

УДК 54-44; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2022-6.10>
<https://orcid.org/0000-0002-9560-6464>
<https://orcid.org/0000-0002-0474-5240>
<https://orcid.org/0000-0002-0474-5240>
<https://orcid.org/0000-0002-4830-4295>
<https://orcid.org/0000-0002-1346-7190>
<https://orcid.org/0000-0002-4064-0243>

МЕЗОПОРИСТЫЕ АЛЮМОСИЛИКАТЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НОСИТЕЛИ КАТАЛИЗАТОРОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



А.К. АБДРАСИЛОВА^{1,2},
докторант,
младший научный сотрудник,
albina06.07@mail.ru



К.М. АБДИЛЬДИНА^{1,2},
постдокторант,
научный сотрудник,
kamilla.u.m21@mail.ru



Г.К. ВАСИЛИНА^{1,2},
кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник,
gulzira.vasilina@kaznu.edu.kz



И.А. КЛАССЕН¹,
магистр,
klassen_ivan1@ive.kaznu.kz

Н.А. ЗАБАРА², студент бакалавра, chernic47@gmail.com

Д.Р. БАЙДУЛЛА², студент бакалавра, daniyalbaidulla@gmail.com

¹НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
НОВЫХ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ,
Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Толе би, 96а

²КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ,
Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71

В настоящее время существует ряд исследовательских работ и определенный интерес к некоторым мезопористым материалам и исследованию их свойств. Мезопористые материалы имеют все шансы стать компонентами промышленных гетерогенных катализаторов. Катализаторы на основе мезопористых алюмосиликатов широко используются в нефтехимической промышленности для реакций гидрирования, риформинга, гидроизомеризации, гидрокрекинга, гидродеароматизации и т.д.

В статье мезопористые алюмосиликаты (MAS) были синтезированы путем сополиконденсации тетраэтилортосиликата и вторичного бутаоксида алюминия. В качестве темплата был использован гексадециламин. Методами адсорбции/десорбции азота, рентгеновской дифракции, СЭМ и ТПДА изучены физико-химические характеристики синтезированного структурированного мезопористого алюмосиликата и бифункционального катализатора на его основе. Было установлено, что полученные образцы имеют упорядоченную мезопористую структуру и обладают необходимой силой и концентрацией кислотных центров для использования в качестве кислотных компонентов бифункциональных катализаторов различных нефтехимических процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мезопористые алюмосиликаты, бифункциональные катализаторы, кислотные центры, никель-молибден-содержащие катализаторы.

МЕЗОКЕУЕКТІ АЛЮМОСИЛИКАТТАР – МҰНАЙХИМИЯ ПРОЦЕСТЕРІНІҢ КАТАЛИЗАТОРЛАРЫНЫҢ ПЕРСПЕКТИВТІ ТАСЫМАЛДАУШЫЛАРЫ

А.К. АБДРАСИЛОВА^{1,2}, докторант, кіші ғылыми қызметкер, albina06.07@mail.ru
К.М. АБДИЛЬДИНА^{1,2}, постдокторант, ғылыми қызметкер, kamilla.u.m21@mail.ru
Г.К. ВАСИЛИНА^{1,2}, химия ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер,
Gulzira.Vasilina@kaznu.edu.kz
И.А. КЛАССЕН², магистрант, klassen_ivan1@live.kaznu.kz
Н.А. ЗАБАРА², бакалавр студенті, chernic47@gmail.com
Д.Р. БАЙДУЛЛА², бакалавр студенті, daniyalbaidulla@gmail.com

¹ЖАҢА ХИМИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ЖӘНЕ МАТЕРИАЛДАР ҒЫЛЫМИ-ЗЕРТТЕУ ИНСТИТУТЫ,
Толе би көшесі, 96а, 050012, Алматы, Қазақстан

²ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ,
әл-Фараби даңғылы, 71, 050040, Алматы, Қазақстан

Қазіргі уақытта кейбір мезокеуекті материалдарға бірқатар зерттеу жұмыстары және олардың қасиеттерін зерттеуге белгілі бір қызығушылық бар. Мезокеуекті материалдар өнеркәсіптік гетерогенді катализаторлардың құрамдас бөліктеріне айналуға барлық мүмкіндіктерге ие. Мезокеуекті алюмосиликаттарға негізделген катализаторлар мұнайхимия өнеркәсібінде гидрлеу, риформинг, гидроизомерлеу, гидрокрекингілеу, гидроароматсыздандыру және т.б. реакциялар үшін кеңінен қолданылады.

