

Научная статья
УДК 666.3-127.2
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.026

ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫЕ БЛОЧНО-ЯЧЕИСТЫЕ КОНТАКТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ СОРБЦИОННО-КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ СРЕД ОТ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

Микаэл Давидович Гаспарян¹, Владимир Николаевич Грунский², Алексей Игоревич Дубко³, Ольга Юрьевна Сальникова⁴, Евгений Олегович Обухов⁵, Алла Дмитриевна Александрова⁶

^{1–6}Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия

¹gasparian.m.d@muctr.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований по синтезу и применению керамических высокопористых контактных элементов ячеистой структуры на высокотемпературных переделах переработки облученного ядерного топлива для локализации летучих продуктов деления и нейтрализации оксидов азота. Определены их оптимальные составы и структурно-физические характеристики. Приведены значения: динамической сорбционной емкости по Cs_2O , MoO_3 , TeO_2 и I_2 для сорбентов и степени конверсии по NO_x для катализаторов.

Ключевые слова:

контактные элементы, высокопористые ячеистые материалы, хемосорбция, эффективность улавливания, сорбционная емкость, каталитическая активность, степень конверсии

Благодарности:

работа выполнена в рамках и при поддержке проектного направления «Прорыв» государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Для цитирования:

Полифункциональные керамические высокопористые блочно-ячеистые контактные элементы для сорбционно-каталитической очистки газовых сред от вредных веществ / М. Д. Гаспарян [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 156–163. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.026.

Original article

POLYFUNCTIONAL CERAMIC HIGH-POROUS BLOCK-CELL CONTACT ELEMENTS FOR SORPTION-CATALYTIC PURIFICATION OF GAS ENVIRONMENTS FROM HARMFUL SUBSTANCES

Mikael D. Gasparyan¹, Vladimir N. Grunsky², Alexey I. Dubko³, Olga Yu. Salnikova⁴, Evgeny O. Obukhov⁵, Alla D. Alexandrova⁶

^{1–6}Mendeleev's University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

¹gasparian.m.d@muctr.ru

Abstract

The results of research are presented on the synthesis and application of ceramic highly porous contact elements with a cellular structure at high-temperature stages of reprocessing irradiated nuclear fuel for the localization of volatile fission products and the neutralization of nitrogen oxides. Their optimal compositions, and structural, and physical characteristics have been determined. The values of the dynamic sorption capacity for Cs_2O , MoO_3 , TeO_2 , and I_2 for sorbents and the degree of NO_x conversion for catalysts are given.

Keywords:

contact elements, highly porous cellular materials, chemisorption, 'capture efficiency, sorption capacity, catalytic activity, conversion rate

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of and with the support of the Breakthrough Project of the State Atomic Energy Corporation "Rosatom".

For citation:

Polyfunctional ceramic high-porous block-cell contact elements for sorption-catalytic purification of gas environments from harmful substances / M. D. Gasparyan [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 156–163. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.026.

Введение

Синтез керамической основы высокопористых блочно-ячеистых контактных элементов проводится классическим методом дублирования структуры полимерной матрицы из ретикулированного

пенополиуретана (ППУ), который, по сути, является разновидностью метода выгорающих добавок в сочетании с технологией шликерного литья. Керамический тиксотропный шликер, сцепляясь с поверхностью матрицы из ППУ, образует после ее деструкции в процессе высокотемпературного синтеза прочно спеченный каркас, являющийся негативной репликой полимерного прекурсора.

Основы синтеза репликационных высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) алюмосиликатного состава в России были сформулированы академиком РАН В. Н. Анциферовым с сотрудниками [1], а применялись они, главным образом, в качестве фильтров для рафинирования расплавов металлов и носителей гетерогенных катализаторов. В настоящее время исследования и производство керамических ВПЯМ осуществляются в научном центре.

