

М. Ю. Антонова, Е. Г. Зайцева, Ю. Х. Усманова,
А. Р. Давлетшин, С. М. Петров, Н. Ю. Башкирцева

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩЕЙ КРЕМНИСТОЙ ПОРОДЫ ТАТАРСКО-ШАТРАШАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ключевые слова: цеолитсодержащая кремнистая порода, крекинг, n-алканы, удельная поверхность, клиноптилолит, каталитическая активность, изотермы адсорбции/десорбции азота.

В статье представлены результаты исследования каталитической активности цеолитсодержащей кремнистой породы Татарско-Шатрашанского месторождения Республики Татарстан. Методом рентгенофазового анализа в образце породы установлено содержание кристаллической фазы цеолита и аморфных алюмосиликатов, которые обладают кислотными свойствами и могут проявлять каталитическую активность. Проведено сравнительное сопоставление характеристик цеолитсодержащей кремнистой породы с промышленным катализатором *fluid catalytic cracking* (FCC). Установлено, что удельная площадь поверхности цеолитсодержащей породы ниже, чем у промышленного катализатора FCC, однако средний диаметр пор больше. Состав продуктов крекинга алканов с цеолитсодержащей кремнистой породой отличается крайне малым выходом газов. В ходе экспериментальных исследований была определена оптимальная температура, при которой наблюдается максимальная конверсия n-алканов и проанализирован состав продуктов их крекинга. Анализ результатов показал, что исследуемая цеолитсодержащая порода обладает определенной каталитической активностью. Однако по своим характеристикам она уступает промышленному катализатору FCC. В составе продуктов реакции было выявлено преобладание ненасыщенных углеводородов, что может свидетельствовать о протекании реакций крекинга и дегидрогенизации. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейших исследований в области разработки новых катализаторов и оптимизации процессов переработки углеводородов.

М. Yu. Antonova, E. G. Zaitseva, Yu. Kh. Usmanova,
A. R. Davletshin, S. M. Petrov, N. Yu. Bashkirtseva

INVESTIGATION OF THE CATALYTIC ACTIVITY OF ZEOLITE-CONTAINING SILICEOUS ROCK OF THE TATARSKO-SHATRASHANSKY DEPOSIT

Keywords: zeolite-containing siliceous rock, cracking, alkanes, specific surface area, clinoptilolite, catalytic activity, nitrogen adsorption/desorption isotherms.

The article presents the results of a study of the catalytic activity of zeolite-containing siliceous rock from the Tatarsko-Shatrashansky deposit in the Republic of Tatarstan. X-ray phase analysis of the rock sample revealed the content of the crystalline phase of zeolite and amorphous aluminosilicates, which have acidic properties and can exhibit catalytic activity. A comparative comparison of the characteristics of zeolite-containing siliceous rock with an industrial fluid catalytic cracking (FCC) catalyst has been carried out. It was found that the specific surface area of the zeolite-containing rock is lower than that of the FCC industrial catalyst, but the average pore diameter is larger. The composition of alkane cracking products with zeolite-containing siliceous rock is characterized by extremely low gas output. In the course of experimental studies, the optimal temperature at which the maximum conversion of n-alkanes is observed was determined and the composition of their cracking products was analyzed. Analysis of the results showed that the studied zeolite-containing rock has a certain catalytic activity. However, it is inferior in its characteristics to the FCC industrial catalyst. The composition of the reaction products revealed a predominance of unsaturated hydrocarbons, which may indicate the occurrence of cracking and dehydrogenation reactions. The results obtained can be useful for further research in the development of new catalysts and optimization of hydrocarbon processing processes.