Мақалада мезокеуекті алюмосиликаттар (MAS) тетраэтилортосиликат пен екіншілік алюминий бутаоксидінің сополиконденсациясы арқылы синтезделді. Темплат ретінде гексадециламин қолданылды. Азотты адсорбциялау/десорбциялау, рентгендік дифракция,

СЭМ және ТПДА әдістерімен синтезделген құрылымдық мезокеуекті алюмосиликаттың және оның негізіндегі бифункционалды катализатордың физика-химиялық сипаттамалары зерттелді. Алынған үлгілер реттелген мезокеуекті құрылымға ие және әртүрлі мұнайхимия процестерінің бифункционалды катализаторларының қышқылды компоненттері ретінде пайдалану үшін қажетті күш пен қышқылдық орталықтарының концентрациясына ие екендігі анықталды.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: мезокеуекті алюмосиликаттар, бифункционалды катализаторлар, қышқылдық орталықтары, никель-молибденқұрамды катализаторлар.

MESOPOROUS ALUMINOSILICATES AS PROMISING CARRIERS OF CATALYSTS FOR PETROCHEMICAL PROCESSES

A.K. ABDRASSILOVA^{1,2}, PhD student, junior researcher, albina06.07@mail.ru

K.M. ABDILDINA^{1,2}, Postdoctoral student, researcher, kamilla.u.m21@mail.ru

G.K. VASSILINA^{1,2}, Candidate of Chemical Sciences, leading researcher, Gulzira.Vasilina@kaznu.edu.kz

I.A. KLASSEN², MSc student, klassen_ivan1@live.kaznu.kz

N.A. ZABARA², bachelor student, chernic47@gmail.com

D.R. BAIDULLA², bachelor student, daniyalbaidulla@gmail.com

¹SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE
FOR NEW CHEMICAL TECHNOLOGIES AND MATERIALS,
96a, Tole bi str., 050012, Almaty, Kazakhstan

²AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY,
71, al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Kazakhstan

Nowadays there is a number of research papers and a certain interest in some mesoporous materials and the study of their properties. Mesoporous materials have every chance to become components of industrial heterogeneous catalysts. Catalysts based on mesoporous aluminosilicates are widely used in the petrochemical industry for hydrogenation, reforming, hydroisomerization, hydrocracking, hydrodearomatization, etc.

In this article mesoporous aluminosilicates (MAS) were synthesized by copolycondensation of tetraethylortosilicate and secondary aluminum butoxide. Hexadecylamine was used as a template. The physico-chemical characteristics of a synthesized structured mesoporous aluminosilicate and a bifunctional catalyst based on it were studied by nitrogen adsorption/desorption, X-ray diffraction, SEM and TPDA. It was found that the obtained samples have an ordered mesoporous structure and possess the necessary strength and concentration of acid centers for use as acid components of bifunctional catalysts of various petrochemical processes.

KEY WORDS: mesoporous aluminosilicates, bifunctional catalysts, acid centers, nickel-molybdenum-containing catalysts.

Введение. Производство качественных дизельных топлив с низкой температурой застывания и с содержаниями серы и полициклических ароматических углеводородов, не превышающих 0,001 % и 11 %, соответственно согласно стандарту Евро-5К, является одним из основных и важнейших вопросов для нефтеперерабатывающих заводов Казахстана. Для решения этой проблемы используются различные процессы. Среди них широко используется гидродепарафинизация и гидродеароматизация средних дистиллятов. Он основан на превращении n-алканов в разветвленные алканы, обладающие более низкой температурой застывания [1].

В настоящее время для гидропревращений дизельных фракций применяют бифункциональные катализаторы. Эти катализаторы основаны на носителях, обладающих кислотными свойствами и промотированных переходными металлами, такими как платина, палладий, никель, молибден и др. [2]. Носитель может содержать такие активные компоненты, как алюмосиликаты, алюмофосфаты и другие молекулярные сита.

Мезопористые алюмосиликаты являются перспективными катализаторами процессов превращения *n*-парафинов в разветвленные изомеры, поскольку они способствуют высокой селективности изомеризации (>90 %) при средних превращениях (60 – 75 %), а также их можно синтезировать таким образом, чтобы размеры их молекул были больше, чем у цеолита [3–6]. Это обусловлено тем, что цеолитные материалы с размерами пор в диапазоне микропор имеют диффузионные ограничения. Мезопоры, по сравнению с микропорами, обеспечивают более быстрый массоперенос и выполняют роль «молекулярных магистралей». Транспортные ограничения негативно сказываются как на активности, так и на селективности адсорбентов и катализаторов, а также сокращают срок их службы. Одним из векторов решения этой проблемы является сокращение пути диффузии или повышение эффективности диффузии в порах, что может быть успешно реализовано с помощью мезопористых материалов [7, 8].

