

Научная статья

УДК 661.183.6:665.733:541.128

doi: 10.17223/24135542/40/3

Исследование стабильности работы гранулированного цеолитного катализатора с иерархической структурой пор в процессе облагораживания прямогонного бензина

**Людмила Михайловна Величкина¹, Яков Евгеньевич Барбашин²,
Ольга Сергеевна Травкина³, Александр Владимирович Восмерилов⁴**

^{1, 2, 4} Институт химии нефти Сибирского отделения

Российской академии наук, Томск, Россия

*³ Институт нефтехимии и катализа Уфимского федерального
исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия*

⁴ Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ mps@ipc.tsc.ru

² dmeps@ipc.tsc.ru

³ simchanka@mail.ru

⁴ pika@ipc.tsc.ru

Аннотация. Поиск новых способов получения цеолитных катализаторов для процессов нефтепереработки, в частности для получения качественных автомобильных бензинов, является важной научной и практической задачей. В данной работе в процессе облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти проведено исследование стабильности действия катализатора, полученного на основе синтезированного гранулированного цеолита типа пентасил с иерархической структурой пор. Авторами разработан способ приготовления гранулированного цеолита ZSM-5 (MFI) высокой степени кристалличности в Na-форме, основанный на кристаллизации в растворе силиката натрия предварительно сформированных гранул, содержащих заданное количество порошкообразного цеолита ZSM-5 и синтетического аморфного алюмосиликата. Показано, что пористая структура полученного таким образом цеолита ZSM-5 состоит из микро-, мезо- и макропор.

Методом газовой хроматографии определен состав образующихся при переработке прямогонного бензина с использованием разработанного цеолитного катализатора газообразных и жидких (высокооктановых бензинов) продуктов реакции, а также рассчитаны выходы и октановые числа катализаторов, показана динамика изменения этих характеристик в зависимости от длительности работы цеолитного катализатора. Методом синхронного термического анализа исследован состав и определено количество углеродных продуктов уплотнения, образующихся на цеолитном катализаторе в ходе проведения ресурсного испытания.

Показано, что высокооктановые бензины, полученные в процессе превращения прямогонного бензина, полностью соответствуют современным нормативным требованиям на автомобильные бензины. Определена стабильность каталитического действия цеолитного катализатора в рассмотренном временном интервале его работы и показана возможность дальнейшей эксплуатации катализатора без проведения его окислительной регенерации. На основании проведенных исследований сделано заключение о высоком потенциале практического применения

полученного гранулированного цеолита с иерархической пористой структурой в процессах нефтепереработки.

Ключевые слова: цеолит, пентасил, катализатор, бензин, углеродные отложения

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии нефти СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031200182-5), и в рамках государственного задания ИНК УФИЦ РАН (тема № FMRS-2022-0080).

Для цитирования: Величкина Л.М., Барбашин Я.Е., Травкина О.С., Восмериков А.В. Исследование стабильности работы гранулированного цеолитного катализатора с иерархической структурой пор в процессе облагораживания прямогонного бензина // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 40. С. 25–33. doi: 10.17223/24135542/40/3

Original article

doi: 10.17223/24135542/40/3

Study of stability of granulated zeolite catalyst with hierarchical pore structure in the process of straight-run gasoline upgrading

**Ludmila M. Velichkina¹, Yakov E. Barbashin²,
Olga S. Travkina³, Alexander V. Vosmerikov⁴**

*^{1, 2, 3, 4} Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

*³ Institute of Petrochemistry and Catalysis – Subdivision of the Ufa Federal
Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation*

⁴ Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ mps@ipc.tsc.ru

² dmpe@ipc.tsc.ru

³ simchanka@mail.ru

⁴ pika@ipc.tsc.ru

Abstract. The search for new ways to produce zeolite catalysts for oil refining processes, in particular, for producing high-quality gasoline, is an important scientific and practical task. In this work, in the process of refining the straight-run gasoline fraction of oil, a study was conducted on the stability of the action of a catalyst obtained on the basis of synthesized granular zeolite of the pentasyl type with a hierarchical pore structure. The authors have developed a method for the preparation of granular zeolite ZSM-5 (also known as MFI) with a high degree of crystallinity in Na form, based on the crystallization in a solution of sodium silicate of preformed granules containing a predetermined amount of powdered zeolite ZSM-5 and synthetic amorphous aluminosilicate. It is shown that the porous structure of the ZSM-5 zeolite obtained in this way consists of micro-, meso- and macropores.