Введение

В современной нефтеперерабатывающей промышленности одним из наиболее эффективных каталитических систем являются цеолитсодержащие катализаторы, которые широко используются в нефтеперерабатывающей промышленности для проведения различных процессов, таких как крекинг, риформинг, гидроочистка и другие. Примерно 85-90 % продукции химической промышленности производится с применением каталитических систем [1, 2]. Перспективным использованием цеолитсодержащих пород, отличающихся низкой стоимостью по сравнению с синтетическими аналогами, является использование в процессе крекинга тяжелого нефтяного сырья с получением более лёгких и

ценных нефтепродуктов, таких как бензины, керосины и дизельные топлива [3, 4]. Хотя принципы работы цеолитсодержащих каталитических систем изучены достаточно хорошо, сложность протекающих реакций с многокомпонентными смесями в реальных условиях всё ещё затрудняет точное прогнозирование направлений превращений и состава продуктов [5]. Отличительной особенностью цеолитсодержащих систем является их высокая селективность, что позволяет при крекинге получать продукты с заданным составом [6, 7, 8].

Впервые цеолит в составе породы обнаружил шведский химик Аксель Фредрик Кронштедт в 1756 году. С тех пор было найдено около 40 типов природных цеолитов. Большинство из них имеют низкое отношение Si/Al, что связано с отсутствием органических структурообразующих агентов,

необходимых для формирования кремнистых цеолитов. Природные цеолиты могут быть использованы в качестве катализаторов, однако их каталитическая активность ограничена присутствием примесей и малой площадью поверхности [9, 10, 11]. В промышленности широко используются два природных цеолита: морденит и клиноптилолит.

Кислотные центры Льюиса и Бренстеда в цеолитах играют важную роль в их каталитической активности. Так в цеолитах заряды $4+$ на атомах кремния в тетраэдрических позициях (положение Т) и заряды $2-$ на координирующих атомах кислорода приводят к образованию нейтральных тетраэдров SiO_4 . Замещение атомов кремния в каркасе атомами алюминия меняет соответствующие заряды тетраэдров с нейтрального на отрицательный, которые в свою очередь уравниваются внекаркасными катионами металлов или гидроксильными протонами, расположенными на кислородных мостиках, соединяющих атомы кремния и алюминия. Гидроксильные группы обычно являются донорными структурными или мостиковыми группами OH или Si-OH-Al . Вторым важным типом гидроксильных групп в цеолитах являются силанольные группы или Si-OH , также называемые концевыми OH -группами, которые располагаются на внешней поверхности кристаллических частиц. Природа основных центров в цеолитах менее изучена, их количество повышают изменением электроотрицательного заряда каркаса или введением основных компонентов.

Каталитическая активность цеолитов определяется количеством, силой и доступностью кислотных центров Бренстеда, образующихся из-за замещения Si^{4+} на Al^{3+} в структуре. Активность коррелирует с отношением Si/Al , различные виды воздействия могут приводить к образованию внекаркасного Al и снижению кислотной активности цеолитов. В аморфных алюмосиликатах углы Al-O-Si малы из-за отсутствия дальнего порядка, что обуславливает их кислотность. В кристаллических цеолитах дальний порядок увеличивает углы Al-O-Si до 180° , что повышает кислотность ($\text{Si/Al} \approx 10$). Однако при высоком содержании Al кислотность активных центров снижается из-за влияния соседних атомов. Преодоление отношения Si/Al равным 10 устраняет это влияние, создавая микропористые материалы с однородной кислотностью. Замещение Al на B , Ga или Fe также регулирует кислотность, изменяя энергию депротонирования мостиковых гидроксидов. Доступность кислотных центров цеолитов, обусловленная большой площадью их внутренней поверхности, играет важную роль в катализе [12-15]. Пористая структура цеолитов определяет селективность к продуктам и общую активность цеолита.

