

Научная статья

УДК 666.3-1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-96-105

РАССМОТРЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ НОСИТЕЛЕЙ КАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

А.С. Беспалов¹, А.В. Истомин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены основные направления применения катализаторов для процессов нефтепереработки, в том числе с целью импортозамещения. Показаны некоторые физико-механические характеристики высокопористого материала на основе оксидных волокон, раскрывающие перспективность применения данного класса материала в качестве носителей катализаторов. Методом магнитно-резонансной томографии изучено движение фронта воды в волокнистом высокопористом материале. Показано, что термическая активация поверхности волокон повышает сорбционную емкость материала.

Ключевые слова: волокнистый высокопористый материал, катализатор, сорбционная емкость, удельная поверхность

Для цитирования: Беспалов А.С., Истомин А.В. Рассмотрение особенностей высокопористых материалов для применения в качестве носителей каталитически активных веществ // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-96-105.

Scientific article

FEATURES OF HIGH-POROUS MATERIALS FOR USE AS CARRIERS OF CATALYTICALLY ACTIVE SUBSTANCES

A.S. Bepalov¹, A.V. Istomin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article considers the main directions of application of catalysts for oil refining processes, including those for the import substitution. Some properties of a high-porous material based on oxide fiber are demonstrated, revealing the prospect of using this class of material as catalyst carrier. The water front movement in a fibrous high-porous material has been studied by the magnetic resonance imaging (MRI process). It has been shown that thermal activation of the fiber surface increases the sorption capacity of the material.

Keywords: fibrous high-porous material, catalyst, sorption capacity, specific surface area

For citation: Bepalov A.S., Istomin A.V. Features of high-porous materials for use as carriers of catalytically active substances. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-96-105.

Введение

Не менее 90 % всех промышленных химических процессов требуют использования катализаторов, наибольший объем которых (до 40 %) потребляет нефтеперерабатывающая промышленность. В последние годы наблюдается тренд на увеличение доли выхода светлых нефтепродуктов, таких как автомобильный бензин и дизельное топливо, для производства которых в первую очередь используются катализаторы.

Большая часть применяемых в России катализаторов импортного производства. На момент введения санкций зависимость от импорта составляла 70–80 %, а по отдельным категориям приближалась к 100 % [1]. Наиболее востребованные в процессах нефтепереработки катализаторы производят десять ведущих компаний, причем 53 % рынка занимают BASF SE (18,1 %), WR Grace (7,0 %), Johnson Matthey (5,9 %), Albetmarle Corp. (9,3 %), Haldor Topsøe (3,0 %), Honeywell (9,8 %) [2, 3].

В настоящее время в России особое внимание уделяется развитию отечественных мощностей по выпуску стратегически важных каталитических систем. На момент введения санкций в стране насчитывалось несколько крупных производителей катализаторов: ЗАО «Нижегородские сорбенты», ЗАО «Промышленные катализаторы», ООО «Новокуйбышевский завод катализаторов», ОАО «Ангарский завод катализаторов и органического синтеза», ОАО «Газпромнефть-ОМПЗ», ООО «Салаватский катализаторный завод», ООО «Стерлитамакский завод катализаторов», ООО «Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов» [4–6]. Общие производственные мощности отечественных предприятий могут закрыть потребность нефтеперерабатывающих заводов в катализаторах на ~ (50–60) %. Выпускаемые катализаторы в основном применяют на начальных этапах процесса нефтепереработки.

Наиболее востребованными группами являются катализаторы каталитического крекинга, гидроочистки и гидрокрекинга. В этих процессах нефтепереработки применяют твердые катализаторы. Катализаторы гетерогенных процессов объединяют такие параметры, как пористость, фракционный состав, насыпная, кажущаяся и истинная плотности, механическая прочность, удельная поверхность, распределение пор по радиусам, объем пор, теплоемкость, теплопаростойкость [7].

Современные катализаторы для процессов нефтепереработки представляют собой композицию, состоящую из множества компонентов, каждый из которых отвечает за каталитические и/или физические свойства. Традиционно в процессах крекинга нефти применяют микросферический катализатор, представляющий собой композицию из активного компонента (ультрастабильного цеолита типа Y в редкоземельной форме) и матрицы, состоящей из связующего вещества и наполнителя [8, 9]. Для преодоления диффузионных ограничений реакции при синтезе цеолитов стараются уменьшить размер кристаллов. При размере кристалла цеолита ~2 мкм степень использования внутренней поверхности для каталитических процессов с крупными молекулами составляет 30–40 % [10].