The composition of the gaseous and liquid (high-octane gasoline) reaction products formed during the processing of straight-run gasoline using the developed zeolite catalyst was determined by gas chromatography, and the yields and octane numbers of the

catalysts were calculated, and the dynamics of changes in these characteristics depending on the duration of operation of the zeolite catalyst was shown. The composition and quantity of carbon compaction products formed on a zeolite catalyst during a resource test were studied by synchronous thermal analysis.

It has been shown that high-octane gasoline produced during the conversion of straight-run gasoline fully complies with modern regulatory requirements for automobile gasoline. The stability of the catalytic action of the zeolite catalyst in the considered time interval of its operation is determined and the possibility of further operation of the catalyst without its oxidative regeneration is shown. Based on the conducted research, a conclusion has been made about the high potential of practical application of the obtained granular zeolite with a hierarchical porous structure in oil refining processes.

Keywords: zeolite, pentasyl, catalyst, gasoline, carbon deposits

Acknowledgments: This scientific work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Registration Number 121031200182-5), and within the state assignment for IPC UFRC RAS (project no. FMRS-2022-0080).

For citation: Velichkina, L.M., Barbashin, Ya.E., Travkina, O.S., Vosmerikov, A.V. Study of stability of granulated zeolite catalyst with hierarchical pore structure in the process of straight-run gasoline upgrading. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 40, 25–33. doi: 10.17223/24135542/40/3

Введение

Цеолиты с иерархической структурой пор – это материалы, которые в своей структуре содержат микро-, мезо- и макропоры, что позволяет преодолеть характерные для традиционных цеолитов ограничения, связанные с затруднением диффузии в их узких каналах реагентов и отвода образующихся продуктов реакции. Иерархическая структура цеолитов облегчает массоперенос, уменьшая диффузионное торможение и конфигурационный эффект, повышает реакционную способность и селективность по отношению к размеру и форме молекул, а также срок службы катализаторов, получаемых на их основе [1–6].

Одним из перспективных направлений использования каталитических систем на основе цеолитов типа пентасил (ZSM-5/MFI) с иерархической структурой пор, имеющих высокую активность и селективность в реакциях конверсии углеводородов, развитую удельную поверхность, уникальные молекулярно-ситовые и кислотные свойства, является облагораживание прямогонных бензиновых фракций газовых конденсатов и нефтей [3, 5, 7, 8]. От активности и селективности используемых катализаторов зависит эффективность процессов, а стабильность катализаторов обеспечивает устойчивость этих показателей в течение длительного времени работы.

Целью данной статьи являлось исследование стабильности работы гранулированного цеолитного катализатора с иерархической пористой структурой в процессе облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти.

Методы

Гранулированный цеолит ZSM-5/MFI с молярным соотношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 50$ с иерархической пористой структурой готовили смешением порошкообразного цеолита и аморфного алюмосиликата, увлажнением полученной смеси путем добавления воды, формованием гранул диаметром $1,6 \pm 0,1$ мм и длиной $4-6 \pm 0,2$ мм, термообработкой сформованных гранул при $550 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 4 ч и гидротермальной кристаллизацией в растворе силиката натрия. В H-форму полученный гранулированный цеолит переводили методом ионного обмена катионов Na^+ на катионы NH_4^+ и проведением последующей термообработки образца при $550 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 6 ч. Описание разработанной авторами методики получения гранулированного цеолита с иерархической структурой пор и соответствующие ссылки приведены в опубликованной ранее работе [8]. Удельная поверхность синтезированного цеолита, определенная по методу БЭТ, составила $331 \text{ м}^2/\text{г}$, а объем макро-, мезо- и микропор был 0,35, 0,21 и $0,11 \text{ см}^3/\text{г}$ соответственно [8].