В последние годы активно исследуются алюмосиликаты, особенно цеолиты, как твердые кислотные катализаторы в нефтепереработке благодаря их высокой площади поверхности, кислотности и стабильности. Однако высокая стоимость и расход цеолитов увеличивают себестоимость продукции. Природные

алюмосиликаты, такие как каолинит, ректорит, диатомит, клиноптилолит, нонтронит и глауконит, перспективны для синтеза цеолитов и каталитических композиций благодаря доступности и дешевизне. Кислотная и щелочная обработка природных цеолитов влияет на соотношение кислотных и основных центров, что изменяет их каталитическую активность. Алюмосиликаты интенсифицируют крекинг тяжелого нефтяного сырья, увеличивая выход легких фракций и снижая содержание асфальтенов [16, 17]. Размер пор и химический состав алюмосиликатов влияют на структуру асфальтенов и закоксовывание катализатора [18, 19]. Природные алюмосиликаты с различным соотношением пор обладают повышенной стабильностью и активностью, что снижает диффузионные ограничения и увеличивает срок службы катализатора, что особенно важно при переработке тяжелой нефти, где коксообразование требует частой замены катализатора [20, 21]. Исследуется также возможность использования природных алюмосиликатов для синтеза каталитически активных систем в реакциях крекинга углеводородов [22, 23].

Работа посвящена оценке каталитической активности цеолитсодержащей кремнистой породы Татарско-Шатрашанского месторождения путём сравнения её характеристик с промышленным катализатором процесса FCC.

Материалы и методы

Объектом исследования служила цеолитсодержащая кремнистая порода из Татарско-Шатрашанского месторождения цеолитов представляющая собой природный алюмосиликат. Подготовка объекта включала:

1. Механическое измельчение образцов цеолитсодержащей кремнистой породы.
2. Прокаливание измельчённых образцов при температуре 650°C в течение 4 часов в атмосфере воздуха.

Для сравнения состава, текстурных и каталитических свойств в качестве объекта был исследован промышленный катализатор FCC. Образец цеолитсодержащей породы содержал 9 % масс. клиноптилолита, 52,1 % масс. аморфных алюмосиликатов и 19 % масс. кристаллической фазы кальцита, соотношение Si/Al в породе составляло 2,17. Содержание клиноптилолита в образце промышленного катализатора FCC - 20 % масс., соотношение Si/Al - 1,38.

Измерение удельной поверхности проводилось методом термодесорбции азота на установке Quantachrome NOVA® 1200 (США). Расчет площади удельной поверхности проводили по методу БЭТ, объём пор и среднего диаметра пор по методу ВЖН, объём микропор по t-методу Хэлси.

Для оценки каталитической активности цеолитсодержащей кремнистой породы в процессе крекинга использовалась модельная смесь нормальных алканов состава $\text{C}_{12}\text{-C}_{22}$, которая была приготовлена путём смешения индивидуальных алканов в равных пропорциях. Эксперименты

проводились на лабораторной установке каталитического крекинга с неподвижным слоем катализатора. Определение состава сырья и продуктов крекинга проводилось методом хромато-масс-спектрометрии на газожидкостном хромато-масс-спектрометре Perkin Elmer Turbo Mass Gold GS/MS, США).

Обсуждение результатов

Изотермы адсорбции-десорбции азота для цеолитсодержащей кремнистой породы и промышленного катализатора FCC демонстрируют петлю гистерезиса типа H3 (рис. 1, 2), начиная с $p/p_0 = 0,45$, классифицируемые по IUPAC как тип IV. В диапазоне $0,10 < p/p_0 < 0,65$ наблюдается слабое увеличение адсорбции, при $p/p_0 > 0,65$ изотерма резко поднимается. Петля гистерезиса выше $p/p_0 = 0,40$ обусловлена капиллярной конденсацией азота между частицами. Изотерма образца катализатора FCC характеризуется широкой петлей гистерезиса, что связано с ограничением диффузии азота через сужение микропористой структуры и наличием пор клиновидной формы.

