

Научная статья

УДК 666.3-1

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-108-117

НОСИТЕЛИ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А.С. Беспалов¹

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

Аннотация. Рассмотрены способы получения и основные направления применения носителей гетерогенных катализаторов на основе оксида алюминия. Предложены некоторые аспекты применения высокопористых керамических материалов на основе оксидных волокон, раскрывающие их перспективность в качестве носителей катализаторов и каталитически активных веществ. Показана высокая эффективность применения катализаторов на носителях из таких материалов в перспективных процессах получения синтез-газа методами кислородной и углекислотной конверсии метана.

Ключевые слова: волокнистый высокопористый керамический материал, волокна оксида алюминия, гамма-фаза, катализатор, носитель катализаторов, конверсия

Для цитирования: Беспалов А.С. Носители катализаторов на основе оксида алюминия // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 108–117. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-108-117.

Scientific article

ALUMINUM OXIDE-BASED CATALYST CARRIERS

A.S. Bepalov¹

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

Abstract. Methods of preparation and main directions of application of carriers of heterogeneous catalysts based on aluminum oxide are considered. Some aspects of the use of highly porous ceramic materials based on oxide fibers are shown, revealing the prospects of using this class of material as carriers of catalysts and catalytically active substances. The high efficiency of using catalysts on carriers made of such materials in promising processes for producing synthesis gas from oxygen and carbon dioxide conversions of methane is shown.

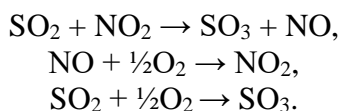
Keywords: fibrous high-porous ceramic material, alumina fibers, gamma phase, catalyst, catalyst carrier, conversion

For citation: Bepalov A.S. Aluminum oxide-based catalyst carriers. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 108–117. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-108-117.

Введение

Практически 90 % всех химических процессов в различных сферах промышленности, таких как химическая, нефтехимическая, пищевая, фармацевтическая, металлургическая, строительная и др., не обходятся без применения катализаторов. Существует обширная номенклатура катализаторов, необходимых для конкретных реакций технологических процессов.

Катализаторы подразделяют на два типа (гетерогенные и гомогенные) в зависимости от агрегатного состояния катализатора и самого реагента. К гомогенным относят те, которые находятся в одной и той же фазе с реагирующими веществами. Например, газофазное окисление сернистого ангидрида до серного происходит в присутствии диоксида азота по реакции, открытой учеными Н. Клеманом и Ш. Дезормом:



В случае разных фазовых состояний реагента и катализатора имеет место гетерогенный катализ. Как правило, гетерогенный катализатор является твердым веществом, а реагенты находятся в газообразном или жидком состоянии. При этом ускоренная реакция происходит на его поверхности, что может указывать на незначительный расход каталитически активного вещества на единицу массы реагента.

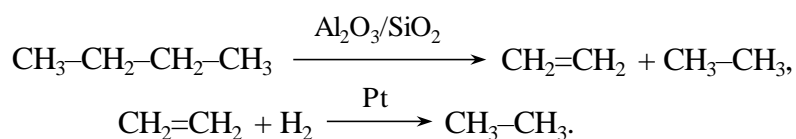
Значительную часть гетерогенных каталитически активных веществ занимают благородные металлы (например, платина и палладий), никель, переходные металлы VIII группы, а также их соединения (например, их оксиды и комплексные соединения), твердые кислоты.

К гетерогенным катализаторам предъявляют следующие требования: высокая механическая прочность, предотвращающая измельчение под действием потока реагента и унос из реактора; высокая концентрация активных центров в единице объема (или массы) катализатора, позволяющая уменьшить загрузку реактора; химическая стойкость и экономическая составляющая.

Как правило, с целью увеличения концентрации активных центров катализаторов, стабилизации их частиц для предотвращения агломерации и спекания, а также многократного уменьшения загрузки катализатора применяются так называемые подложки – носители катализаторов. К основным требованиям к носителям можно отнести химическую инертность, высокую механическую прочность и удельную поверхность, пористость и стабильность работы в условиях протекания реакции (включая высокие температуры) [1].