Матрица также влияет на качество катализатора. Применяемые матрицы классифицируют по химическому составу, происхождению компонентов (синтетические и полусинтетические), а также по степени активности. В большинстве случаев в качестве носителя выступают материалы, являющиеся термически устойчивыми и химически инертными. В качестве матрицы используют оксид алюминия, кремнезем, активированный уголь, а в отдельных случаях – оксиды магния, титана, циркония, цинка и др. [11]. На практике в основном применяют полусинтетические матрицы, состоящие из оксида кремния, оксида алюминия и природной глины. Оксиды алюминия и циркония в составе каталитических систем выступают в качестве как носителя катализатора, повышая его активность, придавая ему механическую прочность, так и структурного

промотора, стабилизируя его структуру [12]. В основном в глубоких процессах нефтепереработки применяют катализаторы в виде цилиндров, колец Рашига, шариков, микросфер, частиц в форме звездочек, дужек, лепешек и прочих форм, обусловленных особенностями конкретных технологических процессов и конструкцией реакторов [13].

За долгие годы развития процессов нефтепереработки совершенствовались и процессы каталитического крекинга, в частности изменялись способы контакта сырья и катализатора (в стационарном слое, движущемся слое шарикового катализатора, «кипящем» слое микросферического катализатора в аппаратах с лифт-реактором). Изменения претерпевали не только технологические особенности процесса, но и форм-фактор применяемых катализаторов (таблетированные на основе природных глин, шариковые синтетические алюмосиликаты, микросферические алюмосиликаты, в том числе цеолитсодержащие). Все изменения приводили к увеличению выхода целевого продукта – бензина [14].

Подбором катализатора крекинга не следует пренебрегать, от правильно выбранного катализатора зависят выход и качество целевых продуктов, скорость протекания процесса, воспроизводимость, длительность работы каталитической системы. На современных предприятиях лидируют цеолитсодержащие катализаторы сложного строения. Это материалы, состоящие из матрицы на основе аморфного алюмосиликата; активного компонента, в качестве которого применяют цеолиты типа X, Y и ZSM-5; ряда добавок, способствующих повышению активности катализатора [15–17]. На рис. 1 представлено внутреннее строение типичного катализатора крекинга.

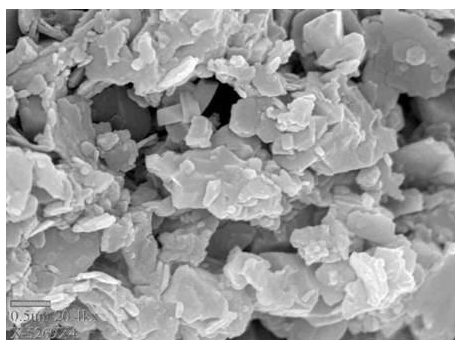


Рис. 1. Микроструктура катализатора, применяемого в процессах каталитического крекинга [18]

Еще одним основополагающим процессом нефтепереработки является гидрокрекинг. Увеличение значимости этого процесса связано с повышением доли перерабатываемой сернистой и высокосернистой нефти, что приводит к значительному увеличению количества оксидов серы, выбрасываемых в атмосферу. Гидрогенизационные процессы позволяют превращать сернистые соединения нефти в углеводороды и сероводород, направляемый на выработку элементарной серы или серной кислоты. В результате углеводороды, полученные с применением процесса гидрокрекинга, при сжигании выделяют в атмосферу гораздо меньшее количество вредных веществ [19].

Наряду с очисткой нефтепродуктов от соединений серы, процессы гидрокрекинга позволяют повысить степень переработки тяжелых фракций нефти, направляемых на получение в качестве основных продуктов керосиновой и дизельной фракций.

Промышленные катализаторы гидрокрекинга должны удовлетворять ряду требований, а именно иметь оптимальные текстурные характеристики для нанесения металлов, диффузии реагентов и продуктов; требуемую форму и размер гранул; высокую механическую прочность.