Основным преимуществом мезопористых алюмосиликатов является особенностью их структур, поскольку размер их пор превышает размер большинства молекул, входящих в состав средних дистиллятов. Кроме того, спектр кислотности мезопористых алюмосиликатов можно варьировать как на стадии синтеза, так и путем модифицирования готовых материалов [2]. Кроме того, многие исследования в области деароматизации дизельной фракции, включая отечественных ученых [9,10], берут за основу гетерогенные катализаторы, содержащие платину и палладий, аргументируя это тем, что они сохраняют высокую гидрирующую способность даже при значительных содержаниях серы в сырье (0,01 % – 0,015 %). Однако, содержание серы в казахстанской нефти колеблется от 0,35 % до 1,69 % [11], что ставит под сомнение устойчивость платина-палладиевых катализаторов к контактному ядам и, как следствие, их эффективность в разрезе переработки казахстанской нефти с высоким содержанием серы.

В этой работе мы представляем результаты изучения характеристик синтезированных бифункциональных катализаторов на основе мезопористых алюмосиликатов комплексом физико-химических методов анализа.

Материалы и методы исследований. Мезопористые алюмосиликаты были синтезированы методом сополиконденсации тетраэтилортосиликата и вторичного бутилата алюминия. В качестве темплата использовали гексадециламин. В качестве бифункционального носителя катализатора использовали предварительно активированный бентонит Таганского месторождения Восточно-Казахстанской области. Ni и Mo выполняют роль гидро-/дегидрирующих компонентов.

Текстурные характеристики синтезированных образцов были получены из изотермы адсорбции/десорбции азота при 77 К на оборудовании Micromeritics TriStar 3000 (Микромеритика, Норкросс, Джорджия, США). Удельную поверхность рас-

считывали по методу Брунауэра, Эммета, Теллера (БЭТ). Относительные давления использовались в диапазоне 0,05 – 0,20. Распределение пор по размерам определяли методом Барретта-Джойнера-Халенды.

Данные рентгеновской дифракции (XRD) под малыми и большими углами были получены с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) на дифрактометре Philips X'PERT MPD (Филипс, Эйндховен, Нидерланды). Оборудование работало при 45 кВ и 40 мА, и дифракционные данные записывались в диапазоне 1 – 10 и 10 – 90° с шагом 0,04° и времени счета 10 с.

Морфологию изученных образцов определяли методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием оборудования Hitachi TM-1000, оснащенного детектором энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX).

Температурно-программируемую десорбцию аммиака (ТПДА) проводили на установке УСГА-101 (Россия). Кривые ТПДА снимали в потоке гелия (расход 8 мл/мин) от 60 до 600 °С при линейной скорости подъема температуры 8 °С/мин.

Результаты и обсуждение. Схемы получения мезопористого алюмосиликата и бифункционального катализатора на его основе представлены на *рисунках 1 и 2*. Полное описание методик их синтеза представлено в следующей публикации [12].

