени синтеза. Видно, что на снимке образца FER-C-48-C наблюдается небольшое количество вытянутых кристаллов среди множества более мелких частиц. Вытянутые кристаллы с орторомбической морфологией являются типичной формой частиц цеолита FER, полученных сольвотермальным методом с использованием смеси пиридина и н-бутиламина в качестве темплатов. Более мелкие частицы, преобладающие на снимке, могут представлять собой зародыши цеолита (ядра нуклеации), а также мелкие частицы цеолита, продолжающие свой рост.

Увеличение времени синтеза до 72 ч приводит к уменьшению количества мелких частиц и образованию большего количества крупных частиц цеолита FER. На снимках образцов, полученных за 96 и 120 ч, преобладают крупные частицы цеолита и практически отсутствуют мелкие. Также, на данных снимках, помимо монокристаллов, наблюдаются и поликристаллы (отчетливо видно на снимке образца FER-C-120-C). Для дальнейшего исследования оптимальным было выбрано время кристаллизации 96 ч, поскольку данное время позволяет получать цеолит с высокой кристалличностью, а увеличение времени приводит лишь к росту кристаллов и незначительному изменению текстурных характеристик (таблица 4).

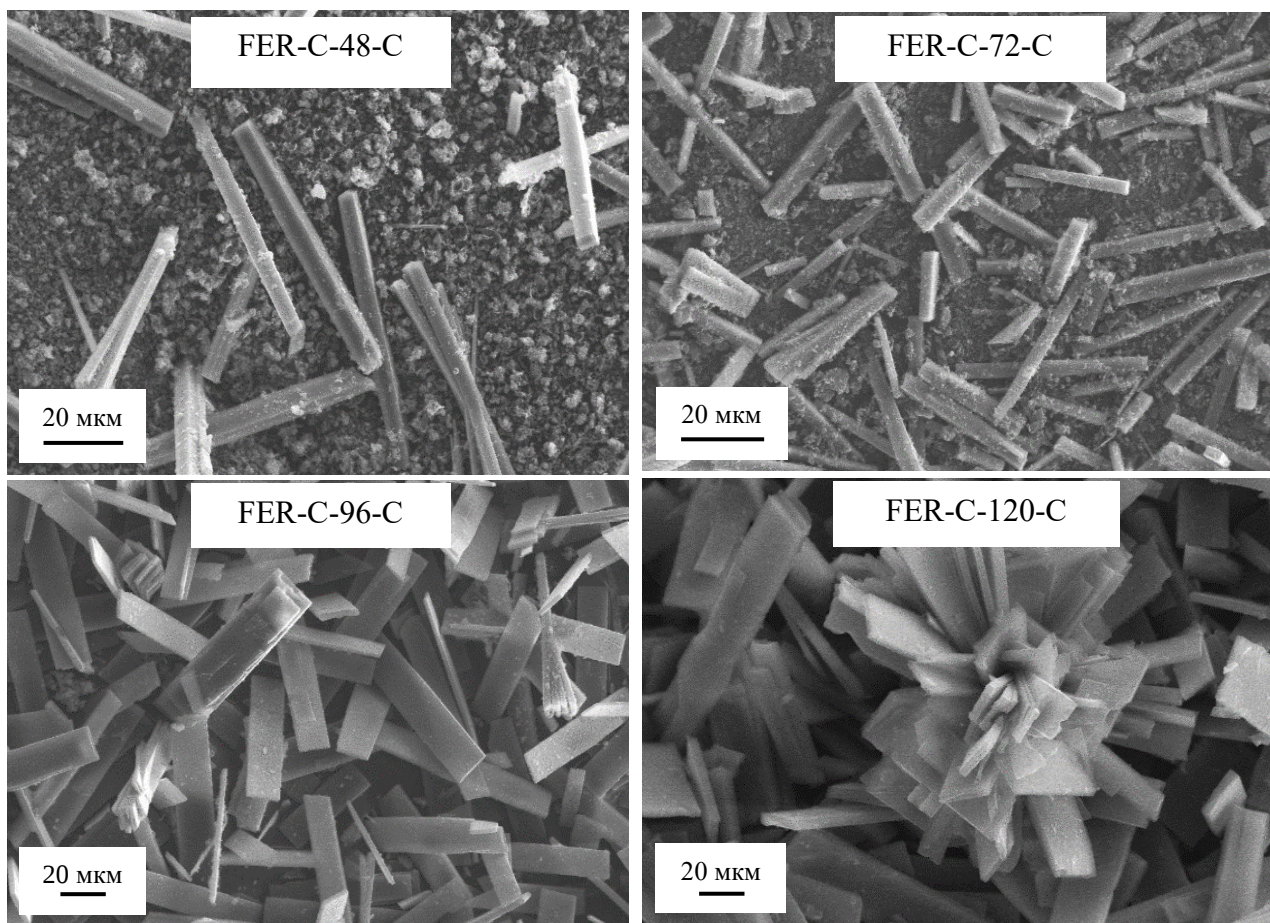


Рисунок 5 – Микрофотографии образцов FER, полученных сольвотермальным методом при разном времени синтеза.