В Менделеевском университете за последние 15 лет разработано новое направление в применении керамических ВПЯМ — в качестве носителей не только катализаторов, но и сорбентов для улавливания вредных веществ, в том числе радиоактивных, из технологических газовых потоков. Наиболее актуальным и целесообразным оказалось использование контактных элементов (КЭ) ячеистой структуры с нанесенным сорбционно-активным слоем в высокотемпературных процессах переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) для локализации выделяющихся летучих продуктов деления (ЛПД). Из каталитических процессов приоритет отдан восстановлению оксидов азота, актуальному как в атомной, так и в других отраслях промышленности.

Сорбционно-активные КЭ разрабатывались для селективного улавливания наиболее значимых в количественном отношении и в отношении радиоактивности и тепловыделения соединений металлических (Cs, Mo) и неметаллических (I, Te) радионуклидов и их групп. Удаление их соединений из технологических газов на головных операциях переработки ОЯТ является важной задачей при создании замкнутого ядерного топливного цикла [2]. В существующих многоступенчатых системах газоочистки [3] для этой цели применяются гранулированные сорбенты, барботеры, жидкостные абсорберы и стекловолоконные фильтры, образующие после эксплуатации большое количество вторичных твердых (ТРО) и жидких (ЖРО) радиоактивных отходов.

Разработанные блочно-ячеистые КЭ успешно прошли предварительные испытания в системах локальной газоочистки реальных радиохимических производств: на операции растворения ограниченного количества нитридного ОЯТ в расплаве цинка в ГНЦ «НИИАР» [4] и на участке изготовления стеклянных цезиевых источников ионизирующего излучения в ПО «Маяк» [5].

Наша цель в перспективе — заменить данные материалы и технологии на единую, масштабированную до опытно-промышленной систему комплексной газоочистки с использованием блочно-ячеистых КЭ нового поколения для улавливания широкого ряда ЛПД с надежной их фиксацией по механизму хемосорбции и образованием минимального количества ТРО.

Синтез керамической основы КЭ из ВПЯМ

Универсальная керамическая основа контактных элементов синтезировалась по описанной выше классической технологии, усовершенствованной в части оптимального состава керамического шликера [6], обеспечивающего технологичность всего процесса, заданные структурно-механические характеристики и возможность взаимодействия полученного каркаса с улавливаемыми веществами по механизму хемосорбции.

Исходная заготовка из ППУ пропитывалась керамическим шликером, в состав которого входят наполнитель (электроплавленный корунд (ЭПК) марки F-360) и основное связующее (керамический пресс-порошок, содержащий, % мас.: Al_2O_3 — 22,5; SiO_2 — 66,5). Соотношение наполнитель/связующее 50/50 %. В качестве жидкой фазы шликера использовали 5 %-й водный раствор поливинилового спирта. В результате последующего высокотемпературного обжига в интервале температур 1 350–1 380 °С происходит полное выгорание ППУ и твердофазное спекание керамики. На рис. 1 приведена типичная ячеистая структура образца синтезированных ВПЯМ.

Средний диаметр ячейки ВПЯМ ($d_{\text{яч}}$) при использовании ППУ с плотностью пор 30 ppi составляет 1,0–1,2 мм (см. рис. 1, а); толщина перегородки 150–200 мкм (см. рис. 1, б), зерна ЭПК размерами 15–20 мкм окружены частицами связующего размерами <5 мкм, объединенными в агрегаты.

Размеры синтезированных блоков ВПЯМ — 35 (диаметр) × 50 (высота) мм, выбраны под внутренний диаметр испытательного реактора.

Основные структурно-физические характеристики: общая пористость ($\varepsilon_{\text{внеш}}$) 85–90 %; средняя плотность 0,35 г/см³; предел прочности при сжатии $\geq 1,5$ МПа; газодинамическое сопротивление образца высотой 50 мм при скорости воздуха до 1 м/с составляет менее 100 Па и находится на уровне сопротивления незагруженного реактора; доступная внешняя объемная поверхность ($S_{\text{внеш}}$), рассчитанная в соответствии с моделью тетракайдодекаэдра [7] по уравнению

$$S_{\text{внеш}} = 3,84 \cdot d_{\text{яч}}^{-0,85} \cdot \varepsilon_{\text{внеш}}^{-0,82} [8], \quad (1)$$

превышает 800 м²/м³.