Каталитическую активность гранулированного цеолита с иерархической пористой структурой определяли в течение 30 ч непрерывной эксплуатации в проточной установке с неподвижным слоем катализатора в процессе облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти следующего состава (мас. %): 32,4 *n*-алканов $\text{C}_5\text{--C}_{12}$; 37,4 изоалканов $\text{C}_5\text{--C}_{10}$; 7,3 аренов $\text{C}_6\text{--C}_{12}$; 22,9 циклоалканов $\text{C}_5\text{--C}_{10}$. Прямогонная бензиновая фракция нефти имела октановое число по исследовательскому методу (ОЧИМ) 65 пунктов. Объем катализатора, загружаемого в реактор, составлял 4 см^3 . Процесс превращения прямогонной бензиновой фракции нефти осуществляли при температуре 420°C , объемной скорости подачи исходного сырья 2 ч^{-1} и атмосферном давлении. Анализ состава образующихся газообразных и жидких продуктов реакции проводили через 1, 15 и 30 ч работы катализатора.

Анализ состава прямогонного бензина и продуктов его превращения осуществляли хроматографическим методом на хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» (ЗАО СКБ «Хроматэк», Россия). Для определения состава жидкой фазы использовали капиллярную колонку BP-1 PONA ($100 \text{ м} \times 0,25 \text{ мм} \times 0,5 \text{ мкм}$), состав газовой фазы определяли на капиллярной колонке GS-Gas-Pro ($60 \text{ м} \times 0,32 \text{ мм}$) и набивной колонке Carbosieve S-II ($4 \text{ м} \times 2 \text{ мм}$). Углеводородный состав исходного прямогонного и полученных бензинов рассчитывали методом внутренней нормализации. Погрешность определения количественного углеводородного состава методом газовой хроматографии не превышает $\pm 2,5$ мас. %. Октановые числа бензинов рассчитывались на основе хроматографических данных.

Характеристики углеродных продуктов уплотнения, образовавшихся на поверхности исследуемого цеолитного катализатора при облагораживании прямогонной бензиновой фракции нефти в течение 30 ч работы, определяли методом синхронного термического анализа (СТА) с использованием дериватографа Q-1500 D системы Paulik–Paulik–Erdey (МОН, Венгрия). Результаты измерений обрабатывались с помощью программного продукта Tanaliz,

обеспечивающего контроль и измерение температуры, скорости нагрева образца, изменения массы образца и тепловых эффектов. Скорость нагрева исследуемого образца составляла 10°С/мин, его масса соответствовала 400 мг, измерения проводились на воздухе. Погрешность определения количества углеводородных продуктов уплотнения методом СТА не превышает ±2,5 мас. %.

Результаты

Исследование каталитической активности гранулированного цеолита с иерархической структурой пор в процессе облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти, проведенное нами ранее [8], показало перспективность применения данного типа цеолита в качестве катализатора этого процесса. Так, в температурном диапазоне реакции 360–420°С были получены высокооктановые бензины, полностью соответствующие современным нормативным требованиям на автомобильный бензин, согласно которым предельно допустимое содержание ароматических углеводородов составляет 35 об. %, в том числе наиболее токсичного из них – бензола – должно быть не более 1 об. %.

В таблице приведено изменение состава и выхода газообразных и жидких продуктов превращения прямогонного бензина в зависимости от длительности работы цеолитного катализатора.

Влияние длительности работы цеолитного катализатора в процессе облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти на характеристики образующихся продуктов

Продукты реакции, мас. %	Длительность работы катализатора, ч		
	1	15	30
Газообразные			
<i>n</i> -алканы C ₁ –C ₅	70,7	67,8	64,6
Изоалканы C ₄ –C ₅	23,6	24,5	27,3
Алкены C ₂ –C ₄	5,7	7,7	8,1
Жидкие			
<i>n</i> -алканы C ₅ –C ₁₂	9,8	12,0	14,5
Изоалканы C ₅ –C ₁₀	35,4	36,6	39,2
Арены C ₆ –C ₁₂	31,6	26,4	20,7
в том числе бензол	1,3	1,0	0,9
Циклоалканы C ₅ –C ₁₀	20,4	21,6	21,6
Алкены C ₅ –C ₁₀	2,8	3,4	4,0
Выход катализата, об. %	79	84	88
ОЧИМ	90	89	83