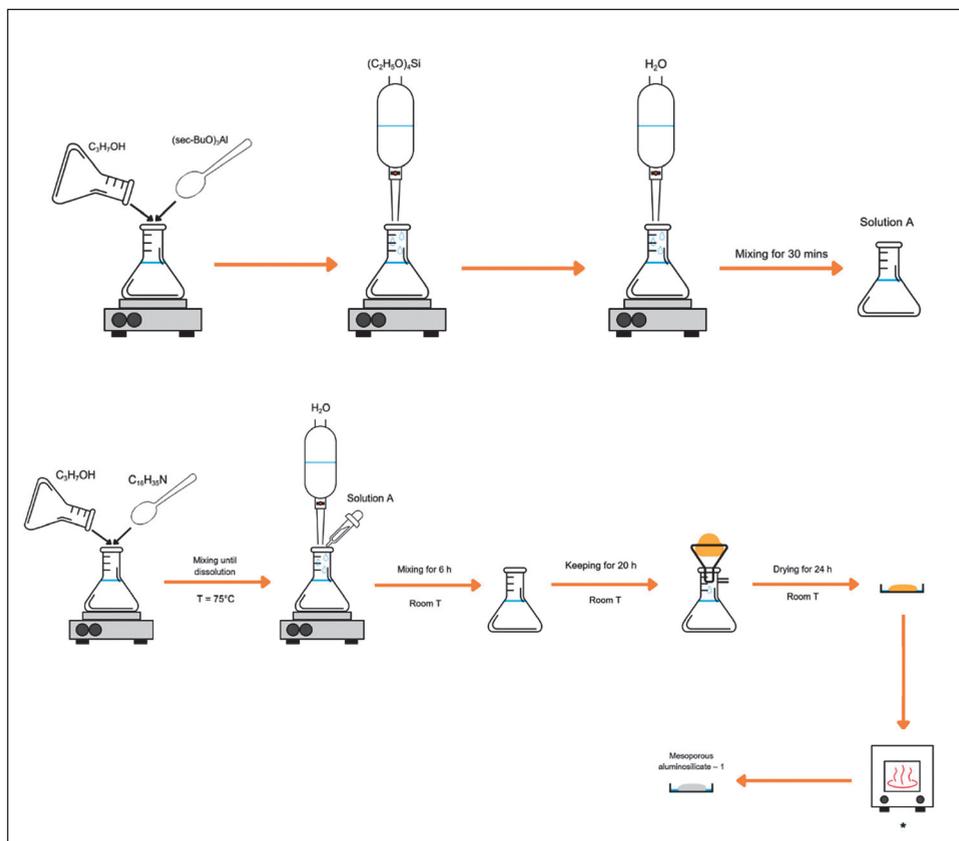


Рисунок 1 – Схема синтеза мезопористого алюмосиликата методом сополиконденсации тетраэтилортосиликата и вторичного бутилата алюминия

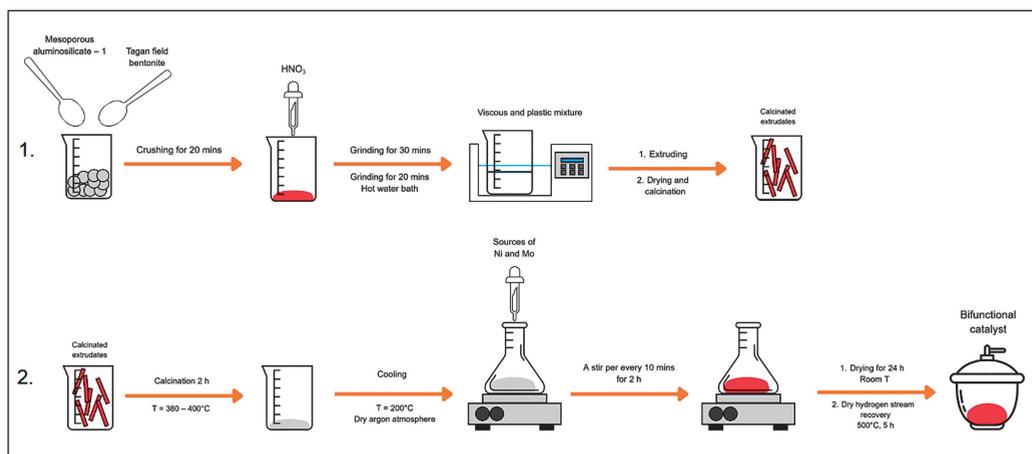


Рисунок 2 – Схема синтеза бифункционального катализатора на основе мезопористого алюмосиликата

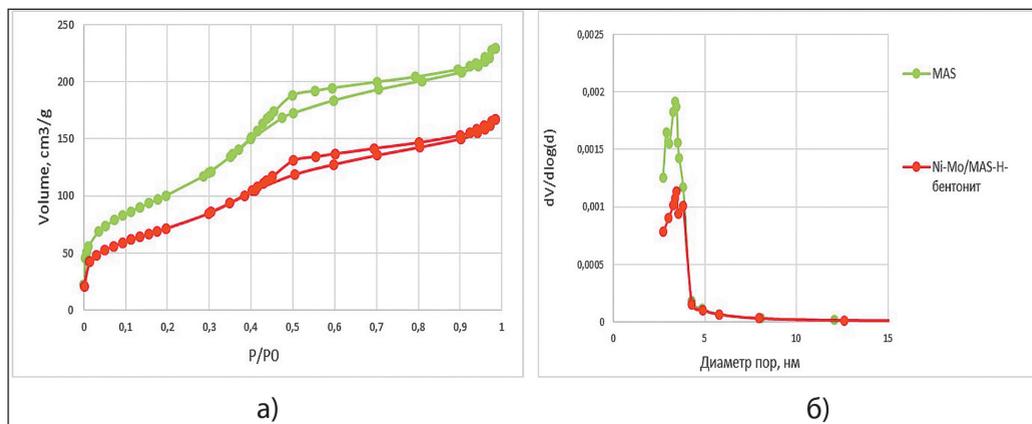


Рисунок 3 – Изотермы адсорбции/десорбции азота (а) и распределение пор по размерам (б) мезопористого алюмосиликата и бифункционального катализатора на его основе

Таблица 1 – Физические свойства мезопористого алюмосиликата и бифункционального катализатора Ni-Mo/MAS-H-бентонит

Образцы	Удельная поверхность, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Средний диаметр пор, нм
MAS	375,1	0,3523	16,06
Ni-Mo/MAS-H-бентонит	265,4	0,2567	17,45