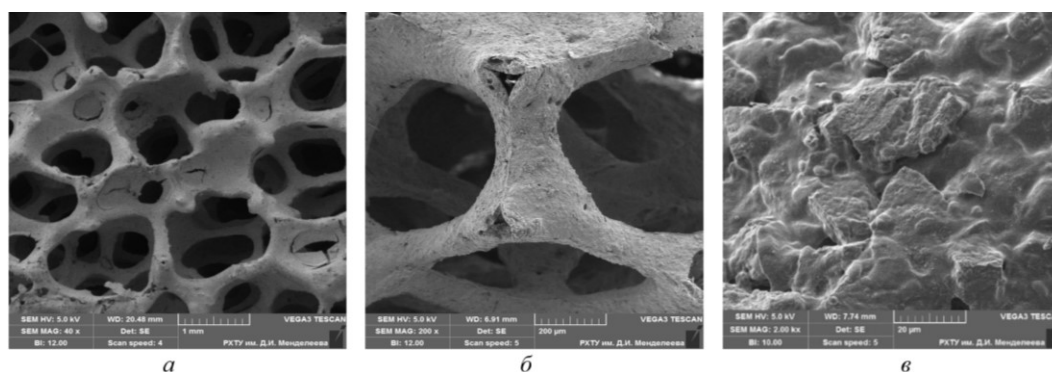


Рис. 1. СЭМ-фотографии макроструктуры ВПЯМ (а, б) и микроструктуры перемычки ячейки (в)

Совокупность данных характеристик (высокая механическая прочность, газопроницаемость и внешняя поверхность) позволяет проводить сорбционные и каталитические процессы во внешнедиффузионной области с высокими расходами очищаемых газов, малыми концентрациями вредных примесей и большими удельными нагрузками на КЭ, обеспечивая КЭ на основе керамических ВПЯМ преимущества перед традиционными гранулированными и сотовыми КЭ.

Нанесение сорбционно- и каталитически активных слоев

Универсальность синтезированных ВПЯМ заключается в использовании одного и того же состава в качестве керамической основы — носителя для последующего нанесения практически любых сорбционно- и каталитически активных композиций.

В окислительной среде изотопы цезия, молибдена и теллура, независимо от исходной формы, выделяются в форме оксидов; а йод — в молекулярной форме (I₂).

Для улавливания Cs₂O на керамическую основу КЭ методом пропитки смесью гидрозолей алюминия и кремния и последующей термообработки при температуре 700 °С наносится сорбционно-активный слой из аморфных γ -Al₂O₃ и SiO₂ в соотношении 30/70 по твердому веществу в суммарном количестве 20–30 % мас. Данное соотношение оксидов алюминия и кремния соответствует их соотношению в поллците — наиболее устойчивом алюмосиликате цезия. Соотношение данных оксидов в керамической основе примерно такое же, что способствует вовлечению в процесс хемосорбции материала ВПЯМ, как показано в наших исследованиях [9] и в работах корейского научно-исследовательского института атомной энергии KAERI [10], где разрабатываются аналогичные КЭ.

Для улавливания молекулярного йода на керамическую основу для развития поверхности путем пропитки алумозолем с прокаливанием при температуре 700 °С наносится промежуточный активный слой γ -Al₂O₃ в количестве 5–7 % мас., а затем сорбционно-активный слой нитрата серебра пропиткой его водным раствором с последующей сушкой при температуре не выше 150 °С во избежание разложения AgNO₃ общим содержанием 15–25 % мас. [9].