В составе газообразных продуктов реакции преобладают *n*-алканы C₁–C₅, большая часть из которых приходится на пропан. С увеличением длительности эксплуатации катализатора выход *n*-алканов C₁–C₅ уменьшается при одновременном увеличении в составе образующихся газов доли алкенов C₂–C₄ и изоалканов C₄–C₅. Наблюдаемые изменения связаны с частичной дезактивацией углеродными продуктами уплотнения, образующимися в ходе ресурсных испытаний, в первую очередь наиболее активных центров

цеолита, ответственных за реакции крекинга, ароматизации и переноса протонов. В результате этого уменьшается выход газообразных углеводородов, в составе которых растет доля изоалканов и алкенов, и повышается образование целевого продукта реакции – высокооктанового бензина. Наибольшее октановое число имеет бензин, полученный после 1 ч работы катализатора, что связано с максимальным содержанием в нем ароматических углеводородов (31,6 мас. %), концентрация которых при этом не превышает предельно допустимого значения. Наибольший вклад в величину показателя октанового числа бензина вносят высокооктановые компоненты – ароматические углеводороды и изоалканы. Причем если содержание первых ограничивается действующими нормативными актами, то концентрация алканов изостроения, наоборот, не имеет ограничения, поскольку они и продукты их сгорания в автомобильных двигателях не представляют вреда для здоровья человека и угрозы для состояния окружающей среды. При длительной эксплуатации гранулированного цеолитного катализатора с иерархической структурой пор наблюдаются уменьшение выхода ароматических углеводородов и повышение концентрации изоалканов (см. таблицу). После первых 15 ч работы катализатора выход аренов уменьшается на 5,2 мас. %, после последующих 15 ч доля аренов уменьшается еще на 5,7 мас. %, что свидетельствует о практически равном снижении количества образующихся аренов за одинаковые временные интервалы и, соответственно, о достаточной высокой стабильности работы катализатора.

В данном исследовании для оценки стабильности действия гранулированного цеолитного катализатора с иерархической пористой структурой в процессе облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти его ресурсные испытания были проведены в течение 30 ч. Однако, учитывая качественный состав высокооктанового бензина, полученного за это время, испытания можно было продолжать еще некоторое время до снижения показателя октанового числа образующегося бензина как минимум до 80 пунктов.

На рис. 1 представлена дериватограмма гранулированного цеолитного катализатора с иерархической структурой пор, проработавшего 30 ч в процессе облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти

При нагревании цеолитного образца до 230°C наблюдается уменьшение его массы на 7,09 мас. % с пиком на кривой ДТГ при 128°C и соответствующим эндоэффектом за счет удаления адсорбированной воды. Согласно литературным данным [9], при проведении СТА цеолитного катализатора в температурном интервале 100–350°C происходит удаление поверхностно-связанных углеводородов алифатического ряда, а выше 350°C выгорают конденсированные ароматические структуры, содержащиеся как в каналах, так и на внешней поверхности цеолита. В интервале температур от 230 до 345°C масса образца уменьшается на 3,01 мас. % с пиком на кривой ДТГ при 257°C и соответствующим эндоэффектом на кривой ДТА за счет удаления адсорбированных углеводородов. При прокаливании катализатора при температуре выше 345°C происходит выгорание продуктов уплотнения, сопровождающееся экзоэффектом при 547°C на кривой ДТА, которому соответствует

пик при 557°C на кривой ДТГ. При этом от 345 до 455°C наблюдаются низкотемпературное плечо на кривой ДТГ и экзоэффект около 400°C на кривой ДТА, что обусловлено выгоранием слабоконденсированных продуктов уплотнения, их количество составляет 0,93 мас. %.