Таблица 4 – Текстульные характеристики образцов FER-C-96 и FER-C-120.

Образец	$S_{БЭТ},$ m^2/g	$S_{\mu},$ m^2/g	$V_{общ},$ cm^3/g	$V_{\mu},$ cm^3/g	$\frac{V_{\mu}}{V_{общ}}$
FER-C-96-C	368	353	0.160	0.137	0.86
FER-C-120-C	376	365	0.158	0.142	0.90

На рисунке 3б представлены рентгенограммы образцов FER, полученных за 96 ч сольвотермальным методом при использовании различных источников Al. Кривые на рисунке (снизу вверх) расположены по увеличению интенсивности пика при $2\theta = 9.3^\circ$. Максимальной суммой интенсивностей характерных пиков в данной серии обладал образец FER-C-96-C, для него ОСК была принята за 100 %. Значения ОСК для других цеолитов серии FER-C представлены в таблице 5. При этом примесные фазы в данных образцах (по результатам РФА) обнаружены не были.

Таблица 5 – Основные характеристики образцов FER-C-96, полученных из различных источников алюминия.

Обозначение образца	ОСК, %	Текстурные характеристики					Кислотные характеристики		
		$S_{БЭТ}$, м ² /г	S_{μ} , м ² /г	$V_{общ}$, см ³ /г	V_{μ} , см ³ /г	$\frac{V_{\mu}}{V_{общ}}$	I_{2294} , К-М	I_{2320} , К-М	$\frac{I_{2294}}{I_{2320}}$
FER-C-96-C	100	390	372	0.177	0.145	0.82	3.37	0.59	5.71
FER-C-96-И	96	376	365	0.168	0.139	0.83	3.46	0.55	6.03
FER-C-96-Н	89	368	353	0.161	0.130	0.80	3.13	0.76	4.12
FER-C-96-А	71	358	339	0.159	0.119	0.75	2.78	0.80	3.48
FER-C-96-Б	64	342	315	0.163	0.113	0.69	2.33	0.98	2.38
FER-C-96-О	62	358	301	0.197	0.123	0.62	1.99	1.13	1.76

Снимки СЭМ для данной серии образцов представлены на рисунке 6. Видно, что для всех образцов характерно образование вытянутых кристаллов, по значениям длины и ширины (l и w) кристаллов образцы можно расположить в следующий ряд: FER-C-96-C ($l = 80-100$ мкм, $w = 20-25$ мкм), FER-C-96-И ($l = 50-70$ мкм, $w = 15-20$ мкм), FER-C-96-А ($l = 50-70$ мкм, $w = 15-205$ мкм), FER-C-96-Н $\approx$ FER-C-96-Б $\approx$ FER-C-96-О ($l = 40-60$ мкм, $w = 10-15$ мкм).

Стоит отметить, что поликристаллы присутствовали во всех образцах, однако наибольшее их количество наблюдалось для FER-C-96-Н и FER-C-96-А.

Согласно полученным результатам низкотемпературной адсорбции-десорбции азота (представлены в таблице 5), все образцы серии FER-C-96 обладают развитой системой пор: были достигнуты высокие значения площади поверхности ($S_{БЭТ} = 390-342$ м²/г) и объема пор ($V_{общ} = 0.159-0.197$ см³/г). Наибольшие значения $S_{БЭТ}$ продемонстрировали образцы, полученные с использованием сульфата алюминия и изопропоксида алюминия.

Максимальный объем пор ($V_{общ} = 0.197$ см³/г) был получен для образца, синтезированного из оксида алюминия, при этом доля микропор ($V_{\mu}/V_{общ}$) в этом образце была наименьшей в данной серии. Такой результат может быть связан с непрореагировавшей частью Al_2O_3 в образце, поскольку используемый для синтеза цеолита промышленный Al_2O_3 был мезопористым ($V_{общ} = 0.804$ см³/г, $V_{\mu} = 0.007$ см³/г).