КЭ для улавливания паров MoO₃ и TeO₂ получают нанесением на универсальный носитель активного слоя оксида кальция путем пропитки суспензией прекурсора — гидрокарбоната кальция, синтезированного методом распыления насыщенного раствора нитрата кальция над концентрированным

раствором бикарбоната аммония. При дальнейшей термообработке в результате термолитиза прекурсора на поверхности КЭ образуется ультрадисперсный СаО по реакции [11]:



Содержание активного слоя доводится до 15–20 % мас.

Каталитически активные КЭ для восстановления оксидов азота синтезируют, как и в случае с йодными сорбентами, предварительным нанесением на универсальный носитель промежуточного активного слоя $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в количестве 5–7 % мас. и далее — нанесением каталитически активной композиции в двухкомпонентной системе MnO_x — CeO_2 пропиткой из смеси водных растворов нитратов церия и марганца с последующей термообработкой при температуре 600 °С. Общее содержание смеси оксидов составляет 4–6 % мас. при их заданном мольном соотношении 20/80. Образовавшийся твердый раствор ($\text{Ce}_{0,8}\text{Mn}_{0,2}\text{O}_x$) показал высокую эффективность в окислительно-восстановительных каталитических процессах [12].

Хемосорбция имитаторов соединений ЛПД

Исследование процессов хемосорбции оксидов цезия, молибдена и теллура, а также молекулярного йода проводили на сорбционно-каталитическом испытательном стенде (рис. 2).

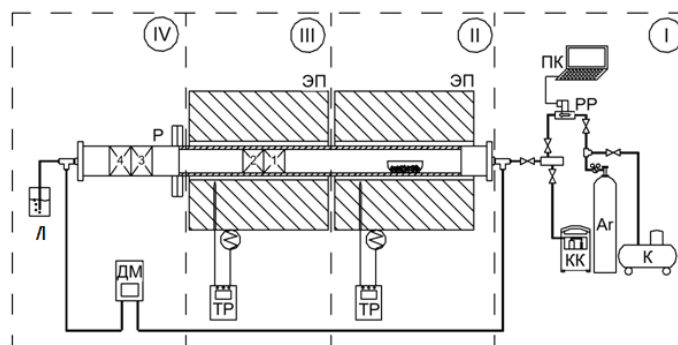


Рис. 2. Схема универсального испытательного сорбционно-каталитического стенда. Описание см. в тексте

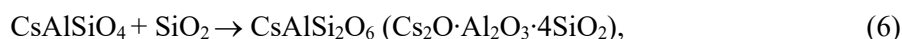
Стенд состоит из 4 блоков. Первый блок — узел подготовки газов-носителей, в качестве которых использовались воздух или аргонкислородная смесь, применяемая на операции высокотемпературной обработки ОЯТ. В блоке также установлены расходомеры-регуляторы, компрессор, баллон с аргоном и концентратор кислорода. Во втором блоке, в корундовом тигле, помещенном в цилиндрический стальной реактор, футерованный корундовой трубкой, испаряются все порошкообразные прекурсоры, засыпанные в корундовый тигель-лодочку. В третьем блоке устанавливаются по 2 образца КЭ (испытуемый и контрольный, определяющий просок) для улавливания оксидов Cs, Mo и Te. Блоки II и III снабжены трубчатыми электропечами с терморегуляторами. Четвертый блок расположен в низкотемпературной части реактора, в которой испытываются КЭ для улавливания йода. Перепад давления на КЭ измеряется дифманометром.

Для генерации паров Cs_2O в качестве прекурсоров использовали твердые соли CsNO_3 и CsI . Выбор первого объясняется именно такой формой нахождения цезия в высокоактивных отходах, поступающих на иммобилизацию методом остекловывания; выбор второго обусловлен тем, что при вскрытии твэлов после выдержки для переработки топлива, особенно с высоким выгоранием, радионуклиды цезия и йода выделяются преимущественно в виде термодинамически стабильного соединения CsI [13].