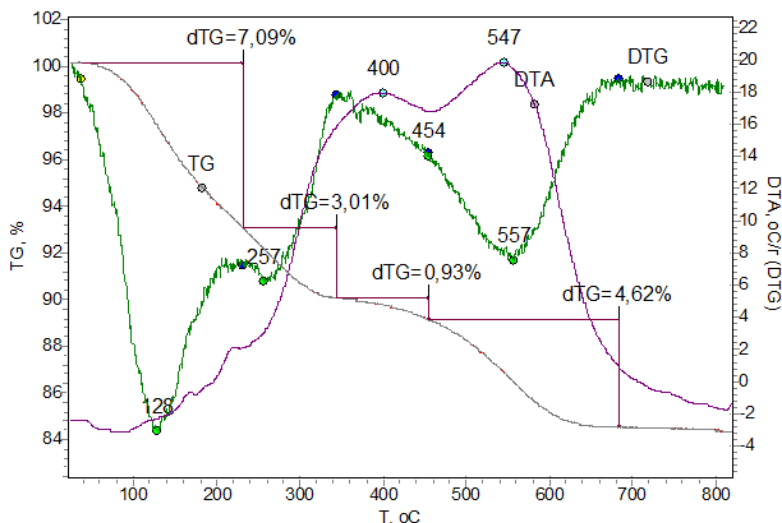


Рис. 1. Дериватограмма цеолитного катализатора после 30 ч его работы в процессе облагораживания прямогонного бензина

При температуре выше 455°C удаляются более конденсированные углеродистые отложения в количестве 4,62 мас. %. Суммарное количество продуктов уплотнения, образовавшихся на цеолитном катализаторе в процессе его работы в течение 30 ч, составляет 5,55 мас. %. Следует отметить небольшое количество образовавшихся за это время работы катализатора углеродных продуктов уплотнения и относительно невысокую температуру конца их выгорания (650°C), что в перспективе позволяет регенерировать гранулированный цеолитный катализатор при сравнительно невысоких температурах в течение непродолжительного времени, сохраняя тем самым его иерархическую структуру и восстанавливая первоначальную каталитическую активность.

Заключение

Данные по количеству и качеству полученных высокооктановых бензинов, стабильности каталитического действия гранулированного цеолита с иерархической структурой пор, природе и количеству углеродных продуктов уплотнения, образовавшихся после 30 ч работы катализатора при облагораживании прямогонной бензиновой фракции нефти, показывают высокий потенциал практического применения цеолита данного типа в процессах нефтепереработки.

Список источников

1. Ai L., Hui D., Jiao Y., Zhou Z., Wu X-F., Li P., Huang S. Promoting effect of hierarchical zeolite on Ag catalysts for the gas-phase selective hydrogenation of α -methylacrolein // *New Journal of Chemistry*. 2025. Vol. 49. P. 5962–5971.
2. Chaipornchalermp P., Prasertsab A., Prasanseang W., Wattanakit C. Perspectives on Recent Advances in Hierarchical Zeolites for Bioethanol Conversion to Chemicals, Jet Fuels, and Carbon Nanotubes // *Energy Fuels*. 2024. Vol. 38 (15). P. 13612–13636.
3. Травкина О.С., Аглиуллин М.Р., Кутепов Б.И. Современное состояние промышленного производства и применения цеолитсодержащих адсорбентов и катализаторов в России // *Катализ в промышленности*. 2021. Т. 21, № 5. С. 297–307.
4. Hartmann M., Thommes M., Schwieger M. Hierarchically-Ordered Zeolites: A Critical Assessment // *Advanced Materials Interfaces*. 2021. V. 8 (4). P. 1–38.
5. Kerstens D., Smeyers B., Van Waeyenberg J., Zhang Q., Yu J., Sels B.F. State of the Art and Perspectives of Hierarchical Zeolites: Practical Overview of Synthesis Methods and Use in Catalysis. *Advanced Materials*. 2020. Vol. 32. Art. 2004690.
6. Peng P., Gao X-H., Yan Z-F., Mintova S. Diffusion and catalyst efficiency in hierarchical zeolite catalysts // *National Science Review*. 2020. Vol. 7 (11). P. 1726–1742.
7. Коробицына Л.Л., Травкина О.С., Величина Л.М., Восмерилов А.В., Кутепов Б.И. Каталитические превращения метанола и прямогонного бензина на гранулированных катализаторах с различным содержанием цеолита ZSM-5 в H-форме. *Нефтехимия*. 2022. Т. 62, № 3. С. 408–417.
8. Величина Л.М., Коробицына Л.Л., Травкина О.С., Восмерилов А.В. Превращение метана и прямогонной бензиновой фракции нефти на гранулированном цеолитном катализаторе с иерархической структурой // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2025. Т. 68, № 8. С. 67–74.
9. Богдан В.И., Коклин А.Е., Казанский В.Б. Изомеризация *n*-пентана на H-форме морденита в газовой фазе и в сверхкритическом состоянии // *Кинетика и катализ*. 2007. Т. 48, № 6. С. 841–845.