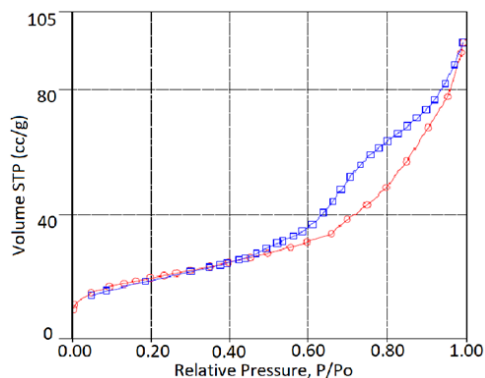


Рис. 1 – Изотермы адсорбции/десорбции азота цеолитсодержащей кремнистой породы

Fig. 1 – Nitrogen adsorption/desorption isotherms of zeolite-containing siliceous rock

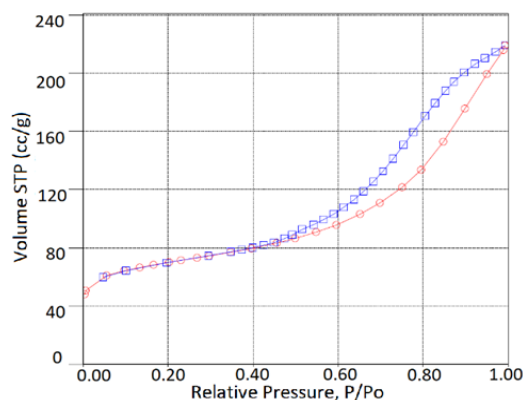


Рис. 2 – Изотермы адсорбции/десорбции азота промышленного катализатора FCC

Fig. 2 – Nitrogen adsorption/desorption isotherms of the FCC industrial catalyst

Распределение пор по размерам в образцах ЦКП и промышленного катализатора FCC, определенного методом ВЈН, демонстрирует наличие мезо- и

макропор, с максимумами распределения пор со средними размерами 4 и 7 нм (рис. 3 и 4).

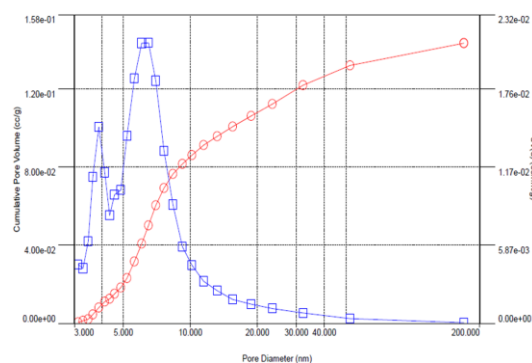


Рис. 3 – Распределение пор по методу ВЈН цеолитсодержащей кремнистой породы

Fig. 3 – BJH pore distribution of zeolite-containing siliceous rock

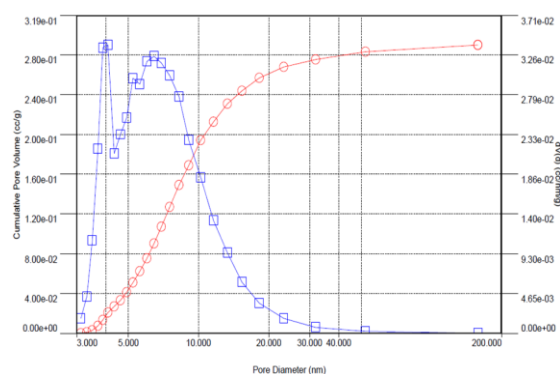


Рис. 4 – Распределение пор по методу ВЈН промышленного катализатора FCC

Fig. 4 – Pore distribution according to the BJH method of the FCC industrial catalyst

Результаты анализа проведенных методами БЭТ и ВЈН позволяют сделать вывод о различиях в пористой структуре и свойствах поверхности между цеолитсодержащей кремнистой породой (ЦКП) и катализатором FCC (табл. 1). Из полученных данных видно, что удельная поверхность и общий объем пор цеолитсодержащей кремнистой породы значительно ниже, чем у промышленного катализатора FCC, что указывает на недостаточную доступность кислотных активных центров для исходных молекул смеси н-алканов. Однако средний диаметр пор у образца породы выше, чем у катализатора FCC, что способствует улучшению внутренней и внешней диффузии более крупных молекул.

Пористая структура цеолитсодержащей кремнистой породы подходит к переработке высокомолекулярного сырья.