Генерация паров Cs_2O в окислительной среде происходит в блоке II в интервале температур 700–900 °С по реакциям:



Процесс хемосорбции оксида цезия на КЭ с алюмосиликатным активным слоем в блоке III при оптимальной температуре 900 °С, независимо от газа-носителя и используемого прекурсора, происходит в 2 стадии с образованием цезиевого нефелина (CsAlSiO_4) и поллукита ($\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$):

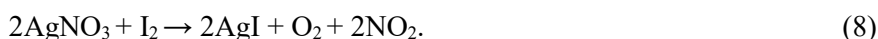


причем с увеличением содержания SiO_2 в керамике и повышением температуры в интервале 700–900 °С выход конечного продукта повышается.

При использовании в качестве прекурсора иодида цезия суммарный процесс хемосорбции протекает по схеме [9; 14]:



Процесс улавливания молекулярного йода исследовался на КЭ с активным слоем AgNO_3 , установленных в холодной зоне реактора (блок IV) при температуре ~180 °С, в которую газообразный I_2 поступает после окислительного термолиза CsI по реакции (4) в блоке I. Основным продуктом хемосорбции является иодид серебра, образующийся по реакции:



Хемосорбция паров оксидов Mo и Te, генерированных испарением в третьем блоке стенда их тонкодисперсных порошков, происходит на КЭ с активным CaO с образованием кислородсодержащих солей кальция (молибдата и теллуридов) по реакциям:



Образование таких же продуктов хемосорбции при использовании КЭ аналогичной структуры, содержащих соединения кальция, отмечается еще в одной работе института KAERI [15].

Результаты экспериментов по улавливанию всех рассмотренных соединений — имитаторов ЛПД с концентрацией (С) в газе-носителе с расходом (G) при оптимальной температуре ($t_{\text{опт}}$) приведены в табл. 1. Эффективность улавливания (Е) и сорбционную емкость КЭ (А) измеряли гравиметрическим методом по привесу массы образцов, фазовый состав продуктов хемосорбции определяли методом рентгенофазового анализа.

Таблица 1

Результаты испытаний КЭ в процессах хемосорбции оксидов Cs, Mo, Te; I_2

Соединение	Газ-носитель (G, л/ч)	C, г/л	Прекурсор	$t_{\text{опт}}$, °С	Состав активного слоя КЭ	Е, %	А, г/г КЭ	Продукты хемосорбции
Cs_2O	Воздух или Ar + 15 % O_2 (90–180)	0,05–0,10	CsNO_3 , CsI	900	$(\text{Al}_2\text{O}_3 \times 4\text{SiO}_2)$	99	0,40–0,55	$\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$, CsAlSiO_4
I_2			CsI	180	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{AgNO}_3$	>99	0,10–0,12	AgI
MoO_3		0,03–0,05	MoO_3	800	CaO	97–99	0,35–0,45	CaMoO_4
TeO_2			TeO_2	850				CaTeO_3 , Ca_3TeO_6

Каталитическое восстановление оксидов азота

Для исследования процесса восстановления оксидов азота в состав испытательного стенда добавляются баллоны с исходным NO_x заданной концентрации (С), СО (агент-восстановитель, подаваемый в избытке 1,5–2 объема) и N_2 (газ-носитель). Концентрация всех газов на выходе из реактора измеряется газоанализатором. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний КЭ в процессе восстановления оксидов азота

Соединение	Газ-носитель (G, л/ч)	C, г/л	t _{опт} , °C	Состав активного слоя КЭ	Степень конверсии, %	Продукты катализа
NO _x	N ₂ (30)	0,001–0,002	400	γ-Al ₂ O ₃ + Ce _{0,8} Mn _{0,2} O ₂	>99	(N ₂ , CO ₂)

Заключение

Полученные результаты показали высокую эффективность улавливания и сорбционную емкость по всем рассмотренным соединениям имитаторов ЛПД и позволяют рекомендовать их применение в составе локальных систем газоочистки (ЛСГО) существующих и проектируемых радиохимических производств на высокотемпературных операциях переработки ОЯТ любого типа и иммобилизации высокоактивных ЖРО методом выпаривания и остекловывания.