Рассчитанные значения доли микропор от общего объема пор ($V_{\mu}/V_{общ}$) в образцах хорошо согласуются с результатами кристалличности образцов. Цеолиты FER-C-96-C и FER-C-96-И продемонстрировали близкие наибольшие значения кристалличности и доли микропор из всей серии. По уменьшению доли микропор и степени кристалличности остальные цеолиты можно расположить в следующий ряд: FER-C-96-Н – FER-C-96-А – FER-C-96-Б – FER-C-96-О.

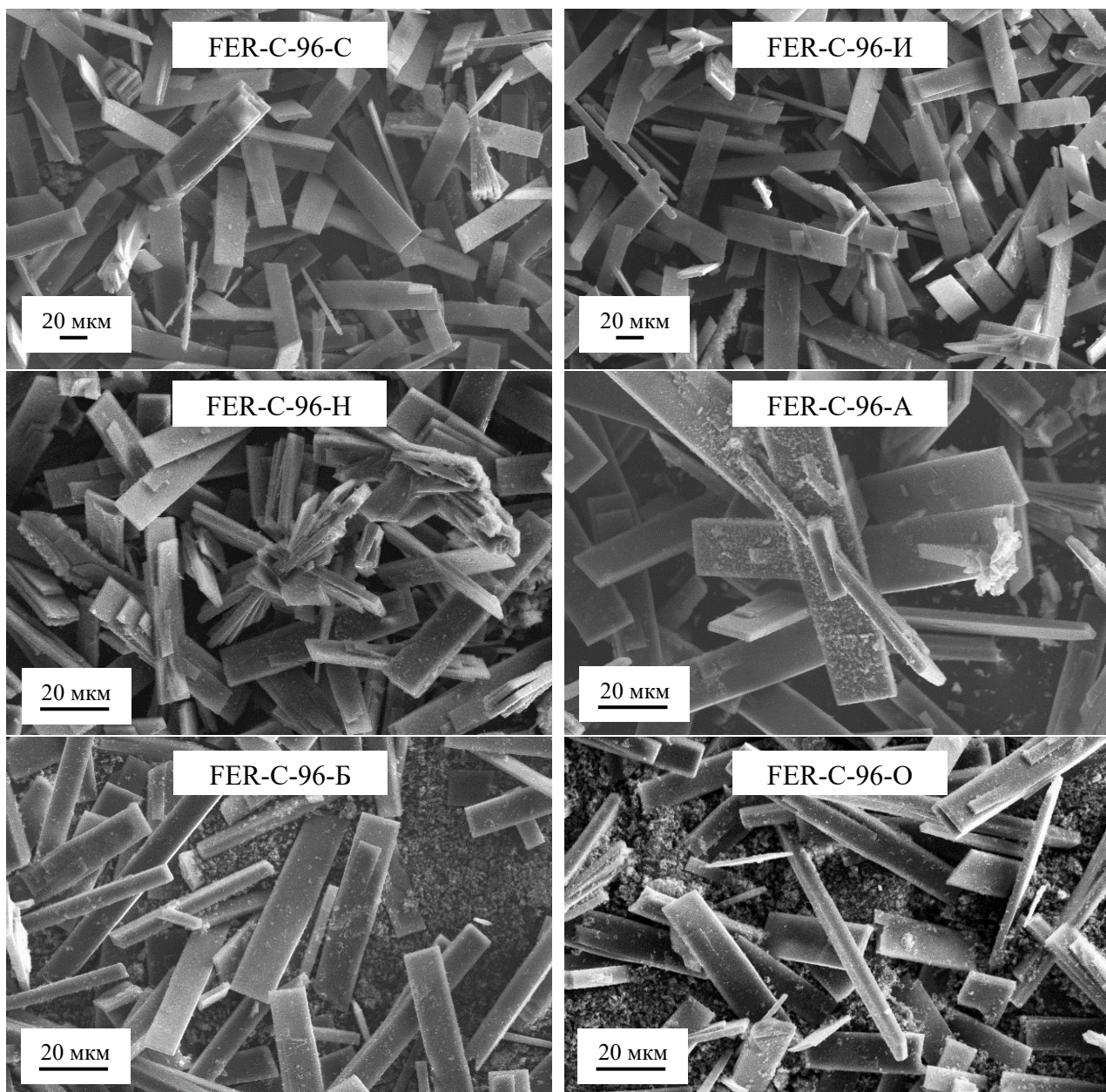


Рисунок 6 – Микрофотографии образцов FER-C-96, полученных из различных источников алюминия.