Выход продуктов крекинга н-алканов состава C_{12} - C_{22} в контрольном эксперименте и в присутствии катализатора FCC, а также с участием цеолитсодержащей кремнистой породой при температурах 400, 450 и 0480 °C представлен на рис. 5. Дальнейшее увеличение температуры выше 480 °C ведет к увеличению выхода газообразных продуктов вследствие интенсификации вторичных реакций крекинга.

В контрольном эксперименте выход газообразных продуктов был минимальным, что обусловлено высокими значениями энергии активации вторичных реакций. При температурах 400, 450 и 480 °С выход кокса составил 1,4%, 1,5% и 1,2% соответственно. Известно, что с повышением температуры образование кокса на поверхности алюмосиликатных катализаторов снижается, но в данном случае наблюдалось увеличение выхода кокса до 450 °С, что объясняется более высокой скоростью реакций уплотнения по сравнению с реакциями крекинга. При 480 °С коксообразование уменьшилось.

Таблица 1 - Сравнительный анализ пористой структуры цеолитсодержащей кремнистой породы и промышленного катализатора FCC

Table 1 - Comparative analysis of the porous structure of zeolite-containing siliceous rock and an industrial FCC catalyst

Показатель	ЦКП	Кат. FCC
Удельная поверхность по БЭТ, м ² /г	68,3	254,6
Общий объем пор по ВЖН, см ³ /г	0,14	0,29
Средний диаметр пор по ВЖН, нм	6,4	4,1
Удельная поверхность по ВЖН, м ² /г	66,6	144,1

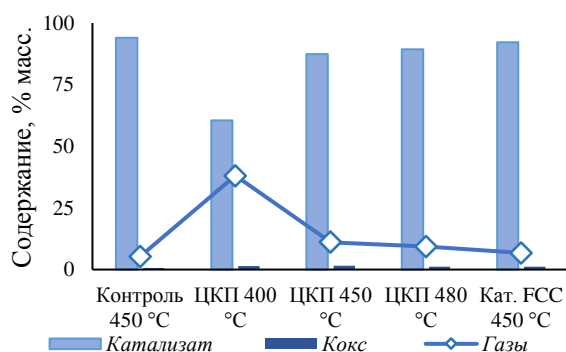


Рис. 5 – Выход продуктов крекинга

Fig. 5 – Yield of cracking products

Для оценки влияния температуры на степень превращения компонентов смеси, нормальные алканы были сгруппированы в соответствии с количеством атомов углерода: C₅-C₁₁, относящиеся к легким дистиллятным фракциям (бензинам); C₁₂-C₁₇, соответствующие средним дистиллятным фракциям (керосинам); и C₁₈-C₂₂, включающие тяжелые дистиллятные фракции (дизельное топливо) (табл. 2).

Исследование зависимости степени превращения нормальных алканов от температуры крекинга показало, что при 400 °С преимущественно реагируют алканы C₁₂-C₁₇, увеличивая относительное содержание высококипящих алканов C₁₈-C₂₂ (табл. 3). При 450 °С доля реакций крекинга возрастает, увеличивая выход легких алканов C₅-C₁₁, содержание н-алканов C₁₂-C₁₇ снижается. При температуре 480 °С содержание алканов C₁₂-C₁₇ возвращается к

исходному уровню, а количество алканов состава C₁₈-C₂₂ уменьшается. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению газообразования (рис. 5). Оптимальный температурный интервал для переработки тяжелого нефтяного сырья составляет 450-480 °С, с предпочтительной нижней границей 450 °С для минимизации газообразования.

Таблица 2 - Перераспределение алканов в составе катализаторов

Table 2 - Redistribution of alkanes in the composition of catalysts

Сумма н-алканов	Исх. смесь	Температура крекинга, °С		
		400	450	480
C ₅ -C ₁₁	0	3,8	6,9	6,4
C ₁₂ -C ₁₇	58,6	50,6	51,3	59,0
C ₁₈ -C ₂₂	41,3	45,5	41,8	34,6

Таблица 3 - Рассчитанные значения конверсий

Table 3 - Calculated conversion values

Показатель	Контр., 450 °С	Цеолитсодержащая порода (ЦКП), °С			Кат. FCC, 450 °С
		400	450	480	
Конверсия, %	2,4	8,9	10,1	9,3	30,4

Для цеолитсодержащей кремнистой породы доминирующими продуктами являются ненасыщенные углеводороды, их содержание возрастает с повышением температуры (табл. 4).