Список источников

1. Анциферов В. Н., Беклемышев А. М., Гилев В. Г., Порозова С. Е., Швейкин Г. П. Проблемы порошкового материаловедения. Часть II. Высокопористые проницаемые материалы. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 262 с.
2. Шадрин А. Ю., Двоглазов К. Н., Масленников А. Г., Кашеев В. А., Третьякова С. Г., Шмидт О. В., Виданов В. Л., Устинов О. А., Волк В. И., Веселов С. Н., Ишунин В. С. РН-процесс — технология переработки смешанного уран-плутониевого топлива реактора БРЕСТ-ОД-300 // Радиохимия. 2016. Т. 58, № 3. С. 234–241.
3. Устинов О. А., Двоглазов К. Н., Тучкова А. И., Шадрин А. Ю. Локальная система газоочистки при окислении отработавшего нитридного топлива // Атомная энергия. 2017. Т. 123, № 4. С. 203–205.
4. Гаспарян М. Д., Осипенко А. Г. Комплексная очистка газообразных сред от летучих продуктов деления в процессе переработки облученного ядерного топлива // Экология промышленного производства. 2015. № 2. С. 40–46.
5. Гаспарян М. Д., Грунский В. Н., Беспалов А. В., Магомедбеков Э. П., Попова Н. А., Баранов С. В., Баторшин Г. Ш., Бугров К. В., Занора Ю. А., Истомин И. А., Степанов С. В., Макаров О. Н. Перспективы применения керамических высокопористых блочно-ячеистых фильтров-сорбентов газообразного радиоактивного цезия в решении вопросов обеспечения экологической безопасности производств атомной отрасли // Экология промышленного производства. 2014. № 1. С. 26–33.
6. Грунский В. Н., Беспалов А. В., Гаспарян М. Д., Давидханова М. Г., Кабанов А. Н., Лукин Е. С., Попова Н. А., Харитонов Н. И. Синтез полифункциональных высокопористых блочно-ячеистых материалов на основе оксидной керамики // Огнеупоры и техническая керамика. 2016. № 6. С. 3–8.
7. Buciuman F. C., Kraushaar-Czametzk B. Ceramic foam monoliths as catalyst carriers. 1. Adjustment and description of morphology // Industrial Engineering Chemistry Research. 2003. V. 42. P. 1863–1869.
8. Incera Garrido G. Mass and momentum transfer upon flow through solid sponges: Dissertation (PhD thesis). University of Karlsruhe. 2009. 162 p.
9. Gasparyan M. D., Grunskii V. N., Mochalov Yu. S., Sukhanov L. P., Titov A. V., Tishchenko S. V. and Obukhov E. O. Localization of Vapors of Cesium Iodide on Ceramic Block-Cellular Contact Elements in an Oxidizing Environment // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2023. V. 57, № 6. P. 1350–1360.
10. Jae Hwan Yang, Joo Young Yoon, Ju Ho Lee, Yung-Zun Cho. A kaolinite-based filter to capture gaseous cesium compounds in off-gas released during the pyroprocessing head-end process // Annals of Nuclear Energy. 2017. V. 103. P. 29–35.
11. Gasparyan M. D., Grunskii V. N., Salnikova O. Yu., Mochalov Yu. S., Sukhanov L. P., Tishchenko S. V. Trapping of Volatile Fission Products by Modular Cellular Ceramic Contact Elements with an Applied Active Layer of Calcium Oxide // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2025. V. 59, № 1. P. 189–196.
12. Machida M., Uto M., Kugori D., Tsuyoshi Kijima. MnOx-CeO₂ binary oxides for catalytic NO_x sorption at low temperatures. Sorptive removal of NO_x // Chem. Mater. 2000. V. 12. P. 3158–3164.
13. Крюков Ф. Н., Кислый В. А., Кормилицын М. В., Кузьмин С. В., Маершин А. А., Никитин О. Н., Строжук С. В., Шишалов О. В. Распределение продуктов деления в облученном виброуплотненном оксидном топливе // Атомная энергия. 2005. Т. 99, № 5, С. 380–387.
14. Jae Hwan Yang, Joo Young Yoon, Seok-Min Hong, Ju Ho Lee, Yung-Zun Cho. An efficient capture of cesium from cesium iodide (CsI) off-gas by aluminosilicate sorbents in the presence of oxygen // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2019. V. 77. P. 146–153.