ИК-спектры образцов серии FER-C-96 в области валентных колебаний ОН-групп ($3400\text{--}3800\text{ см}^{-1}$) до адсорбции ацетонитрила представлены на рисунке 7а. Во всех спектрах присутствуют следующие полосы поглощения: полосы поглощения при 3743 см^{-1} и 3710 см^{-1} связаны с силанольными группами (Si-OH), расположенными на внешней поверхности цеолита и внутри пор, соответственно; полоса поглощения при 3655 см^{-1} связана с наличием внекаркасных форм алюминия (ЛКЦ); полосы поглощения при 3600 и 3604 см^{-1} свидетельствуют о наличии мостиковых гидроксильных групп Si-(OH)-Al (БКЦ)¹.

¹ P. Nachtigall, O. Bludský, L. Grajciar, D. Nachtigallová, M.R. Delgado, C.O. Areán, Computational and FTIR spectroscopic studies on carbon monoxide and dinitrogen adsorption on a high-silica H-FER zeolite, Phys. Chem. Chem. Phys. 11 (2009) 791–802.

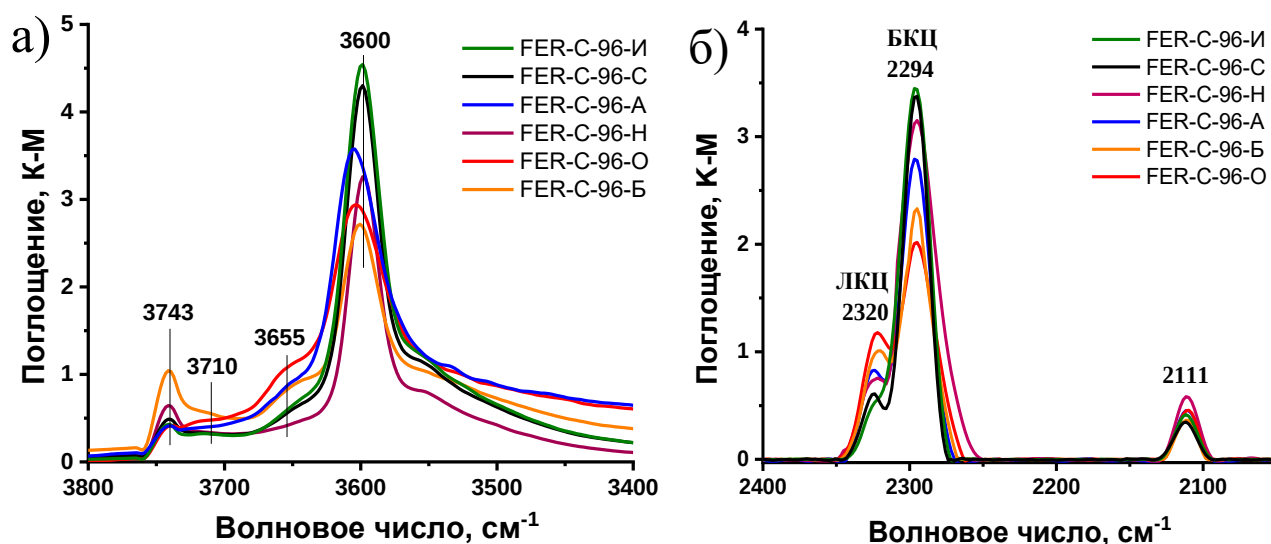


Рисунок 7 – ИК-спектры цеолитов FER, полученных из различных источников алюминия, в области ОН-групп после вакуумирования (а), после адсорбции CD_3CN (б).

Исследование кислотных характеристик данной серии цеолитов методом ИК- CD_3CN в области характерных колебаний (рисунок 7б) показало, что максимальное количество БКЦ (I_{2294}) содержится в образцах FER-C-96-И и FER-C-96-С. Также в данных цеолитах количество БКЦ превосходит количество ЛКЦ (I_{2294}/I_{2320}) в 6 раз. Для остальных образцов серии этот показатель значительно ниже. Повышение значения I_{2294}/I_{2320} в ряду FER-C-96-О – FER-C-96-Б – FER-C-96-А – FER-C-96-Н – FER-C-96-С – FER-C-96-И также свидетельствует об увеличении упорядоченности системы. Наибольшее содержание ЛКЦ (I_{2320}) в цеолитах FER-C-96-Б и FER-C-96-О связано с «внерешеточным» алюминием, т. е. с непрореагировавшим прекурсором алюминия, не вошедшим в структуру цеолита.

Таким образом, использование сульфата и изопропоксида алюминия в качестве источника алюминия позволяет получать цеолит FER с высокой кристалличностью, развитой системой пор и значительным преобладанием БКЦ. Для получения цеолита FER высокого качества из других источников Al нужны более «жесткие» условия кристаллизации (в данном случае – более длительное время синтеза).