Таблица 4 - Состав катализата без н-алканов

Table 4 - The composition of the catalysate without n-alkanes

Состав катализата	Контр., 450 °С	Цеолитсодержащая порода (ЦКП), °С			Кат. FCC, 450 °С
		400	450	480	
Алкены	98,8	81,9	83,4	85,9	17,7
Арены	0	8,7	7,3	5,5	11,8
Нафтены	1,2	8,6	8,3	9,5	13,9
Изоалканы	0	0,6	1,0	0	56,7

Ароматические углеводороды при этом снижаются, а нафтеновые остаются стабильными. Изоалканы, являющиеся высокооктановым компонентом бензина, демонстрируют нелинейное увеличение выхода с максимумом при 450 °С. Такое значительное увеличение выхода нелинейных углеводородов можно объяснить изменением соотношения кислотных центров Бренстеда и Льюиса. Эксперимент с промышленным катализатором FCC показал преобладание изоалканов в продуктах, что свидетельствует о высокой эффективности катализатора для реакций изомеризации. Разветвленные алкены образуются при взаимодействии третичного карбения с кислотными центрами Бренстеда, что объясняет преобладание таких соединений.

Закключение

Результаты проведенных исследований показали, что цеолитсодержащая порода обладает

определённой каталитической активностью, хотя и в меньшей степени по сравнению с промышленным катализатором FCC. Удельная поверхность природного алюмосиликата и характеристики его пор значительно уступают характеристикам промышленного катализатора. При крекинге алканов C_{12} - C_{22} с участием цеолитсодержащей породы при температурах 400, 450 и 480 °С, преимущественно происходит конверсия н-алканов состава C_{18} - C_{22} , однако суммарный выход различных типов углеводородов относительно невелик. При этом основная доля продуктов приходится на ненасыщенные углеводороды, в том числе алкены, которые представлены как линейными, так и нелинейными соединениями. Также можно отметить, что выход газообразных продуктов в экспериментах с цеолитсодержащей породой был крайне мал, а выход кокса при разных температурах оставался в пределах от 1,2 до 1,5 % масс. Из текста можно сделать вывод, что использование катализатора значительно увеличивает конверсию исходного сырья по сравнению с процессом без применения катализатора. Промышленный катализатор FCC показал наиболее высокую конверсию, которая в три раза превысила конверсию в контрольном эксперименте или с использованием цеолитсодержащей породы.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Литература