На протяжении многих десятилетий ученые пытаются объяснить различия в свойствах катализаторов, нанесенных, например, на подложки на основе оксида алюминия или оксида кремния. Тот факт, что разные типы носителя отличаются параметрами решетки или кристаллической структурой, дает основание полагать, что эпитаксия – главный фактор, определяющий свойства катализатора, хотя во многих случаях ее трудно обнаружить доступными методами исследования поверхностей. Каталитические свойства нанесенного на носитель вещества при эпитаксии изменяются, что приводит к большей лабильности соединений [2].

В настоящее время в промышленности, в частности в нефтеперерабатывающей отрасли, большинство катализаторов наносят на высокопористый носитель на основе оксида алюминия. Следует отметить, что для некоторых реакций носитель на основе оксида алюминия или алюмосиликата выступает в качестве каталитически активного вещества. Так, например, получение этана из бутана возможно в двухстадийном процессе:



При этом возможно проведение реакции в одну стадию при использовании катализатора Pt на носителе $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$.

В настоящее время в России применяют в основном импортные катализаторы, зависимость от импорта довольно высокая [3]. Однако уже существуют тенденции к расширению производственных мощностей с целью импортозамещения, а крупнейшие нефтеперерабатывающие заводы начинают отказываться от импортного сырья. Правительство и инвесторы уделяют значительное внимание развитию научных и производственных предприятий, деятельность которых направлена на изучение и выпуск особо важных катализаторов и их носителей. В стране насчитывается несколько крупных производителей каталитических систем, а также перерабатывающих производств, среди которых следует отметить АО «СКТБ «Катализатор», АО «Ангарский завод катализаторов и органического синтеза», ООО «Салаватский катализаторный завод», АО «Промышленные катализаторы», ООО «НИАП-Катализатор», ЗАО «Редкинский катализаторный завод», ООО «Стерлитамакский завод катализаторов», ООО «Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов», ООО «Новокуйбышевский завод катализаторов», АО «Газпромнефть-ОНПЗ», ЗАО «Нижегородские сорбенты» и др. [4–6]. Однако данные промышленные мощности способны лишь частично закрыть потребность нефтедобывающих и перерабатывающих заводов [7].

Наиболее распространенным методом получения носителя на основе оксида алюминия является переосаждение. В качестве исходных компонентов применяются гиббсит или алюминатные растворы глиноземного производства. Запатентовано множество способов получения гидроксида алюминия бемитной и псевдобемитной фаз, представляющих наибольший интерес для изготовления носителей катализаторов и сорбентов [8]. Как правило, для формования носителей катализаторов применяют экструзию алюмогелей, когда порошок гидроксида алюминия смешивают с водой, пептизирующим агентом (например, азотная или уксусная кислота) и зачастую пластификатором (например, поливиниловый спирт). Данный состав обеспечивает необходимые реологические характеристики и псевдопластичное состояние. Такую пасту экструдуют, как правило, в виде цилиндров диаметром от одного до нескольких миллиметров либо в виде других форм, обусловленных особенностями конкретных технологических процессов и конструкцией реакторов [9], затем сушат и прокаливают.

Оксид алюминия существует как в метастабильных состояниях (фазы χ , κ , η , θ , γ , δ), зависящих от природы исходного компонента (гиббсит, бемит, байерит, диаспор), так и в стабильной α -фазе (корунд), которая является конечным продуктом дегидратации предшественников. Схематически данные превращения представлены на рис. 1.