Каталитические исследования полученных материалов

Исследование образцов серий FER-МГ и FER-Г

Катализаторы на основе цеолитов серии FER-МГ и FER-Г были изучены в реакции прямого разложения закиси азота N_2O (уравнение 1).



Железосодержащие катализаторы (2.5 % масс. Fe) были приготовлены методом пропитки по влагоемкости Н-формы цеолита FER. В качестве прекурсора железа использовали

нитрат железа (III). Приготовленные материалы сушили при 120 °С, затем прокаливали на воздухе при 600 °С в течение 4 ч.

Реакцию каталитического разложения N_2O проводили в проточном кварцевом реакторе с внутренним диаметром 4 мм при атмосферном давлении. Образец катализатора (100 мг, фракция 0.14-0.25 мм) смешивали с кварцем той же фракции и помещали в реактор. Каталитические испытания проводили при температуре 300-600 °С в потоке чистого N_2O с объемной скоростью 3000 ч⁻¹.

Результаты каталитического эксперимента представлены на рисунке 8. Цеолиты FER в Н-форме демонстрируют активность в реакции разложения закиси азота лишь при высоких температурах 500-600 °С (рисунок 8а). При этом температура 600 °С не позволила достичь максимальной 100%-ной конверсии N_2O . Температура достижения 50%-ной конверсии N_2O в ряду FER-МГ-8 – FER-МГ-6 – FER-Г-168 – FER-МГ-12 – FER-Г-96 увеличивается, что объясняется увеличением содержания ЛКЦ в образцах, поскольку реакция разложения N_2O протекает преимущественно на ЛКЦ².

Нанесение активной фазы оксида железа способствовало снижению температурного диапазона проведения реакции до 350-520 °С (рисунок 8б). Температура достижения 50%-ной конверсии N_2O для образцов, содержащих железо, увеличивается в ряду FER-МГ-6 – FER-МГ-12 ≈ FER-МГ-8 – FER-Г-168 ≈ FER-Г-96, аналогичный ряд наблюдается и при достижении 100%-ной конверсии N_2O . Полученные результаты объясняются наличием мезопор в исходных цеолитах: большее количество мезопор способствует более равномерному распределению оксида железа по поверхности цеолита, что благоприятно сказывается на активности получаемых катализаторов.

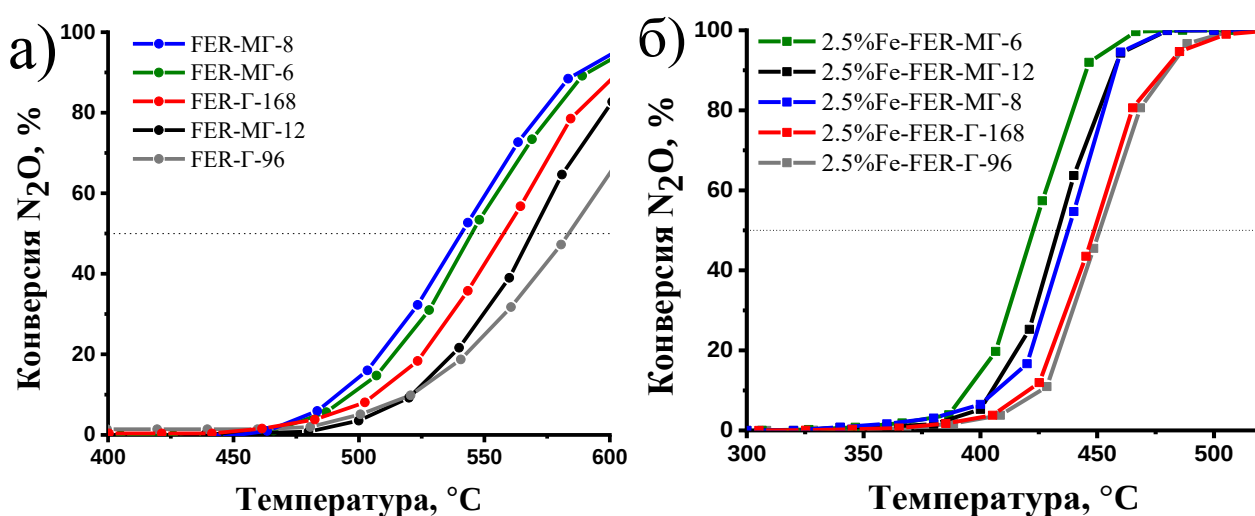


Рисунок 8 – Температурные кривые конверсии N_2O , полученные на цеолитах Н-FER (а) и Fe-содержащих катализаторах на их основе (б).

