

УДК 621.039.7

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-149-162>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование механических и теплофизических свойств кристаллических матриц для иммобилизации высокоактивных отходов

И.В. Кузнецов¹, А.Ю. Зобкова¹, М.Ю. Каленова¹, А.С. Щепин¹, О.Н. Будин¹,
В.А. Степанов², И.М. Мельникова¹, О.И. Стефановская³, К.В. Клемазов²

¹ Ведущий научно-исследовательский институт им. Б.Н. Ласкорина, Москва, 115524 Россия

² Обнинский институт атомной энергетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Обнинск, Калужская область, 249039 Россия

³ Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, Российская академия наук, Москва, 119071 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: ivan7501966@mail.ru

Аннотация

Цели. Целью работы являлось подтверждение соответствия механических и теплофизических свойств титанатно-цирконатных минералоподобных матриц, предназначенных для иммобилизации редкоземельно-актинидной фракции высокоактивных отходов (ВАО) российским требованиям, предъявляемым к конечным формам радиоактивных отходов, направляемых на захоронение. Матрицы имеют структуры пирохлора ($\text{Nd}_2\text{ZrTiO}_7$) и орторомбического титаната редкоземельных элементов ($\text{Nd}_4\text{Ti}_9\text{O}_{24}+\text{TiO}_2$). Применительно к фракционированным радиоактивным отходам данный тип матриц более предпочтителен по сравнению с консервативными алюмофосфатными и боросиликатными стеклами благодаря большей емкости и лучшей химической, термической и радиационной устойчивости.

Методы. Синтез минералоподобных матриц осуществляли путем переплавки гранулированного прекурсора, состоящего из минералообразующих оксидов металлов и раствора, имитирующего редкоземельно-актинидную фракцию ВАО, в индукционном плавителе с холодным тиглем. Исследование температуропроводности проводили методом лазерной вспышки; теплоемкость образцов матриц измеряли методом дифференциальной сканирующей калориметрии; пределы прочности на изгиб и сжатие определяли с помощью универсальных испытательных машин; модули упругости (Юнга) измеряли акустическим методом. Температурные коэффициенты линейного расширения находили с помощью высокотемпературного dilatометра.

Результаты. Установлено, что пределы прочности матриц ($\text{Nd}_2\text{ZrTiO}_7$) и ($\text{Nd}_4\text{Ti}_9\text{O}_{24}+\text{TiO}_2$) составляют 150–179 и 20.6–57.8 МПа при сжатии и изгибе соответственно. Модули Юнга варьируются от $3.7 \cdot 10^7$ до $2.15 \cdot 10^8$ кН/м². Значения теплопроводности при повышении температуры от 50 до 500°C имеют выраженную тенденцию к уменьшению от 1.71 до 0.91 Вт/(м·К). Температурные коэффициенты линейного расширения увеличиваются от $6.96 \cdot 10^{-6}$ до $1.01 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹ в том же температурном интервале.

Выводы. Комплексные исследования титанатно-цирконатных минералоподобных матриц показали, что их механические и теплофизические свойства в ряде случаев существенно превосходят минимальные требования нормативной документации, предъявляемые к конечным формам ВАО.

Ключевые слова

высокоактивные отходы, пирохлор, орторомбический титанат, прочность, теплопроводность

Поступила: 28.04.2023

Доработана: 29.05.2023

Принята в печать: 11.03.2024

Для цитирования

Кузнецов И.В., Зобкова А.Ю., Каленова М.Ю., Щепин А.С., Будин О.Н., Степанов В.А., Мельникова И.М., Стефановская О.И., Клемазов К.В. Исследование механических и теплофизических свойств кристаллических матриц для иммобилизации высокоактивных отходов. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(2):149–162. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-149-162>

RESEARCH ARTICLE

A study of the mechanical and thermophysical properties of crystal matrices for the immobilization of high-level wastes

Ivan V. Kuznetsov¹✉, Anna Yu. Zobkova¹, Maya Yu. Kalenova¹,
Andrey S. Shchepin¹, Oleg N. Budin¹, Vladimir A. Stepanov²,
Irina M. Melnikova¹, Olga I. Stefanovskaya³, Kirill V. Klemazov²