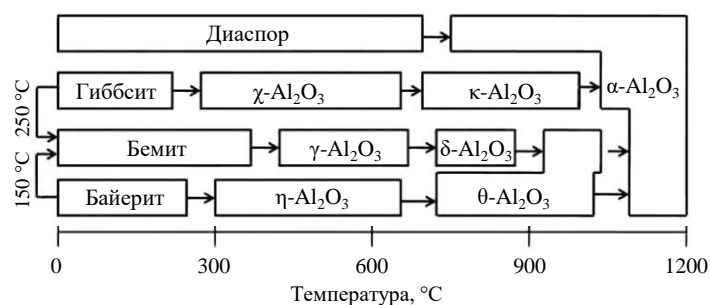


Рис. 1. Схематическое изображение фазовых переходов гидроксидов и оксидов алюминия в корунд при термической обработке [10]

В зависимости от фазового состояния, кристаллического строения (шпинельный тип структуры для фаз η , θ , γ и δ , гексагональный – для фаз χ и κ) и морфологии оксид алюминия характеризуется различной активностью и количеством кислотных центров Льюиса [11, 12].

Оксид алюминия в качестве носителя катализаторов востребован в первую очередь в процессах гидрогенизации, таких как гидрокрекинг, гидрориформинг, гидроочистка и др., проходящих под давлением в атмосфере водорода [13]. Перспективно получение на его основе эффективных кислотных катализаторов изомеризации н-бутана в среде водорода [14], для разложения природного полисахарида ксилана с максимальным выходом целевого продукта [15] и др.

Зачастую применение в качестве носителя чистого оксида алюминия может привести к нежелательным последствиям. Так, например, в случае применения платины в нейтрализаторах дымовых выбросов, работающих при высоких температурах (до 800 °С), может произойти негативный эффект – подвижный ион металла может мигрировать в объем оксида алюминия и, как следствие, стать каталитически недоступным. Решить данную проблему возможно путем взаимодействия оксида алюминия с оксидами других элементов для формирования более плотной элементарной ячейки в сравнении со всеми фазами Al_2O_3 . Катализатор на алюмомагниево-шпинели способен работать при более высоких температурах, а оксиды кобальта, никеля, меди и церия обладают каталитическими свойствами, помимо способности образовывать плотные кристаллы с оксидом алюминия [16].

Материалы и методы

Помимо модификации подложек на основе оксида алюминия другими оксидами, возможно создание носителей катализаторов заданного химического состава. Специалисты НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ обладают значительными компетенциями и опытом разработки волокон тугоплавких оксидов заданного химического состава и микроструктуры, включая фазовый состав, а также высокопористых керамических материалов (ВПКМ) на их основе [17–20] в виде гибких матов или жестких плит необходимых геометрических размеров. По совокупности физико-механических свойств и морфологического строения ВПКМ отвечают основным требованиям, предъявляемым к носителям гетерогенных катализаторов: топология пор обеспечивает хороший контакт и проток газообразных и жидких реагентов, а химический и фазовый составы – необходимую термическую стойкость [21], высокая удельная поверхность позволит уменьшить расход катализатора на единицу объема загрузки реактора. Все это в совокупности позволяет рассматривать ВПКМ на основе оксидных волокон как перспективные носители гетерогенных катализаторов.

Процесс Фишера–Тропша – химическая реакция, при которой смесь монооксида углерода CO и водорода H_2 (синтез-газ) преобразуется в жидкие углеводороды с последующим их превращением в экологически чистые моторные топлива. Интерес к данному синтезу как ученых, так и производителей вызван в первую очередь огромными запасами природного газа на территории нашей страны. Наиболее распространенным в промышленности процессом получения синтез-газа, в частности водорода товарного качества, является паровая конверсия метана [22]. Перспективными процессами, способными составить конкуренцию паровой конверсии, являются кислородная (ККМ) и углекислотная (УКМ) конверсии метана. Процесс ККМ является эндотермическим, требует значительно меньшее количество энергии и позволяет получать синтез-газ с соотношением $H_2/CO = 2$. В процессе УКМ изготавливают синтез-газ с соотношением $H_2/CO = 1$. Следует отметить, что в качестве исходного компонента данного процесса можно использовать возобновляемое сырье.