References

1. Ai, L.; Hui, D.; Jiao, Y.; Zhou, Z.; Wu, X-F.; Li, P.; Huang, S. Promoting effect of hierarchical zeolite on Ag catalysts for the gas-phase selective hydrogenation of α -methylacrolein. *New Journal of Chemistry*. 2025, 49, 5962–5971.
2. Chaipornchalermp, P.; Prasertsab, A.; Prasanseang, W.; Wattanakit, C. Perspectives on Recent Advances in Hierarchical Zeolites for Bioethanol Conversion to Chemicals, Jet Fuels, and Carbon Nanotubes. *Energy Fuels*. 2024, 38, 15, 13612–13636.
3. Travkina, O.S.; Agliullin, M.R.; Kutepov B.I. State of the art in the industrial production and application of zeolite-containing adsorbents and catalysts in Russia. *Catalysis in Industry*. 2022, 14, 1, 56–65.
4. Hartmann, M.; Thommes, M.; Schwieger, M. Hierarchically-Ordered Zeolites: A Critical Assessment. *Advanced Materials Interfaces*. 2021, 8, 4, 1–38.
5. Kerstens, D.; Smeyers, B.; Van Waeyenberg, J.; Zhang, Q.; Yu, J.; Sels, B.F. State of the Art and Perspectives of Hierarchical Zeolites: Practical Overview of Synthesis Methods and Use in Catalysis. *Advanced Materials*. 2020, 32, 2004690.
6. Peng, P.; Gao, X-H.; Yan, Z-F.; Mintova, S. Diffusion and catalyst efficiency in hierarchical zeolite catalysts. *National Science Review*. 2020, 7, 11, 1726–1742.
7. Korobitsyna, L.L.; Travkina, O.S.; Velichkina, L.M.; Vosmerikov, A.V.; Kutepov B.I. Catalytic Conversion of methanol and straight-run gasoline over granulated catalysts with different concentrations of H-Form ZSM-5 zeolite. *Petroleum Chemistry*. 2022. 62, 5, 544–551.
8. Velichkina, L.M.; Korobitsyna, L.L.; Travkina, O.S.; Vosmerikov A.V. Conversion of methane and straight-run gasoline fraction of oil on a granular zeolite catalyst with a hierarchical

structure. *ChemChemTech* [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2025, 68, 8, 67–74.

9. Bogdan, V.I.; Koklin, A.E.; Kazanskii, V.B. Gas-phase and supercritical *n*-pentane isomerization on H-mordenite. *Kinetics and Catalysis*. 2007, 48, 6, 785–788.

Сведения об авторах:

Величкина Людмила Михайловна – доцент, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: mps@ipc.tsc.ru

Барбашин Яков Евгеньевич – научный сотрудник лаборатории каталитической переработки легких углеводородов Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: dmpps@ipc.tsc.ru

Травкина Ольга Сергеевна – доцент, доктор химических наук, старший научный сотрудник Института нефтехимии и катализа Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (Уфа, Россия). E-mail: simchanka@mail.ru

Восмериков Александр Владимирович – доктор химических наук, профессор, директор Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия); заведующий кафедрой высокомолекулярных соединений и нефтехимии химического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: pika@ipc.tsc.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Velichkina Ludmila M. – Docent, Candidate of Chemical Science, Leading Researcher, Head of the Laboratory, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: mps@ipc.tsc.ru

Barbashin Yakov E. – Researcher Associate, Laboratory of Catalytic Processing of Light Hydrocarbons, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dmpps@ipc.tsc.ru

Travkina Olga S. – Docent, Doctor of Chemical Science, Senior Researcher, Institute of Petrochemistry and Catalysis – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russian Federation). E-mail: simchanka@mail.ru

Vosmerikov Alexander V. – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Director of the Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); Head of the Department of High Molecular Compounds and Petrochemistry, Faculty of Chemistry, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: pika@ipc.tsc.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

*The article was submitted 15.07.2025; accepted for publication 03.12.2025
Статья поступила в редакцию 15.07.2025; принята к публикации 03.12.2025*