Изотермы адсорбции/десорбции азота на синтезированных образцах относятся к IV типу по классификации БЭТ. Наличие в них петли гистерезиса связано с капиллярной конденсацией, происходящей в мезопорах. Однако они различаются

по типу петли гистерезиса (рисунк 3а). Если петля гистерезиса на изотерме образца MAS относится к типу H1, что свидетельствует об узком распределении пор по размерам и упорядоченной структуре, то на изотермах образцов бифункциональных катализаторов – к типу H4, что свидетельствует об узких щелевидных порах [13–16]. Наведенная деформация упорядоченной мезопористой структуры этих образцов связана с проникновением в поры ионов Ni и Mo. Также синтезированные материалы резко различаются по площади удельной поверхности, среднему диаметру пор и объему пор (таблица 1). Например, мезопористый алюмосиликат (MAS) и бифункциональный катализатор (Ni-Mo/MAS-H-бентонит) обладают удельной поверхностью 375,1 и 265,4 м²/г соответственно. Уменьшение площади удельной поверхности и объема пор указывает на то, что часть пор в структуре катализатора блокирован металлами – Ni и Mo. Как показано на рисунке 3б, распределение пор по размерам материалов носителя и катализаторов, пропитанных Ni и Mo, довольно узкий. В случае промотированных катализаторов бидисперсное распределение пор по размерам наблюдалось в нижнем диапазоне размеров пор. Согласно данным, представленным на рисунке 3б, для исследованных образцов максимум на кривой распределения пор по размерам наблюдается при 3,0 – 3,8 нм.

Метод рассеяния рентгеновских лучей был использован для подтверждения мезопористости и упорядоченности пористой структуры синтезированных материалов (рисунк 4).

Рентгенограмма с малоугловым рассеянием синтезированного MAS показывает два хорошо разрешенных пика в области 2θ 0,8 и 2,1°, которые могут быть проиндексированы как (100) и (200) соответственно, что указывает на мезопористую структуру синтезированного алюмосиликата с гексагональным расположением пор [17–19]. Пик интенсивности в области 2,1° на длине волны используемого излучения соответствует межплоскостному расстоянию 4,2 нм.

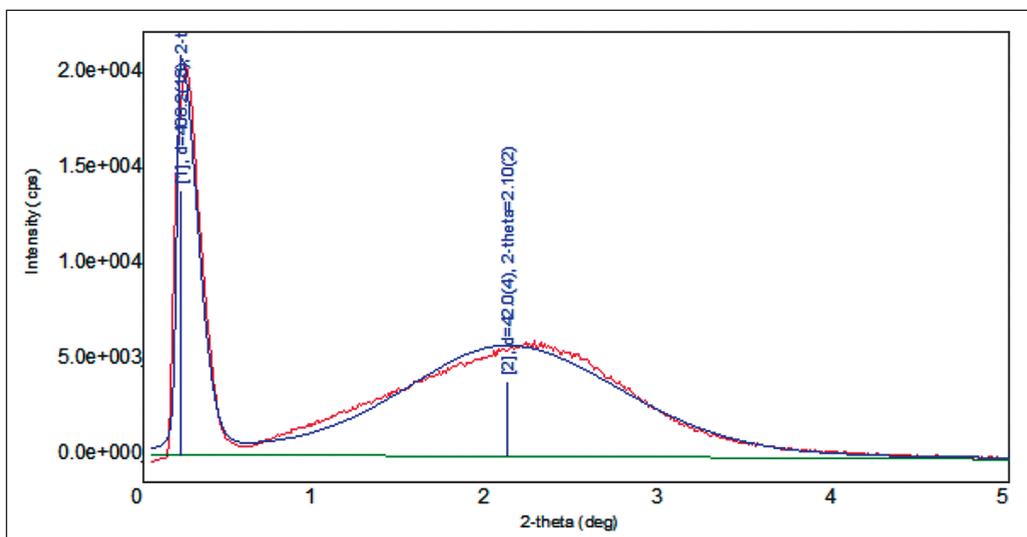


Рисунок 4 – Рентгенограмма дифракции малоуглового рассеяния мезопористого алюмосиликата