Гранулы современных катализаторов гидрокрекинга представляют собой экструдаты с поперечным сечением в форме круга, трилистника, симметричного или несимметричного четырехлистника с размером описанной окружности 1,2–2,0 мм. Форма и размер гранул катализатора обеспечивают требуемую прочность, минимальный перепад давления между входом и выходом из реактора, а также позволяют увеличить степень использования внутренней поверхности катализатора [20].

Наряду с мелкопористыми материалами, такими как цеолиты, в качестве носителей катализаторов разрабатывают ячеистые материалы с открытой пористостью (рис. 2). По сравнению с традиционными материалами перспективные высокопористые ячеистые носители обладают рядом конкурентных преимуществ: высокое значение коэффициента проницаемости (размер ячеек носителя можно варьировать от 0,5 до 5,0 мм); низкое гидравлическое сопротивление; большая внешняя (геометрическая) площадь поверхности, приводящая к высоким внешним скоростям массопереноса и отсутствию диффузионных ограничений (площадь поверхности – от 10 до 100 м²/г); высокая скорость теплопереноса (определяется природой носителя). На базе ПАО «Нижнекамскнефтехим» разработаны перспективные каталитические системы гидрокрекинга, при использовании которых из нефти Ашальчинского месторождения за проход удалось удалить до 30 % серы и снизить вязкость реакционной смеси в 70 раз за счет гидрирования части смол (15–18 %) в масляную фракцию [21].

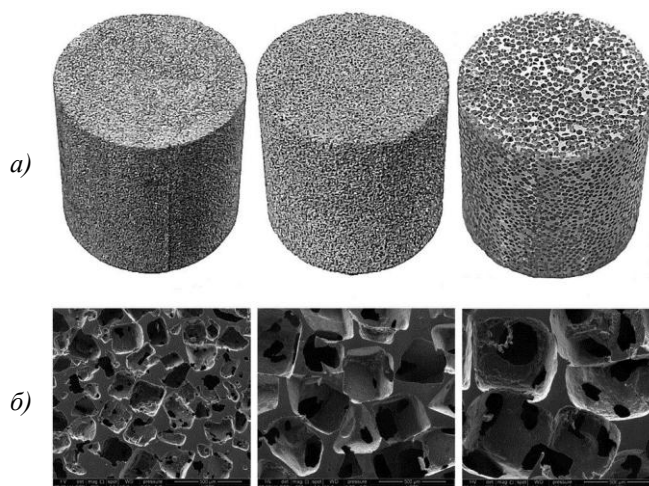


Рис. 2. Общий вид (а) и микроструктура (б) носителей катализаторов на основе высокопористых ячеистых материалов с различным размером пор [22]

Учитывая значительное повышение технологических показателей при использовании в качестве носителей катализаторов высокопористых ячеистых материалов, можно предположить, что применение волокнистых носителей будет иметь не меньший успех. Предпосылками успеха использования волокнистых материалов в процессах нефтепереработки могут служить: высокая удельная площадь поверхности, механическая прочность, возможность контроля структуры и размеров пор, применение в качестве носителя различных высокотемпературных оксидов и их смесей, возможность введения активных компонентов на стадии формирования носителя катализатора.

Материалы и методы

Перспективным носителем катализаторов процесса нефтехимической переработки может стать волокнистый пористый материал (ВПМ) на основе оксида алюминия [23, 24]. Исследуемый материал обладает высокой степенью анизотропии (рис. 3), плотностью ~350 кг/м³, прочностью при сжатии при 10%-ной деформации ~2,0 МПа.

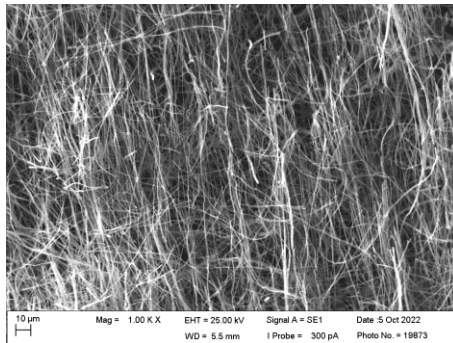


Рис. 3. Структура волокнистого пористого материала на основе оксида алюминия

Важным требованием для эффективной работы каталитических систем является равномерное заполнение катализатора реакционной смесью. Оценить внутреннюю структуру пористого материала и транспорт жидкости в пористую систему с высоко-развитой структурой позволяет метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), а конкретно – ЯМР-томография, или метод магнитно-резонансной томографии (МРТ).