¹ B.N. Laskorin Leading Research Institute, Moscow, 115524 Russia

² Obninsk Institute of Atomic Energy, National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Kaluga oblast, 249039 Russia

³ A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: ivan7501966@mail.ru

Abstract

Objectives. The aim of the study was to confirm the compliance of the mechanical and thermophysical properties of titanate-zirconate mineral-like matrices intended for immobilization of the rare-earth-actinide fraction of high-level waste (HLW) with pyrochlore structures ($\text{Nd}_2\text{ZrTiO}_7$) and orthorhombic titanate of rare earth elements ($\text{Nd}_4\text{Ti}_9\text{O}_{24}+\text{TiO}_2$) with the Russian requirements for the final forms of radioactive waste sent for disposal. With regard to fractionated radioactive waste, this type of matrix is preferable when compared with conservative aluminophosphate and borosilicate glasses. This is due to larger capacity, and a better level of chemical, thermal, and radiation resistance.

Methods. The synthesis of mineral-like matrices was carried out by remelting a granular precursor consisting of mineral-forming metal oxides and a solution imitating the rare earth-actinide fraction of HLW in an induction furnace with a cold crucible. The thermal diffusivity was determined by the laser flash method. The heat capacity of the matrix samples was measured by differential scanning calorimetry. Ultimate flexural and compressive strengths were determined using universal test machines. The elastic moduli (Young's) were measured by the acoustic method. The temperature coefficients of linear expansion were determined using a high-temperature dilatometer.

Results. The ultimate strength of the matrices ($\text{Nd}_2\text{ZrTiO}_7$) and ($\text{Nd}_4\text{Ti}_9\text{O}_{24}+\text{TiO}_2$) was found to be 150–179 and 20.6–57.8 MPa in compression and bending respectively. Young's moduli vary from $3.7 \cdot 10^7$ to $2.15 \cdot 10^8$ kN/m². With an increase in temperature from 50 to 500°C, the values of thermal conductivity have a pronounced tendency to decrease from 1.71 to 0.91 W/(m·K). The temperature coefficients of linear expansion increase from $6.96 \cdot 10^{-6}$ to $1.01 \cdot 10^{-5}$ K⁻¹ in the same temperature range.

Conclusions. Comprehensive studies of titanate-zirconate mineral-like matrices show that their mechanical and thermal properties in certain cases significantly exceed the minimum requirements of regulatory documentation for the final forms of HLW.

Keywords

high-level waste, pyrochlore, orthorhombic titanate, strength, thermal conductivity

Submitted: 28.04.2023

Revised: 29.05.2023

Accepted: 11.03.2024

For citation

Kuznetsov I.V., Zobkova A.Yu., Kalenova M.Yu., Shchepin A.S., Budin O.N., Stepanov V.A., Melnikova I.M., Stefanovskaya O.I., Klemazov K.V. A study of the mechanical and thermophysical properties of crystal matrices for the immobilization of high-level wastes. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(2):149–162. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-2-149-162>

ВВЕДЕНИЕ

Образование значительных объемов высокоактивных отходов (ВАО) при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) (варианты PUREX-процесса¹) является препятствием для широкомасштабного развития современной ядерной энергетики [1, 2]. Согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергии² и действующим нормативным актам стран, эксплуатирующих атомные электростанции, жидкие ВАО подлежат кондиционированию с целью сокращения объема и перевода в конечную форму, пригодную для экологически безопасного длительного хранения и захоронения в геологические формации на глубине не менее 500 м [1–5]. Получаемая матрица должна обладать химической, термической и радиационной устойчивостью, сохранять изолирующую способность на протяжении не менее 1000 лет³.

В настоящее время в мире промышленно реализовано два технологических подхода по иммобилизации жидких ВАО в матричные материалы. На ПО «Маяк» применяется универсальная алюмофосфатная стекломатрица (АФС), характеризующаяся относительно невысокой температурой синтеза 900–1050°C и уникальной способностью включать в свой состав широкий спектр элементов и соединений, в том числе значительные количества молибдена и оксида алюминия, источником которого служит топливо мобильных энергетических установок [6–8]. В среднем в Российской Федерации ежегодно образуется до 74 м³/год остеклованных ВАО, направляемых на временное хранение. После 2025 г. количество должно увеличиться до 200 м³/год, что существенно обострит проблему создания новых хранилищ и рационального использования их площадей⁴.