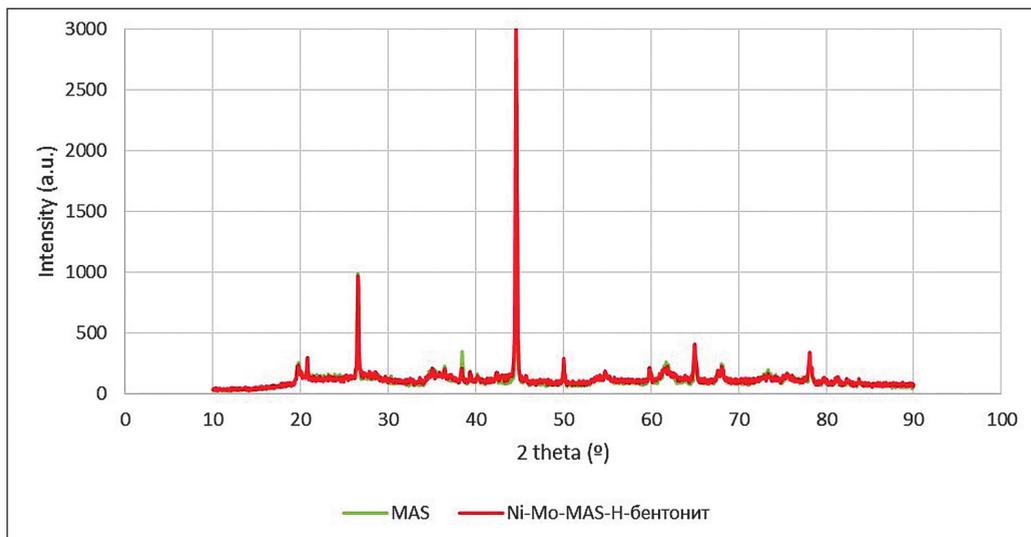


Рисунок 5 – Рентгенограмма дифракции широкоугольного рассеяния мезопористого алюмосиликата (MAS) и катализатора на его основе (Ni-Mo/MAS-H-бентонит)

По сравнению с рентгеновской картиной дифракции синтезированного алюмосиликата дифракционные пики катализаторов, не промотированных и промотированных Ni и Mo (рисунок 5), появляются при значениях 2θ 20°, 26°, 45° и 50°, которые принадлежат Ni и Mo, образованным при высоких температурах прокаливания.

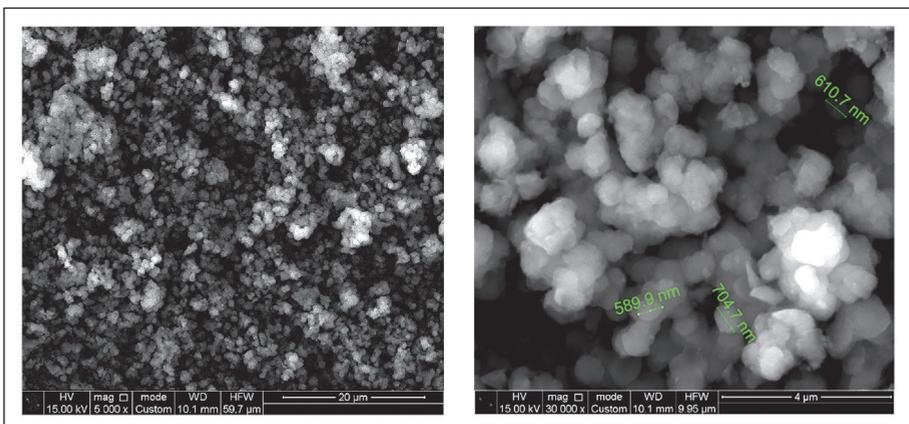


Рисунок 6 – СЭМ изображения катализатора Ni-Mo/MAS-H-бентонит

Визуальная морфология синтезированного образца катализатора представлена на *рисунке 6*, полученная в результате сканирующей электронной микроскопии.

На снимке можно четко увидеть множество однородных частиц круглой формы со средним диаметром 610 нм. Такой диаметр характерен для MAS, что также свидетельствует о мезопористости полученного образца. Кроме того, можно увидеть упорядоченные гексагональные массивы мезопор с одинаковым размером пор [20].

ТПД аммиака был проведен с целью оценки кислотности мезопористых алюмосиликатов и катализатора на его основе (рисунок 7). Концентрации различных кислотных центров для MAS и Ni-Mo/MAS-H-бентонит, выраженные в мкмоль-десорбированного NH₃ на грамм исследуемых образцов, приведены в таблице 2.