Как правило, исследования каталитической активности систем в различных реакциях основываются не только на теоретических, но и на статистических опытных данных и подбираются методом проб и ошибок. С учетом значительного опыта в области гетерогенного катализа ученые из Российского государственного университета

нефти и газа им. И.М. Губкина предложили определенные типы веществ, катализирующих процессы получения синтез-газа [23, 24], для апробации ВПКМ на основе волокон Al_2O_3/SiO_2 и SiO_2 в качестве их носителей.

К числу других перспективных химических процессов, происходящих в присутствии катализаторов, относятся одностадийное получение этилена из метана (реакция окислительной димеризации метана) [25] и переработка возобновляемого сырья (растительных масел) в компоненты моторных топлив [26] и спиртов (изобутанола) в олефины C_2-C_5 [27].

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

Результаты и обсуждение

В таблице приведены системы с применением ВПКМ в качестве подложек и самостоятельных катализаторов, показавшие положительные результаты [28].

Результаты испытаний каталитической активности катализаторов с применением высокопористых керамических материалов в качестве подложек и самостоятельных катализаторов

Каталитический центр	Тип реакции	Температура процесса, °С	Конверсия, %	Селективность, %
$NdNi_{0,5}Co_{0,5}O_3$	Кислородная конверсия метана	800–990	99–100	99–100
	Углекислотная конверсия метана	780–930	99–100	99–100
$Li_2WO_4 + MnCl_2$	Окислительная димеризация метана	800–990	57	17
Высокопористый керамический материал	Конверсия изобутанола	340–400	100	67
	Гидроконверсия рапсового масла	600	100	64

Процессы проводили в реакторе проточного типа с подводом тепла извне. Состав продуктов анализировали методом газожидкостной хроматографии [29].

Согласно данным таблицы, катализаторы на носителях из ВПКМ обеспечивают полноту превращения метана в синтез-газ, что открывает широкие возможности для их практического применения. Важным аспектом является низкая кажущаяся плотность данных носителей. При прочих характеристиках, схожих с показателями широко применяемых аналогичных носителей, это позволит в несколько раз уменьшить расход катализатора при одинаковом объеме загрузки реактора.

Следует отметить, что применение ВПКМ в качестве каталитически активных веществ также показало положительный результат.

Еще одним типом каталитических центров, подобранных для практического выявления возможности применения ВПКМ в качестве носителя, стали клатрохелаты – клеточные комплексы с ионом металла, инкапсулированного в трехмерной полости макрополициклического лиганда [27], в частности клатрохелатные комплексы *d*-металлов (Fe, Co и Ru). Полученные комплексы иммобилизованы на гидроксильной поверхности тугоплавких керамических волокон ВПКМ. Иммобилизация возможна благодаря наличию терминальных реакционноспособных и полярных групп в молекулах клатрохелатных комплексов железа, рутения и кобальта (рис. 2).

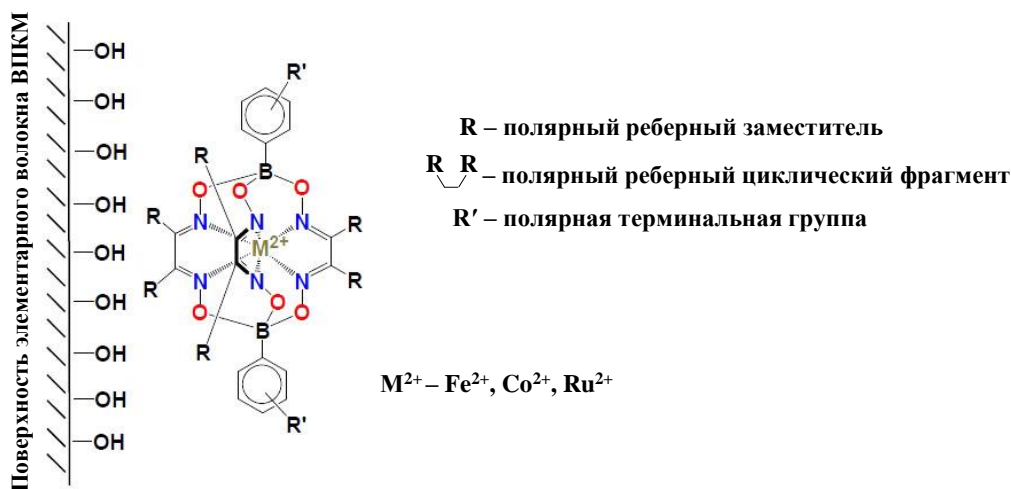


Рис. 2. Схематическое изображение нанесения клатрохелатных комплексов *d*-металлов на поверхность элементарных волокон высокопористого керамического материала (ВПКМ)