² L.M. Kustov, S.F. Dunaev, A.L. Kustov, Nitrous Oxide Adsorption and Decomposition on Zeolites and Zeolite-like Materials, *Molecules* 27 (2022) 398.

Нанесение активной фазы оксида железа способствовало снижению температурного диапазона проведения реакции до 350-520 °С (рисунок 8б). Температура достижения 50%-ной конверсии N₂O для образцов, содержащих железо, увеличивается в ряду FER-МГ-6 – FER-МГ-12 ≈ FER-МГ-8 – FER-Г-168 ≈ FER-Г-96, аналогичный ряд наблюдается и при достижении 100%-ной конверсии N₂O. Полученные результаты объясняются наличием мезопор в исходных цеолитах: большее количество мезопор способствует более равномерному распределению оксида железа по поверхности цеолита, что благоприятно сказывается на активности получаемых катализаторов.

Исследование образцов серий FER-C

Катализаторы на основе цеолитов серии FER-C-96 были изучены в реакции каталитического гидрирования CO₂ с получением диметилового эфира (уравнения 2-5).



Каталитические испытания полученных образцов в реакции гидрирования CO₂ проводили в реакторе проточного типа в диапазоне температур 150-300 °С, давлении 50 атм, мольном отношении H₂:CO₂ = 3:1. В реакции исследовался гибридный катализатор, состоящий из катализатора Cu-Zn/SiO₂ и синтезированного цеолита FER. Массовое соотношение Cu-Zn/SiO₂ : FER составляло 1 : 1, суммарная масса загруженного катализатора 300 мг, тип загрузки – послойная, фронтальный слой – катализатор Cu-Zn/SiO₂.

Катализатор Cu-Zn/SiO₂ был получен методом совместной пропитки по влагоемкости носителя SiO₂ из водных растворов смеси нитратов меди и цинка (15 % масс. Cu, мольное отношение Cu:Zn = 2:1).

Результаты эксперимента представлены на рисунке 9 («МК» на данных рисунках означает метанольный катализатор Cu-Zn/SiO₂). Видно, что на большинстве гибридных катализаторов (гибридный катализатор = МК + цеолит FER) удалось достичь конверсии CO₂ 14-16 % (рисунок 9). Однако катализаторы МК+FER-C-96-О и МК+FER-C-96-Б отличались от остальных: на них конверсия CO₂ составила ~ 10 %. При проведении процесса только на катализаторе Cu-Zn/SiO₂ (без цеолита FER) конверсия CO₂ достигла лишь 8 %. Этот результат свидетельствует о положительном влиянии использования гибридного катализатора, содержащего цеолит FER, в процессе гидрирования CO₂. Метанол, образующийся в ходе процесса, расходуется в реакции дегидратации (протекающей на цеолите FER с образованием ДМЭ), в результате удается избежать достижения равновесных концентраций метанола, что по

итогу приводит к большей конверсии CO_2 . Также показано, что на «чистом» цеолите FER (без катализатора Cu-Zn/SiO_2) реакция не идет, поскольку конверсия CO_2 в таком случае близка к нулю.