Метод МРТ давно и успешно используется в медицине, однако для материаловедения существуют некоторые ограничения его применения, связанные с техническими сложностями. В последние годы наблюдается распространение метода МРТ в материаловедческих целях. Следует обозначить перспективу данного метода в изучении композиционных [25, 26] и пористых материалов [27–29], используемых в качестве теплозащиты, при производстве различных фильтров [30], в каталитических системах, в том числе ВПМ с пористостью до 90–95 % [31].

Образцы насыщали водой в стеклянной ампуле при температуре 22 ± 3 °С. Визуализацию процесса поглощения воды проводили с помощью ЯМР-спектрометра (резонансная частота для ядер ^1H составляет 200,13 МГц), оборудованного томографической приставкой, обеспечивающей максимальную амплитуду градиента магнитного поля 1 Тл/м (исследовательское оборудование Красноярского научного центра СО РАН).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Томографические изображения образца ВПМ, погруженного в воду на 2 ч, демонстрируют формирование внутренней области, заполненной водой, молекулы которой обладают высокой локальной подвижностью, сопоставимой с таковой у молекул воды в свободном пространстве. На рис. 4 представлены томограммы образца внутри ампулы с водой и после его извлечения из воды. Указано сечение томографического среза толщиной 1 мм (рис. 4, а) и 0,5 мм (рис. 4, б, в) относительно геометрических размеров образца. Можно видеть, что размеры области с адсорбированной водой ($6 \times 7 \times 9$ мм) существенно меньше габаритов самого образца. В периферийной части образца сигнал не фиксируется, что обусловлено отсутствием поглощенной воды. Изображения, записанные с помощью специальной методики, позволяющей визуализировать среды с коротким временем спин-спиновой релаксации ($T_2 < 1$ мс), подтвердили отсутствие даже малоподвижной (связанной с поверхностью волокон) воды, доступной для МРТ-фиксации.

Воспроизводимость характера движения фронта воды в ВПМ оценивали на тех же образцах после сушки в течение 100 ч при комнатной температуре.

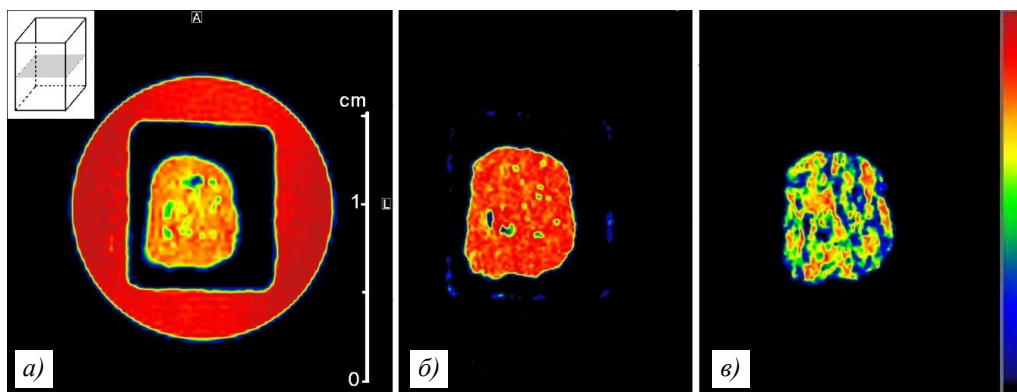


Рис. 4. Томограммы волокнистого пористого материала через 2 ч пребывания в воде (а), после извлечения из воды (б) и через 24 ч пребывания на открытом воздухе (в)

Повторение эксперимента (погружение высохшего образца в воду) приводит к идентичному характеру поглощения воды, протекающего за 5 мин. Вода проникает в тот же объем, что занимала при первичном поглощении. Более того, дальнейшее пребывание образца ВПМ в воде в течение 14 сут не меняет контура водосодержащей зоны, как это видно из рис. 5. Указано сечение томографического среза толщиной 1 мм относительно геометрических размеров образца. Кажущееся уменьшение сигнала в нижней части ампулы с образцом (рис. 5, а, б) вызвано ее геометрическим выходом за пределы радиочастотной катушки томографического датчика.