Раствор клатрохелатных комплексов в хлористом метиле, интенсивно окрашенных в видимой области, свободно проникает в ВПКМ на основе оксидных волокон с высокой лиофильностью путем самодиффузии. В процессе удаления растворителя и сушки происходит иммобилизация каталитических центров на поверхность элементарных волокон во всем его объеме. При последующей промывке небольшим количеством хлористого этилена происходило удаление не иммобилизованного на поверхность волокна избыточного количества комплексов, наблюдаемое визуально.

Рутенийсодержащий катализатор на основе матрицы ВПКМ не проявил активности в реакции ККМ, но оказался активным и селективным катализатором УКМ в синтез-газ. При использовании данного катализатора при температуре процесса 900 °С в потоке эквимолярной смеси CO₂ и метана выход CO и H₂ составил 95 % в пересчете на суммарное количество поданных CH₄ и CO₂. Таким образом, иммобилизация на носителе ВПКМ клатрохелатного комплекса рутения позволила получить активный и селективный катализатор превращения смеси метана и CO₂ в синтез-газ с соотношением H₂/CO = 1.

Применение катализаторов на основе клатрохелатсодержащих материалов для УКМ может минимизировать основной недостаток процесса – сильное зауглероживание, снижающее их производительность и ресурс использования. Применение комплексов также обеспечивает протекание каталитического процесса получения синтез-газа с высокой активностью за счет одного атома такого дорогостоящего металла, как рутений, изолированного матрицей из продуктов превращения клатрохелатного лиганда [27].

Заключения

Рассмотрены типы и особенности носителей катализаторов, применяемых в нефтеперерабатывающей промышленности, а также перспективы применения ВПКМ на основе волокон Al₂O₃/SiO₂ и SiO₂ в качестве как носителей катализаторов, так и самостоятельных каталитически активных веществ.

Благодарности

Автор благодарит академика РАН, д.х.н. В.М. Бузника за научное руководство и активный вклад в продвижение совместных работ научно-исследовательских институтов, академика РАН, д.х.н. А.Г. Дедова, чл.-корр. РАН, д.х.н. Я.З. Волошина и д.х.н., профессора А.С. Локтева за проведенные исследования и интерпретацию полученных результатов.