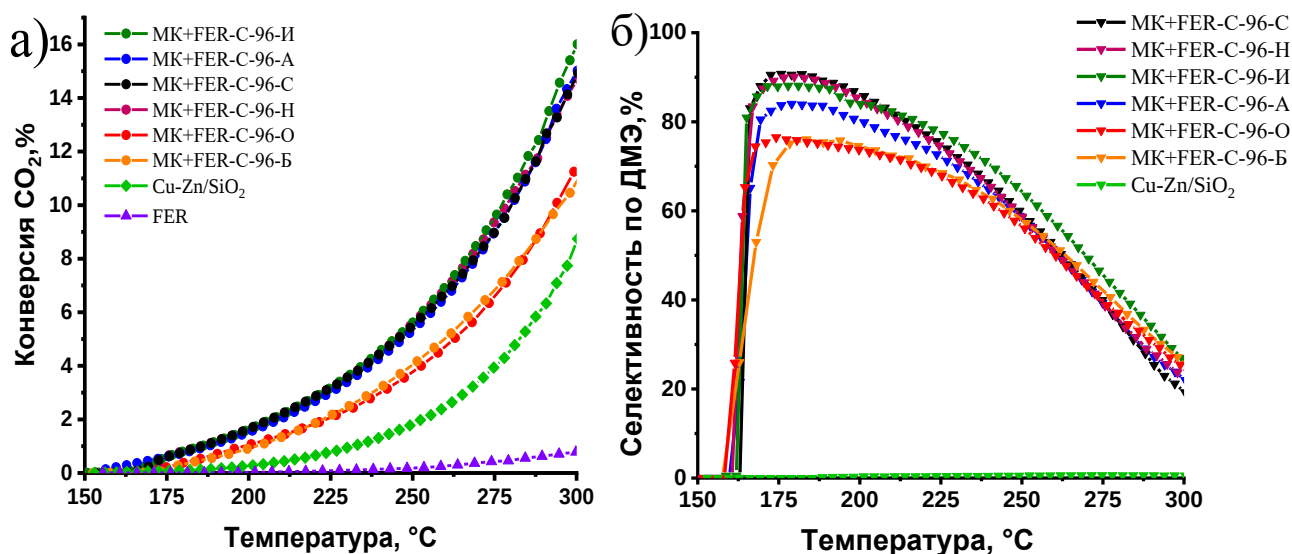


Рисунок 9 – Температурные кривые конверсии CO_2 (а) и селективности по ДМЭ (б), полученные на катализаторах Cu-Zn/SiO_2 –FER.

Максимальную селективность образования ДМЭ (~ 90 %) продемонстрировали гибридные катализаторы на основе FER-C-96-C, FER-C-96-H и FER-C-96-I, минимальную (~ 75 %) – катализаторы на основе FER-C-96-B и FER-C-96-O (рисунок 9). Полученные результаты, вероятно, связаны с кислотностью синтезированных цеолитов, а также с содержанием примесных фаз в них. Повышение количества БКЦ в цеолите благоприятно сказывается на селективности образования ДМЭ, противоположный эффект оказывает наличие примесных фаз. Как было сказано ранее, в ряду FER-C-96-O – FER-C-96-B – FER-C-96-A – FER-C-96-H – FER-C-96-C $\approx$ FER-C-96-I наблюдается повышение содержания БКЦ в образцах (рисунок 9). Аналогично в ряду гибридных катализаторов MK+FER-C-96-O $\approx$ MK+FER-C-96-B – MK+FER-C-96-A – MK+FER-C-96-H – MK+FER-C-96-C $\approx$ MK+FER-C-96-I наблюдается повышение селективности образования ДМЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые разработан микроволново-гидротермальный метод синтеза цеолита со структурой FER с использованием этилендиамина в качестве структурообразующего соединения. Образцы FER-МГ, полученные этим методом, характеризуются более высокой кристалличностью, развитой системой пор и при этом не уступают по количеству БКЦ образцам, полученным гидротермальным методом.
2. Установлено, что применение микроволнового нагрева позволяет сократить время синтеза примерно в 10 раз – до нескольких часов по сравнению с традиционным гидротермальным методом.
3. Впервые изучено влияние прекурсора Al на свойства получаемого цеолита FER при сольвотермальном синтезе. Использование сульфата или изопророксида алюминия при синтезе цеолита FER сольвотермальным методом за 96 часов позволяет получить высококачественные образцы с высокой кристалличностью, развитой системой пор и высоким содержанием БКЦ.
4. Показано, что на скорость разложения N_2O влияет количество ЛКЦ в катализаторах: большее количество ЛКЦ в полученных катализаторах приводит к более высокой скорости разложения закиси азота.
5. Установлено, что увеличение количества мезопор в цеолитах влияет на равномерное распределение активной фазы оксида железа при получении катализаторов Fe-FER, что благоприятно сказывается на каталитических свойствах в реакции разложения N_2O . Конверсия разложения N_2O , равная 100 %, достигается на Fe-содержащих катализаторах на основе феррьеритов при 450-470 °С.
6. Показано, что на селективность образования ДМЭ при гидрировании CO_2 на катализаторах Cu-Zn/SiO₂-FER положительное влияние оказывает высокое содержание БКЦ в исходном цеолите. Достигнута конверсия CO_2 ~ 16 % и селективность образования ДМЭ ~ 90 %.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. **Makova A.S.**, Kustov A.L., Davshan N.A., Mishin I.V., Kalmykov K.B., Shesterkina A.A., Kustov L.M. Synthesis of ferrierite-type zeolite by microwave method using ethylenediamine as an organic structure-directing agent // *Mendelev Communications*. – 2023. – V. 33 (4). – P. 528-530.
2. **Makova A.S.**, Timofeeva M.N., Tkachenko O.P., Panchenko V.N., Leonov A. V., Kapustin G.I., Davshan N.A., Kalmykov K.B., Kustov A.L., Ter-Akopyan M.N., Kustov L.M. Effect of microwave irradiation on the synthesis of zeolite with ferrierite structure: Study of acid and catalytic properties // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2024. – V. 703. – P. 135321.
3. **Makova A.S.**, Chesnokova A.V., Kustov A.L., Leonov A.V., Pribytkov P.V., Ter-Akopyan M.N., Kustov L.M. Decomposition of N₂O on different iron-containing catalysts // *Mendelev Communications*. – 2025. – V. 35 (2). – P. 234-236.
4. **Makova A.**, Tkachenko O., Kapustin G., Leonov A., Kalmykov K., Pribytkov P., Kustov A., Ter-Akopyan M., Kustov L. Influence of the Ferrierite Zeolite Synthesis Method on Physico-Chemical and Catalytic Characteristics in the N₂O Decomposition Reaction // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2026. – V. 51. – P. 1391-1400.
5. **Makova A.S.**, Mashkin M.Y., Mishin I.V., Kapustin G.I., Tkachenko O.P., Kalmykov K.B., Kustov A.L., Kustov L.M. Synthesis of zeolites with a ferrierite structure by hydrothermal and solvothermal methods and their activity in N₂O decomposition // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2025. – V. 727. – P. 138472.
6. Патент РФ 2807864 Способ получения цеолита со структурой типа ферриерит. **Макова А.С.**, Кустов Л.М. Опубликовано 21.11.2023 Бюл. № 33.
7. **Макова А.С.**, Кустов Л.М. Получение цеолита FER микроволновым методом. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023». Секция "Химия", Москва, 10-21 апреля 2023 г.
8. **Макова А.С.**, Кустов Л.М. Использование микроволнового воздействия для синтеза цеолита ferrierite. X Молодежная конференция ИОХ РАН, Москва, 29-31 мая 2023 г.
9. **Макова А.С.** Сравнение характеристик цеолитов FER, полученных микроволновым и гидротермальным методами. VII Международная молодежная научная конференция «Tatarstan UpExPro 2023», Казань, 6-9 апреля 2023 г.
10. **Макова А.С.**, Чеснокова А.В., Кустов Л.М. Микроволновый способ получения цеолита со структурой ferrierite: влияние времени синтеза на физико-химические характеристики.