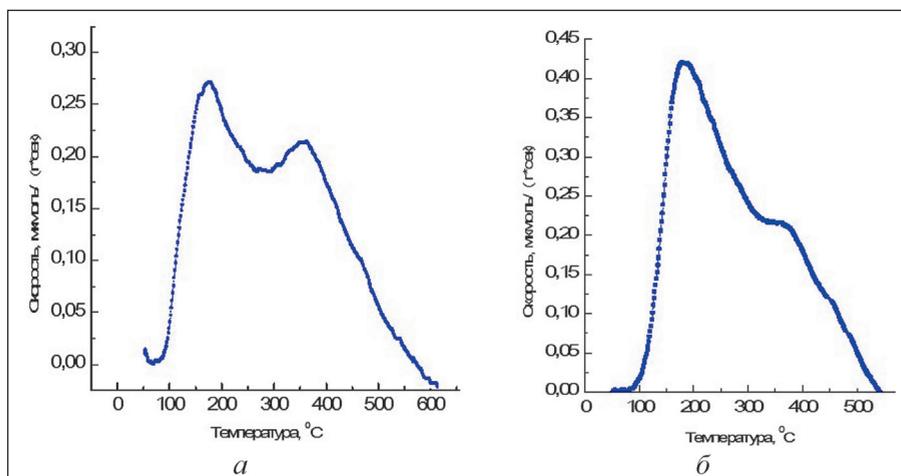


Рисунок 7 – Спектры ТПДА синтезированных образцов:
а – MAS; б – Ni-Mo/MAS-H-бентонит

Таблица 2 – Концентрации различных кислотных центров MAS и Ni-Mo/MAS-H-бентонит

MAS		Ni-Mo/MAS-H-бентонит	
Температура, °С	Количество поглощенного аммиака (A), мкмоль/г	Температура, °С	Количество поглощенного аммиака (A), мкмоль/г
177	256	180	440
362	158	335	116

Согласно данным ТПДА, после промотирования носителя (MAS) средние кислотные центры увеличиваются, в то время как количество сильных центров уменьшается, что приводит к изменениям общей кислотности в бифункциональном катализаторе. Таким образом, общая кислотность MAS составляет 414 мкмоль/г, а для Ni-Mo/MAS-H-бентонит – 556 мкмоль/г [21–23].

Выводы. Таким образом, данные полученные при изучении физико-химических свойств синтезированного алюмосиликата и бифункционального катализатора на его основе, показывают, что рассмотренная каталитическая система имеет мезопористую и упорядоченную гексагональную структуру, подтвержденную методами низкотемпературной адсорбции/десорбции азота, дифракции рентгеновских лучей и СЭМ. Также синтезированные образцы обладают необходимой силой и концентрацией кислотных центров, что подтверждают исследования ТПДА для исполь-

зования в качестве кислотных компонентов бифункциональных катализаторов для нефтехимических процессов. 

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08052032).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Venkatesh R.P., Bhaskar M., Sakthivel S., Selvaraju N., Velan M. Pilot plant studies on accelerated deactivation of commercial hydrotreating catalyst // *Petroleum Science and Technology*. – 2010. – V. 28, n ? – P. 93-102. <https://doi.org/10.1080/10916460903066478>
- 2 Karakhanov E.A., Kardashev S.V., Baranova S.V., Ostroumova V.A., Shirokopoyas S.I., Lysenko S.V., Maksimov A.L., Kulikov A.B. // *Petroleum Chemistry*. – 2012. – Т. 52, № 4. – С. 228-232. <https://doi.org/10.1134/S0965544112040020>
- 3 Казахстан и Киргизия полностью перешли на топливо стандарта не ниже Евро-4 и Евро-5 / <https://neftegaz.ru/news/neftechim/204198-nakonets-to-kazakhstan-i-kirgiziya-polnostyu-pereshli-na-toplivo-standarta-ne-nizhe-evro-4-i-evro-5/> (Дата обращения 05.12.2022)
- 4 Linssen T., Cool P., Vansant E.F., Aldea S., Poncelet G. Octane hydroisomerization over hexagonal mesoporous aluminosilicates synthesized from leached saponite // *Journal of Porous Materials*. – 2005. – V. 12, n 5 – P. 35-40. <https://doi.org/10.1007/s10934-005-5231-2>
- 5 Park K.C., Ihm S.K. Comparison of Pt/zeolite catalysts for n-hexadecane hydroisomerization // *Applied Catalysis A: General*. – 2000. – V. 203, n 7 – P. 201-209. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(00\)00490-7](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00490-7)
- 6 Chen C.Y., Ouyang X., Zones S.I., Banach S.A., Elomari S.A., Davis T.M., Ojo A.F. Characterization of shape selective properties of zeolites via hydroisomerization of n-hexane // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2012. – V. 164, n 1 – P. 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.07.003>
- 7 Tuktin B.T., Tenizbaeva A.S., Samshat N.A., Abilmagzhanov A.Z., Shapovalov A.A. Hydroprocessing of diesel oil fractions on modified alumina catalysts // *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology*. – 2020 – V. 3, n . 435. – P. 56-62. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1491.30>
- 8 Kouznetsova T., Sauka J., Ivanets A. Template synthesis and gas adsorption properties of ordered mesoporous aluminosilicates // *Applied Nanoscience*. – 2021. – V. 11, n 125 – P. 1903-1915. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01871-y>
- 9 Frolova O., Massenova A., Sassykova L. Hydrodearomatization of gasoline fractions of Atyrau oil refinery of the Republic of Kazakhstan // *International Journal of Chemical Sciences*. – 2014. – V. 12, n. 2. – P. 625-634.
- 10 Massenova A., Kalykberdiyev M., Sass A., Kenzin N., Ussenov A., Baiken A., Rakhmetova K. Catalytic Technologies for Solving Environmental Problems in the Production of Fuels and Motor Transport in Kazakhstan // *Catalysts*. – 2020. – V. 10, n 4 – P. 1197-1218. <https://doi.org/10.3390/catal10101197>
- 11 <http://www.investkz.com/journals/68/664.html>
- 12 Vassilina G.K., Abdildina K.M., Abdrasilova A.K., Vassilina T.K., Zakirov Zh.Y. The mesoporous aluminosilicate application as support for bifunctional catalysts for n-hexadecane hydroconversion // *Open Chemistry*. – 2022. – V. 20, n 7 – P. 171-179. <https://doi.org/10.1515/chem-2022-0134>