Список источников

1. Леффлер У.Л. Переработка нефти. 2-е изд., пересмотр. Пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2004. 224 с.
2. Stiles A.B. Catalyst supports and supported catalysts. Theoretical and applied concepts. Boston: Butterworths publishers, 1987. 270 p. DOI: 10.1002/aic.690340129.
3. Капустин В.М., Иванов А.В. Производство катализаторов для нефтепереработки и нефтехимии в России // Neftegaz.RU. 2023. № 9 (141). С. 18. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/importozameshchenie/795285-proizvodstvo-katalizatorov-dlya-neftepererabotki-i-neftekhimii-v-rossii>/Научная статья (дата обращения: 01.11.2025).
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: 01.11.2025).
6. Носков А.С. Научно-технический уровень исследований и перспективы импортозамещения в области промышленных катализаторов // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 10. С. 940–949.
7. Беспалов А.С., Истомин А.В. Рассмотрение особенностей высокопористых материалов для применения в качестве носителей каталитически активных веществ // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). С. 96–105 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-96-105.
8. Дзисько В.А., Иванова А.С. Основные методы получения активного оксида алюминия // Известия СО АН СССР. Сер. химических наук. 1985. № 15. С. 110–119.
9. Рябов В.Д. Химия нефти и газа: учеб. для вузов. М.: Изд-во «Техника» ГУМА ГРУПП, 2018. 288 с.
10. Ptáček P. Strontium Aluminate – Cement Fundamentals, Manufacturing, Hydration, Setting Behaviour and Applications. Rijeka: In Tech, 2014. 350 p.
11. Digne M., Raybaud P., Sautet P. et al. Atomic scale insights on chlorinated alumina surfaces // Journal of the American Chemical Society. 2008. Vol. 130. P. 11030–11039.
12. Боруцкий П.Н. Каталитические процессы получения углеводородов разветвленного строения. СПб.: Профессионал, 2010. 724 с.
13. Князев А.В., Лавров Б.А. Современные технологии производства алюмогидроксидного сырья для носителей катализаторов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета). 2021. № 59 (84). С. 37–46. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-37-46.
14. Тагандурдыева Н., Нараев В.Н., Постнов А.Ю., Мальцева Н.В. Получение алюмооксидного носителя катализатора изомеризации углеводородов регидратацией продуктов термической активации гиббсита // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета). 2018. № 46 (72). С. 16–21.
15. Тамбасова Д.П., Любякина П.Н., Антонов Д.О., Ковалева Е.Г. Гетерогенные катализаторы на основе гамма оксида алюминия с иммобилизованной ксиланазой для гидролитического разложения ксилана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Пищевые и биотехнологии. 2021. Т. 9. № 1. С. 57–67. DOI: 10.14529/food210107.
16. Chan S.S., Wachs I.E., Murrell L.L. et al. Laser Raman characterization of tungsten oxide supported on alumina: influence of calcination temperatures // Journal of Catalysis. 1985. Vol. 92. Is. 1. P. 1–10. DOI: 10.1016/0021-9517(85)90231-3.
17. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
18. Саврицкий А.Н., Мараховский П.С., Салимов И.Э., Бабашов В.Г. Исследование зависимости теплопроводности от плотности низкоплотного теплозвукоизоляционного материала на основе стеклянных волокон // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3 (80). С. 149–160. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-149-160.

19. Суджанская И.В., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л., Щеголева Н.Е. Параметры, влияющие на ионную проводимость твердых электролитов на основе диоксида церия // Труды ВИАМ. 2025. № 1 (143). С. 60–73. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-60-73.
20. Беспалов А.С., Салимов И.Э., Юдин А.В. Придание высоких гидрофобных свойств высокопористому керамическому материалу низкоконцентрированными растворами фторпарафина в среде сверхкритического диоксида углерода // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). С. 39–48. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 27.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.
21. Бузник В.М., Бабашов В.Г., Беспалов А.С. и др. Фундаментальные исследования для совершенствования и расширения областей применения высокопористых керамических материалов // Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года: Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. (г. Москва, 28 июня 2019 г.). М., 2019. С. 18–39.
22. Арутюнов В.С., Крылов О.В. Органическая химия: окислительные превращения метана: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2017. 371 с.
23. Rodrigues L.M.T.S., Silva R.B., Rocha M.G.C. et al. Partial oxidation of methane on Ni and Pd catalysts: influence of active phase and CeO₂ modification // *Catalysis Today*. 2012. Vol. 197 (1). P. 137–143.
24. Zeng S., Zhang X., Fu X. et al. Co/Ce_xZr_{1-x}O₂ solid-solution catalysts with cubic fluorite structure for carbon dioxide reforming of methane // *Applied Catalysis B*. 2013. Vol. 136–137. P. 308–316. DOI: 10.1016/j.apcatb.2013.02.019.
25. Chalupka K.A., Jozwiak W.K., Rynkowski J. et al. Partial oxidation of methane on Ni_xAlBEA and Ni_xSiBEA zeolite catalysts: Remarkable effect of preparation procedure and Ni content // *Applied Catalysis B*. 2014. Vol. 146. P. 227–236.
26. Исаева Е.А., Локтев А.С., Мухин И.Е., Беспалов А.С., Бузник В.М., Дедов А.Г. Новые катализаторы на основе высокопористых керамических материалов для переработки газового и возобновляемого сырья в продукты нефтехимии // Сб. тез. 14-й конф. «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики». Черноголовка, 2018. С. 105.
27. Voloshin Y.Z., Belaya I.G., Krämer R. Cage metal complexes: clathrochelates revisited. Heidelberg: Springer, 2017. 467 p. DOI: 10.1007/978-3-319-56420-3.
28. Dedov A.G., Voloshin Y.Z., Loktev A.S., Buznik V.M., Belov A.S., Bepalov A.S. New heterogeneous catalytic system based on highly porous ceramic materials modified with immobilized *d*-metal cage complexes for H₂ production from CH₄ // *Mendelevov Communications*. 2019. Vol. 29. No. 6. P. 669–671. DOI: 10.1016/j.mencom.2019.11.022.
29. Дедов А.Г., Локтев А.С., Иванов В.К. и др. Селективное окисление метана в синтезгаз: катализаторы на основе кобальта и никеля // Доклады академии наук. 2015. Т. 461. № 4. С. 426–432.