- VII Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов», Суздаль, 28 июня -1 июля 2023 г.
11. **Макова А.С.** Влияние времени микроволнового синтеза на свойства получаемого цеолита FER. 77-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2023», Москва, 11-15 сентября 2023 г.
 12. **Макова А.С.,** Чеснокова А.В., Тимофеева М.Н., Тер-Акопян М.Н. Исследование кислотных свойств цеолита со структурой феррьерит, полученного микроволновым методом. XXVII Всероссийская конференция молодых учёных-химиков (с международным участием), Нижний Новгород, 16-18 апреля 2024 г.
 13. **Макова А.С.,** Чеснокова А.В., Тер-Акопян М.Н., Кустов Л.М. Получение цеолита со структурой феррьерит методом СВЧ воздействия с использованием этилендиамина в качестве структурообразующего соединения. XXV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке», Томск, 20-24 мая 2024 г.
 14. **Макова А.С.,** Тимофеева М.Н., Кустов Л.М., Тер-Акопян М.Н. Влияние метода синтеза на свойства получаемого цеолита FER. 10-ая Всероссийская цеолитная конференция «Цеолиты и мезопористые материалы: достижения и перспективы», Москва, 24-27 июня 2024 г.
 15. **Макова А.С.,** Кустов Л.М., Тер-Акопян М.Н. Получение Fe-FER катализаторов для реакции разложения N_2O . XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, Федеральная территория «Сириус», 7-12 октября 2024 г.
 16. **Макова А.С.,** Кустов Л.М., Тимофеева М.Н., Тер-Акопян М.Н. Применение СВЧ-излучения для синтеза цеолита со структурой феррьерит. V Российский конгресс по катализу «РОСКТАЛИЗ», Санкт-Петербург, 21-26 апреля 2025 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.х.н., проф. Кустову Леониду Модестовичу за всестороннюю помощь при выполнении работы и обсуждении результатов. Автор выражает огромную благодарность д.х.н. Мишину И.В., д.т.н. Пестряк И.В., к.х.н. Кустову А.Л. за ценные рекомендации и помощь в проведении исследования. Автор благодарит к.х.н. Капустина Г.И., к.х.н. Ткаченко О.П., к.х.н. Калмыкова К.Б., д.х.н. Тимофееву М.Н., Прибыткова П.В., Давшана Н.А. за помощь в исследовании синтезированных образцов. Автор отдельно выражает благодарность своей семье и близким за поддержку.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на крупные научные проекты в приоритетных областях научно-технического развития (№ 075-15-2024-547).