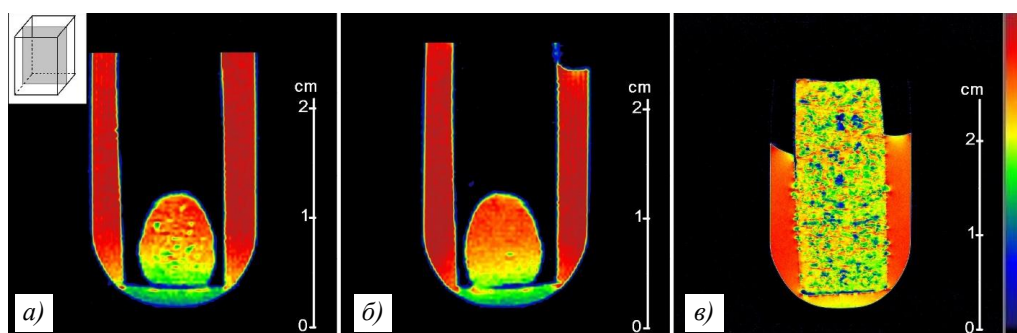


Рис. 5. Томограммы образца волокнистого пористого материала через 5 мин (а) и 14 сут (б) после повторного погружения в воду, а также образца, подвергнутого предварительному нагреванию (в)

Полученный результат свидетельствует о наличии у пористого образца эффекта «гигроскопической памяти», обуславливающей наличие зоны предпочтительного концентрирования поглощенной воды. По-видимому, в образце была сформирована пространственная структура из волокон оксидного материала, обладающая определенным сочетанием физико-химических свойств (смачиваемость поверхности волокон водой, локальные размеры порового пространства, диаметр капилляров и их связанность между собой и др.). Благодаря этому транспорт воды внутрь образца не соответствует классическим закономерностям, описывающим движение жидкостей в капиллярно-пористых телах под действием собственного капиллярного давления [32]. Таким образом, зона с сорбированной водой формируется только там, где присутствуют необходимые для этого параметры (нужное сочетание вязкости, поверхностного натяжения и краевого угла смачивания).

Ускоренное заполнение водой отмеченной области при повторном эксперименте объясняется тем, что поверхность периферийных волокон, по которым осуществлялся первичный транспорт в зону заполнения, сохраняет тонкий слой сорбированных

молекул воды, не фиксируемый из-за малой толщины. Он не исчезает при высыхании образца при комнатной температуре и при последующем контакте с водой способствует более быстрому транспорту воды и заполнению прежнего объема.

После дополнительного нагревания образца ВПМ в течение 2 ч при температуре 150 °С томограмма повторного поглощения воды коренным образом меняется (рис. 5, в): через 5 мин выдержки наблюдается пропитка всего образца, а не только отдельных зон. Можно утверждать, что нагревание полностью разрушает имевшуюся у образца «память» заполнения водой. Очевидно, что контролируемым нагреванием можно регулировать сорбционные свойства материала и характер сорбции воды, что открывает широкие возможности для управления проницаемостью и степенью насыщения ВПМ. Умение управлять характеристиками ВПМ делает такой материал перспективным носителем катализаторов.

Заключения

Рассмотрены типы и особенности катализаторов, применяемых в нефтеперерабатывающей промышленности, а также некоторые свойства ВПМ на основе оксида алюминия. С помощью метода МРТ показан характер заполнения пор материала водой, подтверждена воспроизводимость сорбционных характеристик ВПМ. Найдены параметры термической активации поверхности волокон, повышающие сорбционную емкость материала в ~3 раза. Обладая анизотропной структурой, высокой удельной поверхностью и приемлемыми механическими характеристиками, исследуемый материал претендует на роль носителя катализаторов в процессах нефтепереработки.

Благодарности

Авторы благодарят к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Красноярского научного центра СО РАН Морозова Е.В. за проведение МРТ-исследований сорбции воды высокопористым материалом и интерпретацию полученных результатов.