1. Д.А. Халикова, Вестник Казан. технол. ун-та. 6, 3, 217-221 (2013).
2. С.М. Петров, Вестник Казан. технол. ун-та. 17, 18, 209-212 (2014).
3. С.М. Петров, Вестник Казан. технол. ун-та. 16, 18, 261-265 (2013).
4. Э.А. Галиуллин, Вестник технол. ун-та. 19, 4, 47-51 (2016).
5. Р.Р. Хисмиев, Вестник Казан. технол. ун-та. 17, 21, 312-315 (2014).
6. P.J. Becker, Fuel 164, 73-82 (2016).
7. А.Л. Максимов, Нефтехимия 59, 5 516-523. (2019).
8. И.М. Абдрафикова, Нефтехимия 55, 2, 110-110 (2015).
9. А.И. Фатхутдинов, Вестник технол. ун-та. 20, 7, 74-77 (2017).
10. S.M. Petrov, Petroleum Chemistry 56, 1 21-26 (2016).
11. А.Г. Окунев, Успехи химии 84, 9 981-999 (2015).
12. А.В. Вахин, Процессы 9, 1 158 (2021).
13. С.Н. Хаджиев, Нефтехимия 51, 1, 3-16 (2011).
14. Б.П. Туманян, Успехи химии 84, 11, 1145-1175 (2015).
15. Р.Р. Закеева, Известия Уфимского научного центра РАН 1, 94-99 (2020).
16. С.М. Петров, Вестник Казанского технологического университета 19, 17, 60-63 (2016).
17. Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 627, 5, 14-19 (2021).
18. А. И. Лakhova, Химия и технология топлив и масел 58, 2, 297-301 (2022).
19. А.К. Шигабутдинов, Нефтепереработка и нефтехимия 5, 3-13 (2022).
20. А.К. Шигабутдинов, Вестник технол. ун-та. 25, 7, 55-59 (2022).
21. Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 630, 2, 21-26 (2022).
22. Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 635, 1. 25-28 (2023).
23. И.Д. Аглиуллина, Вестник технол. ун-та 26, 8, 52-57 (2023).
1. D.A. Khalikova, Herald of Kazan Technological University 16, 3, 217-221 (2013).
2. S.M. Petrov, Herald of Kazan Technological University 17, 18, 209-212 (2014).
3. S.M. Petrov, Herald of Kazan Technological University 16, 18, 261-265 (2013).
4. E.A. Galiullin, Herald of Kazan Technological University 19, 4, 47-51 (2016).
5. R.R. Khismiev, Herald of Kazan Technological University 17, 21, 312-315 (2014).
6. P.J. Becker, Fuel 164, 73-82 (2016).
7. A.L. Maksimov, Petrochemistry 59, 5 516-523. (2019).
8. I.M. Abdrafikova, Petrochemistry 55, 2, 110-110 (2015).
9. A.I. Fatkhutdinov, Herald of Technological University 20, 7, 74-77 (2017).
10. S.M. Petrov, Petroleum Chemistry 56, 1 21-26 (2016).
11. A.G. Okunev, Uspekhi khimii 84, 9 981-999 (2015).
12. A.V. Vakhin, Processes 9, 1 158 (2021).
13. S.N. Khadzhiev, Petrochemistry 51, 1, 3-16 (2011).
14. B.P. Tumanyan, Advances in Chemistry 84, 11, 1145-1175 (2015).
15. R.R. Zakieva, Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences 1, 94-99 (2020).
16. S.M. Petrov, Herald of Technological University 19, 17, 60-63 (2016).
17. E.G. Moiseeva, Chemistry and technology of fuels and oils 627, 5, 14-19 (2021).
18. A. I. Lakhova, Chemistry and technology of fuels and oils 58, 2, 297-301 (2022).
19. A.K. Shigabutdinov, Oil Refining and petrochemistry 5, 3-13 (2022).
20. A.K. Shigabutdinov, Herald of Technological University 25, 7, 55-59 (2022).
21. E.G. Moiseeva, Chemistry and technology of fuels and oils 630, 2, 21-26 (2022).
22. E.G. Moiseeva, Chemistry and technology of fuels and oils 635, 1. 25-28 (2023).
23. I.D. Agliullina, Herald of Technological University 26, 8, 52-57 (2023).

References

© **М. Ю. Антонова** – студент кафедры Химической технологии переработки нефти и газа (ХТПНГ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия; **Е. Г. Зайцева** – аспирант кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **Ю. Х. Усманова** – к.т.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **А. Р. Давлетшин** – д.т.н., профессор, кафедра Технологии нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия; **С. М. Петров** – к.т.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **Н. Ю. Башкирцева** – д.т.н., профессор, кафедра ХТПНГ, КНИТУ, Bashkirtseva NYu@corp.knrtu.ru.

© **M. Y. Antonova** – Student of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (CTOGP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia; **E. G. Zaitseva** – PhD-student of the CTOGP department, KNRTU; **Yu. Kh. Usmanova** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the CTOGP department, KNRTU; **A. R. Davletshin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of Oil and Gas Technology, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia; **S. M. Petrov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the CTOGP department, KNRTU; **N. Y. Bashkirtseva** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, the CTOGP department, KNRTU, Bashkirtseva NYu@corp.knrtu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 23.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 21.10.25.