References

1. Leffler W.L. *Oil refining*. 2nd ed., rev. trans. from Engl. Moscow: Olimp-Biznes, 2004, 224 p.
2. Stiles A.B. *Catalyst supports and supported catalysts. Theoretical and applied concepts*. Boston: Butterworths publishers, 1987, 270 p. DOI: 10.1002/aic.690340129.
3. Kapustin V.M., Ivanov A.V. Production of catalysts for oil refining and petrochemistry in Russia. *Neftegaz.RU*, 2023, no. 9 (141), p. 18. Available at: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/importozameshchenie/795285-proizvodstvo-katalizatorov-dlya-neftepererabotki-i-neftekhimii-v-rossii>/Научная статья (accessed: November 01, 2025).
4. *Oil refineries of Russia and the CIS countries: a reference book*. Moscow: OMT-Konsalt, 2018, 155 p.
5. *Catalog of oil refineries and gas processing plants (ORPs/GPPs). CIS LNG project facilities*. Available at: <https://clck.ru/TKVdn> (accessed: November 01, 2025).
6. Noskov A.S. Scientific and technical level of research and prospects for import substitution in the field of industrial catalysts. *Vestnik RAN*, 2022, vol. 92, no. 10, pp. 940–949.

7. Bepalov A.S., Istomin A.V. Features of high-porous materials for use as carriers of catalytically active substances. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), pp. 96–105. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-96-105.
8. Dzisko V.A., Ivanova A.S. Basic methods for obtaining active aluminum oxide. *Izvestiya SO AN SSSR. Ser.: Chemical Sciences*, 1985, no. 15, pp. 110–119.
9. Ryabov V.D. *Chemistry of Oil and Gas: Textbook for Univ.* Moscow: Publ. House «Tekhnika» GUMA GRUPP, 2018, 288 p.
10. Ptáček P. *Strontium Aluminate – Cement Fundamentals, Manufacturing, Hydration, Setting Behaviour and Applications*. Rijeka: In Tech, 2014. 350 p.
11. Digne M., Raybaud P., Sautet P. et al. Atomic scale insights on chlorinated alumina surfaces. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, vol. 130, pp. 11030–11039.
12. Borutskiy P.N. *Catalytic processes for producing branched hydrocarbons*. St. Petersburg: Professional, 2010, 724 p.
13. Knyazev A.V., Lavrov B.A. Modern technologies for the production of aluminum hydroxide raw materials for catalyst supports. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (Tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, no. 59 (84), pp. 37–46. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-37-46.
14. Tagandurdyeva N., Narayev V.N., Postnov A.Yu., Maltseva N.V. Preparation of an alumina support for a hydrocarbon isomerization catalyst by rehydration of gibbsite thermal activation products. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (Tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 46 (72), pp. 16–21.
15. Tambasova D.P., Lyubyakina P.N., Antonov D.O., Kovaleva E.G. Heterogeneous catalysts based on gamma-alumina with immobilized xylanase for the hydrolytic decomposition of xylan. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Food and Biotechnology*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 57–67. DOI: 10.14529/food210107.
16. Chan S.S., Wachs I.E., Murrell L.L. et al. Laser Raman characterization of tungsten oxide supported on alumina: influence of calcination temperatures. *Journal of Catalysis*, 1985, vol. 92, is. 1, pp. 1–10. DOI: 10.1016/0021-9517(85)90231-3.
17. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
18. Savritskiy A.N., Marakhovskiy P.S., Salimov I.E., Babashov V.G. Examination of the dependence of thermal conductivity on the density of a low-density thermal and sound insulation material based on glass fibers. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 149–160. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-149-160.
19. Sudzhanskaya I.V., Lebedeva Yu.E., Vaganova M.L., Shchegoleva N.E. Parameters affecting on the ionic conductivity of solid electrolytes based on cerium dioxide. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 60–73. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-60-73.
20. Bepalov A.S., Salimov I.E., Yudin A.V. Imparting highly hydrophobic properties to a high-porous ceramic material with low-concentration solutions of fluoroparaffin in a supercritical carbon dioxide environment. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 39–48. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 27, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.
21. Buznik V.M., Babashov V.G., Bepalov A.S. et al. Fundamental Research to Improve and Expand the Application Areas of Highly Porous Ceramic Materials. *The Role of Fundamental Research in the Implementation of Strategic Directions for the Development of Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030: Proc. of the V All-Rus. Sci. and Tech. Conf. Moscow*, 2019, pp. 18–39.