Список источников

1. Капустин В.М., Иванов А.В. Производство катализаторов для нефтепереработки и нефтехимии в России // *Neftegaz.RU*. 2023. № 9 (141). URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/importozameshchenie/795285-proizvodstvo-katalizatorov-dlya-neftepererabotki-i-neftekhimii-v-rossii> (дата обращения: 25.01.2025).
2. Абатаева А.У., Алангираева Х.Д. Импортозамещение – приоритетное направление развития катализаторной промышленности // *Вестник магистратуры. Химические науки*. 2022. № 10–3 (133). С. 8–11.
3. Обзор рынка катализаторов нефтепереработки в России и странах СНГ // *INFOMINE Research Group*. URL: https://infomine.ru/files/catalog/644/file_644_eng.pdf (дата обращения: 25.01.2025).
4. Нефтеперерабатывающие заводы России и стран СНГ: справочник. М.: ОМТ-Консалт, 2018. 155 с.
5. Каталог нефтеперерабатывающих и газоперерабатывающих заводов (НПЗ/ГПЗ). Объекты LNG проектов СНГ // *Energybase*. URL: <https://clck.ru/TKVdn> (дата обращения: 25.01.2025).
6. Носков А.С. Научно-технический уровень исследований и перспективы импортозамещения в области промышленных катализаторов // *Вестник Российской академии наук*. 2022. Т. 92. № 10. С. 940–949.
7. Леффлер У.Л. Переработка нефти. 2-е изд., пересмотр. Пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2004. 224 с.
8. Способ переработки бензинов термических процессов и катализатор для его осуществления: пат. 2469070 Рос. Федерация; заявл. 13.10.11; опубл. 10.12.12.
9. Бодрый А.Б., Рахматуллин Э.М., Илибаев Р.С., Гариева Г.Ф. О новых гранулированных катализаторах каталитического крекинга // *Катализ в промышленности*. 2014. № 5. С. 20.

10. Иванчина Э.Д., Ивашкина Е.Н., Назарова Г.Ю. и др. Разработка кинетической модели процесса каталитического крекинга // Катализ в промышленности. 2017. № 6. С. 477–486.
11. Чоркендорф И., Наймантсведрайт Х. Современный катализ и химическая кинетика. Пер. с англ. В.И. Ролдугина. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 500 с.
12. Стайлз Э.Б. Носители и нанесенные катализаторы. Теория и практика. М.: Химия, 1991. 240 с.
13. Рябов В.Д. Химия нефти и газа: учеб. для вузов. М.: «Техника» ГУМА ГРУПП, 2018. 288 с.
14. Солодова Н.Л., Терентьева Н.А. Современное состояние и тенденции развития каталитического крекинга нефтяного сырья // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 1. С. 141–147.
15. Гильмутдинов А.Т., Хисамова Л.З. Обзор современных катализаторов, используемых в процессах каталитического крекинга. Уфа: Уфимск. гос. нефтяной техн. ун-т, 2019. С. 11–13.
16. Седghi Р.Б.Ф., Капустин В.М., Герзелиев И.М., Третьяков В.Ф. Изучение влияния добавок ZSM-5 к катализаторам крекинга для повышения выхода легких олефинов и пропилена // Катализ в промышленности. 2012. № 6. С. 33–38.
17. Доронин В.П., Липин П.В. Перспективные разработки: катализаторы крекинга и добавки к ним // Катализ в промышленности. 2018. № 5. С. 82–87.
18. Технология переработки нефти и газа. Часть 1 // Tehnoinfo. URL: <http://www.tehnoinfo.ru/pererabotkanefiigaza/21.html> (дата обращения: 31.01.2025).
19. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа: учеб. пособие для вузов. Уфа: Гилем, 2002. 672 с.
20. Паркаш С. Справочник по переработке нефти. Пер. с англ. М.И. Фалькович / под ред. И.А. Беляева, В.Н. Линдина. М.: Премиум Инжиниринг, 2012. 759 с.
21. Ламберов А.А., Егорова С.Р. Промышленная реализация разработок из опыта сотрудничества с ПАО «НИЖНЕКАМСКНЕФТЕХИМ» // Катализ в промышленности. 2022. № 2. С. 76–86. DOI: 10.18412/1816-0387-2022-2-76-86.
22. Wang Zh., Gao J., Chang K. et al. Manufacturing of open-cell aluminum foams via infiltration casting in super-gravity fields and mechanical properties // RSC Advances. 2018. Vol. 8. P. 15933–15939. DOI: 10.1039/C7RA13689G.
23. Антипов В.В., Варрик Н.М., Максимов В.Г., Луговой А.А., Бабашов В.Г., Шавнев А.А. Изучение механических и термических характеристик пористого керамического материала на основе муллита // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-38-45.
24. Бабашов В.Г., Бутаков В.В., Колышев С.Г., Максимов В.Г. Исследование неравномерности прочностных свойств высокотемпературных теплоизоляционных материалов // Труды ВИАМ. 2021. № 6 (100). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-123-134.
25. Морозов Е.В., Коптюг И.В., Бузник В.М. ЯМР-томография как инструмент исследования и диагностики композиционных материалов и изделий на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S1. С. 17–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s1-17-29.
26. Авилова И.А., Бузник В.М., Волков В.И., Железина Г.Ф., Морозов Е.В., Раскутин А.Е., Фалалеев О.В. Исследования взаимодействия воды с полимерными композиционными материалами методом ядерного магнитного резонанса // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S1. С. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s1-30-36.
27. Koptug I.V. MRI of mass transport in porous media: Drying and sorption processes // Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. 2012. Vol. 65. P. 1–65. DOI: 10.1016/j.pnmrs.2011.12.001.
28. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-20200-0-2-41-49.