15. Jin Myeong Shin, Jang Jin Park, Jae Won Lee, Sang Ho Na, Young Ja Kim and Geun IL Park. Design of Engineering Scale Off-Gas Trapping system at KAERI // Proceeding of GLOBAL 2011. Makuhari. Japan. Paper No. 395956. P. 1–6.

References

1. Anciferov V. N., Beklemyshev A. M., Gilev V. G., Porozova S. E., Shvejkin G. P. *Problemy poroshkovogo materialovedeniya. Chast' II. Vysokoporistye pronicaemye materialy* [Problems of powder material science. Part II. Highly porous permeable materials]. Ekaterinburg, UrO RAN, 2002, 262 p. (In Russ.).
2. Shadrin A. Ju., Dvoeglazov K. N., Maslennikov A. G., Kashcheev V. A., Tretjakova S. G., Shmidt O. V., Vidanov V. L., Ustinov O. A., Volk V. I., Veselov S. N., Ishunin V. S. RN-process—tehnologija pererabotki smeshannogo uran-plutoniyevo topliva reaktora BREST-OD-300 [PH process as a technology for reprocessing mixed uranium-plutonium fuel from Brest-OD-300 reactor]. *Radiohimija* [Radiochemistry], 2016, Vol. 58, No 3, pp. 234–241. (In Russ.).
3. Ustinov O. A., Dvoeglazov K. N., Tuchkova A. I., Shadrin A. Ju. Lokal'naja sistema gazoочistki pri okislenii otrabotavshego nitridnogo topliva [Local gas cleaning system for oxidation of spent nitride fuel]. *Atomnaja jenergija* [Atomic energy], 2017, Vol. 123, No 4, pp. 203–205. (In Russ.).
4. Gasparjan M. D., Osipenko A. G. Kompleksnaja oчитка gazoобразnyh sred ot letuchih produktov delenija v processe pererabotki obluchennogo jadernogo topliva [Complex purification of gaseous media from volatile fission products during the reprocessing of irradiated nuclear fuel]. *Ekologija promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of industry production], 2015, No 2, pp. 40–46. (In Russ.).
5. Gasparjan M. D., Grunskij V. N., Bepalov A. V., Magomedbekov E. P., Popova N. A., Baranov S. V., Batorshin G. Sh., Bugrov K. V., Zanora Ju. A., Istomin I. A., Stepanov S. V., Makarov O. N. Perspektivy primeneniya keramicheskikh vysokoporistyh blochno-jacheistyh fil'trov-sorbentov gazoобразного radioaktivного cesija v reshenii voprosov obespechenija ekologicheskoy bezopasnosti proizvodstv atomnoj otrasli [Prospects for the use of ceramic highly porous block-cellular filters-sorbents of gaseous radioactive cesium in solving issues of ensuring environmental safety of nuclear industry plants]. *Ekologija promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of industry production], 2014, No 1, pp. 26–33. (In Russ.).
6. Grunskij V. N., Bepalov A. V., Gasparjan M. D., Davidhanova M. G., Kabanov A. N., Lukin E. S., Popova N. A., Haritonov N. I. Sintez polifunkcional'nyh vysokoporistyh blochno-jacheistyh materialov na osnove oksidnoj keramiki [Synthesis of polyfunctional highly porous block-cellular materials based on oxide ceramics]. *Ogneupory i tehničeskaja keramika* [Refractories and industrial ceramics], 2016, No 6, pp. 3–8. (In Russ.).
7. Buciuman F. C., Kraushaar-Czametzk B. Ceramic foam monoliths as catalyst carriers. 1. Adjustment and description of morfology. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2003, Vol. 42, pp. 1863–1869.
8. Incera Garrido G. *Mass and momentum transfer upon flow through solid sponges*: Dissertation (PhD thesis), University of Karlsruhe, 2009, 162 p.