22. Arutyunov V.S., Krylov O.V. *Organic Chemistry: Oxidative Transformations of Methane: A Textbook for Univ.* 2nd ed., cor. and rev. Moscow: Yurait, 2017, 371 p.
23. Rodrigues L.M.T.S., Silva R.B., Rocha M.G.C. et al. Partial oxidation of methane on Ni and Pd catalysts: influence of active phase and CeO₂ modification. *Catalysis Today*, 2012, vol. 197 (1), pp. 137–143.
24. Zeng S., Zhang X., Fu X. et al. Co/Ce_xZr_{1-x}O₂ solid-solution catalysts with cubic fluorite structure for carbon dioxide reforming of methane. *Applied Catalysis B*, 2013, vol. 136–137, pp. 308–316. DOI: 10.1016/j.apcatb.2013.02.019.
25. Chalupka K.A., Jozwiak W.K., Rynkowski J. et al. Partial oxidation of methane on Ni_xAlBEA and Ni_xSiBEA zeolite catalysts: Remarkable effect of preparation procedure and Ni content. *Applied Catalysis B*, 2014, vol. 146, pp. 227–236.
26. Isaeva E.A., Loktev A.S., Mukhin I.E., Bespalov A.S., Buznik V.M., Dedov A.G. New catalysts based on highly porous ceramic materials for processing gas and renewable raw materials in chemical oil refining products. *Abstracts of 14th conf. «Physicochemical problems of renewable energy»*. Chernogolovka, 2018, p. 105.
27. Voloshin Y.Z., Belaya I.G., Krämer R. *Cage metal complexes: clathrochelates revisited*. Heidelberg: Springer, 2017, 467 p. DOI: 10.1007/978-3-319-56420-3.
28. Dedov A.G., Voloshin Y.Z., Loktev A.S., Buznik V.M., Belov A.S., Bespalov A.S. New heterogeneous catalytic system based on highly porous ceramic materials modified with immobilized *d*-metal cage complexes for H₂ production from CH₄. *Mendeleev Communications*, 2019, vol. 29, no. 6, pp. 669–671. DOI: 10.1016/j.mencom.2019.11.022.
29. Dedov A.G., Loktev A.S., Ivanov V.K. et al. Selective oxidation of methane into syngas: catalysts based on cobalt and nickel. *Doklady akademii nauk*, 2015, vol. 461, no. 4, pp. 426–432.

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 11.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.02.2026.
The article was submitted 11.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 05.02.2026.