29. Kablov E.N., Babashov V.G., Balinova Y.A., Maksimov V.G. Phase transformations in a composite material with an organic matrix filled with zirconium dioxide fibers // *High Temperature*. 2021. Vol. 59. No. 1. P. 55–61.
30. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Пористая керамика для фильтрации расплавов металлов и горячих газов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
31. Морозов Е.В., Бузник В.М., Беспалов А.С., Гращенков Д.В. Магнитно-резонансная томография водопоглощения высокопористыми керамическими материалами // *Доклады академии наук*. 2019. Т. 484. № 5. С. 563–567. DOI: 10.31857/S0869-56524845563-567.
32. Sahimi M. *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock: From Classical Methods to Modern Approaches*. Second Edition. Wiley-VCH, 2011. 733 p. DOI: 10.1002/9783527636693.

References

1. Kapustin V.M., Ivanov A.V. Production of catalysts for oil refining and petrochemistry in Russia. *Neftegaz.RU*, 2023, no. 9 (141). Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/importozameshchenie/795285-proizvodstvo-katalizatorov-dlya-neftepererabotki-i-neftekhimii-v-rossii> (accessed: January 25, 2025).
2. Abatayeva A.U., Alangiraeva H.D. Import substitution is a priority direction for the development of the catalyst industry. *Vestnik magistratury. Khimicheskie nauki*, 2022, no. 10–3 (133), pp. 8–11.
3. *Review of the oil refining catalyst market in Russia and the CIS countries*. INFOMINE Research Group. Available at: https://infomine.ru/files/catalog/644/file_644_eng.pdf (accessed: January 25, 2025).
4. *Oil refineries of Russia and the CIS countries*: reference book. Moscow: OMT-Consult, 2018, 155 p.
5. Catalog of oil refineries and gas processing plants (OR/GPP). LNG projects facilities of the CIS. *Energybase*. Available at: <https://clck.ru/TKVdn> (accessed: January 25, 2025).
6. Noskov A.S. Scientific and technical level of researches and import substitution perspective in the field of industrial catalysts. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2022, vol. 92. no. 10. pp. 940–949.
7. Leffler W.L. *Oil refining*. 2nd ed., rev. trans. from Engl. Moscow: Olimp-Business, 2004, 224 p.
8. *Method for processing gasolines from thermal processes and a catalyst for its implementation*: pat. 2469070 Rus. Federation; appl. 13.10.11; publ. 10.12.12.
9. Bodryi A.B., Rakhmatullin E.M., Ilibaev R.S., Garieva G.F. On new granular catalysts for catalytic cracking. *Kataliz v promyshlennosti*, 2014, no. 5, p. 20.
10. Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Nazarova G.Yu. et al. Development of a kinetic model of the catalytic cracking process. *Kataliz v promyshlennosti*, 2017, no. 6, pp. 477–486.
11. Chorkendorff I., Naimantsvedreit H. *Modern Catalysis and Chemical Kinetics*. Trans. from Engl. Dolgoprudny: Intellect, 2010, 500 p.
12. Stiles E.B. *Carriers and Supported Catalysts. Theory and Practice*. Moscow: Khimiya, 1991, 240 p.
13. Ryabov V.D. *Chemistry of Oil and Gas: Textbook for Universities*. Moscow: «Tekhnika» GUMA GROUP, 2018, 288 p.
14. Solodova N.L., Terentyeva N.A. Current status and development trends of catalytic cracking of petroleum feedstocks. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 1, pp. 141–147.
15. Gilmutdinov A.T., Khisamova L.Z. *Review of modern catalysts used in catalytic cracking processes*. Ufa: Ufa State Petroleum Tech. Univ., 2019, pp. 11–13.
16. Sedghi R.B.F., Kapustin V.M., Gerzeliev I.M., Tretyakov V.F. Study of the effect of ZSM-5 additives to cracking catalysts to increase the yield of light olefins and propylene. *Kataliz v promyshlennosti*, 2012, no. 6, pp. 33–38.
17. Doronin V.P., Lipin P.V. Promising developments: cracking catalysts and additives to them. *Kataliz v promyshlennosti*, 2018, no. 5, pp. 82–87.
18. *Oil and gas processing technology*. *Tehnoinfa*. Available at: <http://www.tehnoinfa.ru/pererabotkanefitiigaza/21.html> (accessed: January 31, 2025).
19. Akhmetov S.A. *Technology of deep oil and gas processing*: textbook for universities. Ufa: Gilem, 2002, 672 p.