9. Gasparjan M. D., Grunskij V. N., Mochalov Yu. S., Sukhanov L. P., Titov A. V., Tishchenko S. V., Obukhov E. O. Localization of Vapors of Cesium Iodide on Ceramic Block-Cellular Contact Elements in an Oxidizing Environment. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2023, Vol. 57, No. 6, pp. 1350–1360.
10. Jae Hwan Yang, Joo Young Yoon, Ju Ho Lee, Yung-Zun Cho. A kaolinite-based filter to capture gaseous cesium compounds in off-gas released during the pyroprocessing head-end process. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, Vol. 103, pp. 29–35.
11. Gasparjan M. D., Grunskij V. N., Salnikova O. Yu., Mochalov Yu. S., Sukhanov L. P., Tishchenko S. V. Trapping of Volatile Fission Products by Modular Cellular Ceramic Contact Elements with an Applied Active Layer of Calcium Oxide. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2025, Vol. 59, No. 1, pp. 189–196.
12. Machida M., Uto M., Kugori D., Tsuyoshi Kijima. MnOx-CeO₂ binary oxides for catalytic NOx sorption at low temperatures. Sorptive removal of NOx. *Chem. Mater.*, 2000, Vol. 12, pp. 3158–3164.
13. Krjukov F. N., Kislyj V. A., Kormilicyn M. V., Kuz'min S. V., Maershin A. A., Nikitin O. N., Strozuk S. V., Shishalov O. V. Raspredelenie produktov delenija v obluchennom vibrouplotnenном oksidном toplive [Distribution of fission products in irradiated vibrationally compacted oxide fuel]. *Atomnaja jenergija* [Atomic energy], 2005, Vol. 99, No 5, pp. 380–387. (In Russ.).
14. Jae Hwan Yang, Joo Young Yoon, Seok-Min Hong, Ju Ho Lee, Yung-Zun Cho. An efficient capture of cesium from cesium iodide (CsI) off-gas by aluminosilicate sorbents in the presence of oxygen. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, Vol. 77, pp. 146–153.
15. Jin Myeong Shin, Jang Jin Park, Jae Won Lee, Sang Ho Na, Young Ja Kim and Geun IL Park. Design of Engineering Scale Off-Gas Trapping system at KAERI. *Proceeding of GLOBAL 2011*, Makuhari. Japan, Paper No. 395956, pp. 1–6.

Информация об авторах

М. Д. Гаспарян — профессор кафедры общей химической технологии, доктор технических наук;
В. Н. Грунский — заведующий кафедрой общей химической технологии, доктор технических наук;
А. И. Дубко — старший преподаватель кафедры общей химической технологии;
О. Ю. Сальникова — старший преподаватель кафедры общей химической технологии;
Е. О. Обухов — старший преподаватель кафедры общей химической технологии;
А. Д. Александрова — аспирант кафедры общей химической технологии.

Information about the authors

M. D. Gasparyan — Professor of the Department of General Chemical Technology, DSc (Engineering);
V. N. Grunsky — Head of the Department of General Chemical Technology, DSc (Engineering);
A. I. Dubko — Senior lecturer of the Department of General Chemical Technology;
O. Yu. Salnikova — Senior lecturer of the Department of General Chemical Technology;
E. O. Obukhov — Senior lecturer of the Department of General Chemical Technology;
A. D. Alexandrova — Graduate Student of the Department of General Chemical Technology.

Статья поступила в редакцию 09.06.2025; одобрена после рецензирования 27.06.2025; принята к публикации 11.07.2025.
The article was submitted 09.06.2025; approved after reviewing 27.06.2025; accepted for publication 11.07.2025.