- 13 Matthias Th., Katsumi K., Alexander V.N., James P.O., Francisco R.R., Jean R., Kenneth S.W.S. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // *Pure and Applied Chemistry*. – 2015. – V. 87, n 15 – P. 1051-1059. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- 14 Vinogradov N.A., Glotov A.P., Savinov A.A., Vutolkina A.V., Vinokurov V.A., Pimerzin A.I.A. The mesoporous silicate-alumina composites application as supports for bifunctional sulfide catalysts for n-hexadecane hydroconversion // *Journal of Porous Materials*. – 2021. – V. 28, n 8 – P. 1449-1458. <https://doi.org/10.1007/s10934-021-01097-x>
- 15 Christensen G., Apelian M.R., Hickey K.J. Future directions in modeling the FCC process: an emphasis on product quality // *Chemical Engineering Science*. – 1999. – V. 54, n ? – P. 2753-2764. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00002-0)
- 16 David P.G., Brian P.B., Evan A., Jason H., George M. B., Julia A.V. Nickel impregnated mesoporous USY zeolites for hydrodeoxygenation of anisole // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2018. – V. 261, n 10 – P. 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.10.027>
- 17 Wang C., Zhu G., Cai X., Shang T., Zhao L., Li N. Synthesis of higher aluminum content hexagonal and cubic mesoporous aluminosilicates toward catalysts // *Topics in Catalysis*. – 2005. – V. 35, n 12 – P. 25-34. <https://doi.org/10.1007/s11244-005-3810-8>
- 18 Heba M.G. Characterization and catalytic activity of NiO/mesoporous aluminosilicate AISBA-15 in conversion of some hydrocarbons // *Egyptian Journal of Petroleum*. – 2012. – V. 21, n 7 – P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.02.001>
- 19 Zhang Z., Han Y., Xiao F.S., Qiu S., Zhu L., Wang R. Mesoporous aluminosilicates with ordered hexagonal structure, strong acidity, and extraordinary hydrothermal stability at high temperatures // *Journal of the American Chemical Society*. – 2001. – V. 123, n 10 – P. 5014-5021. <https://doi.org/10.1021/ja004138t>
- 20 Wenhao C., Dali Zh., Juan T., Nan Ch., Dong F., Juan W., Jingfeng H., Linying W., Peng T., Zhongmin L. Synthesis of mesoporous high-silica zeolite Y and their catalytic cracking performance // *Chinese Journal of Catalysis*. – 2022. – V. 43, n 5 – P. 1945-1954. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(21\)64043-3](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(21)64043-3)
- 21 Naonobu K., Miki N. Analysis of acidic properties of zeolitic and non-zeolitic solid acidcatalysts using temperature-programmed desorption of ammonia // *Catalysis Surveys from Asia*. – 2004. – V. 8. – P. 161-169. <https://doi.org/10.1023/B:CATS.0000038534.37849.16>
- 22 Paweł B., Lucjan Ch., Jacek G., Kazimierz Ł., Barbara G., Bartos M., Stanislaw D. Influence of iron state and acidity of zeolites on the catalytic activity of FeHBEA, FeHZSM-5 and FeHMOR in SCR of NO with NH₃ and N₂O decomposition // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2015. – V. 203, n 11 – P. 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.10.023>
- 23 Wei L., Rui-tang G., Shu-xian W., Wei-guo P., Qi-lin Ch., Ming-yuan L., Peng S., Shu-ming L. The enhanced Zn resistance of Mn/TiO₂ catalyst for NH₃-SCR reaction by the modification with Nb // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 154, n 5 – P. 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.08.038>