20. Parkash S. *Handbook of oil refining*. Trans. from Engl. Eds I.A. Belyaev, V.N. Lyndin. Moscow: Premium Inzhiniring, 2012, 759 p.
21. Lamberov A.A., Egorova S.R. Industrial implementation of developments from the experience of cooperation with PJSC NIZHNEKAMSKNEFTEKHIM. *Kataliz v promyshlennosti*, 2022, no. 2, pp. 76–86. DOI: 10.18412/1816-0387-2022-2-76-86.
22. Wang Zh., Gao J., Chang K. et al. Manufacturing of open-cell aluminum foams via infiltration casting in super-gravity fields and mechanical properties. *RSC Advances*, 2018, vol. 8, pp. 15933–15939. DOI: 10.1039/C7RA13689G.
23. Antipov V.V., Varrik N.M., Maksimov V.G., Lugovoy A.A., Babashov V.G., Shavnev A.A. Study of mechanical and thermal characteristics of a porous ceramic material based on mullite. *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-38-45.
24. Babashov V.G., Butakov V.V., Kolyshev S.G., Maksimov V.G. Research of the unevenness of distribution of the strength properties of high-temperature thermal insulation materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 6 (100), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-123-134.
25. Morozov E.V., Koptuyug I.V., Bouzник V.M. NMR Imaging as an instrument for study and diagnostics of composite materials and articles on their base. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S1, pp. 17–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s1-17-29.
26. Avilova I.A., Bouzник V.M., Volkov V.I., Zhelezina G.F., Morozov E.V., Raskutin A.E., Falaleev O.V. Study of interaction of polymer composite materials with water using nuclear magnetic resonance methods. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S1, pp. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s1-30-36.
27. Koptuyug I.V. MRI of mass transport in porous media: Drying and sorption processes. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 2012, vol. 65, pp. 1–65. DOI: 10.1016/j.pnmrs.2011.12.001.
28. Kablov E.N., Shuldeshov E.M., Petrova A.P., Lapteva M.A., Sorokin A.E. Dependence of complex of sound-proof VZMK type material properties on concentration of hydrophobizing composition on the basis of organosilicon sealant. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-20200-0-2-41-49.
29. Kablov E.N., Babashov V.G., Balinova Y.A., Maksimov V.G. Phase transformations in a composite material with an organic matrix filled with zirconium dioxide fibers. *High Temperature*, 2021, vol. 59, no. 1, pp. 55–61.
30. Babashov V.G., Varrik N.M., Karaseva T.A. Porous ceramic for filtration of metal melts and hot gases (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 6. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
31. Morozov E.V., Buznik V.M., Bespalov A.S., Grashchenkov D.V. Magnetic resonance imaging of water absorption by highly porous ceramic materials. *Doklady akademii nauk*, 2019, vol. 484, no. 5, pp. 563–567. DOI: 10.31857/S0869-56524845563-567.
32. Sahimi M. *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock: From Classical Methods to Modern Approaches*. Second Edition. Wiley-VCH, 2011, 733 p. DOI: 10.1002/9783527636693.

Информация об авторах

Беспалов Александр Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Истомин Александр Васильевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander S. Bespalov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Istomin, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; получена после доработки 11.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.03.2025.
The article was submitted 03.03.2025; received in revised form 11.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 20.03.2025.