Во Франции и Великобритании используются более специализированные конечные формы — боросиликатные стекла, обладающие несколько большей емкостью по радионуклидам до 18.8 мас. % [8–9]. Плотность матрицы составляет при этом около 2.85 т/м³. Однако даже при достижении таких сравнительно высоких показателей объем ВАО,

направляемый на хранение и/или захоронение, значителен и составляет 0.1–0.11 м³/т ОЯТ [10].

Пожалуй, единственным решением, приемлемым с точки зрения обеспечения экологической безопасности при обращении с жидкими ВАО и относительной экономической эффективности, может выступать фракционирование [11–18]. Внедрение процесса предполагает максимальное извлечение энергетических нуклидов с целью возврата в ядерный топливный цикл и принятое в качестве генеральной линии дожигание в быстром или жидкосолевом реакторах. При этом невостребованные продукты деления разделяются на несколько фракций по принципу схожести химических свойств, что позволяет подобрать оптимальный состав конечной формы. Более реалистичные к промышленной реализации сценарии фракционирования предполагают выделять из раствора ВАО:

- редкоземельно-актинидную (РЗЭ-актинидную) фракцию, образующуюся после извлечения урана, плутония и нептуния, содержащую преимущественно лантаниды, америций и кюрий (до 3.5 и 0.44 мас. % от общего количества металлов в растворе), а также следы U, Pu и Np [11–18];
- цезий-стронциевую фракцию, насыщенную активными и стабильными изотопами Cs и Sr, а также Ba, доля которого может составлять до 26% от общей массы металлов [11–19].

Одной из перспективных форм для иммобилизации РЗЭ-актинидной фракции являются кристаллические матрицы [11], обладающие высокой емкостью по радионуклидам, плотностью, термической, химической и радиационной устойчивостью [20–22]. Их долговременная стабильность подтверждается длительным существованием структурно идентичных минералов в жестких условиях земной коры [23]. К настоящему моменту проведено множество фундаментальных исследований, подтверждающих обозначенные выше преимущества, однако цельное, всестороннее и структурированное обоснование их применимости отсутствует. В связи с этим не существует нормативной базы, регламентирующей качество кристаллических матриц, что также ограничивает их промышленное освоение.

¹ Plutonium-Uranium Recovery by Extraction.

² <https://www.iaea.org/ru>. Дата обращения 25.03.2023. / Accessed March 25, 2023.

³ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2015;77:(3):59–82. <https://docs.secnrs.ru/documents/nps/НП-093-14/НП-093-14.pdf>. Дата обращения 23.03.2023. [Federal Standards and Rules in the Field of Atomic Energy. Criteria for Accepting Radioactive Waste for Disposal. NP-093-14. *Nuclear and Radiation Safety*. 2015;77:(3):59–82. <https://docs.secnrs.ru/documents/nps/НП-093-14/НП-093-14.pdf>. Accessed March 23, 2023.]

⁴ Семенов М.А. Вопросы подготовки РАО 2-го класса к захоронению. Материалы научно-технического семинара «Обращение с ОЯТ и РАО в ЗЯТЦ»; 27 мая 2021; Москва, Россия: АО «ВНИИИМ имени А.А. Бочвара»; 2021. [https://bochvar.ru/materialy-konferentsiy/06%20Семенов%20М.А.%20\(ФГУП%20ПО%20Маяк\)%20-%20Презентация.pdf](https://bochvar.ru/materialy-konferentsiy/06%20Семенов%20М.А.%20(ФГУП%20ПО%20Маяк)%20-%20Презентация.pdf). Дата обращения 27.03.2023. [Semyonov M.A. Issues of preparation of class 2 radioactive waste for disposal. Proceedings of the Scientific and Technical Seminar “SNF and RW Management at ZNFC,” May 27, 2021; Moscow, Russia. A.A. Bochvar VNIINM; 2021. [https://bochvar.ru/materialy-konferentsiy/06%20Семенов%20М.А.%20\(ФГУП%20ПО%20Маяк\)%20-%20Презентация.pdf](https://bochvar.ru/materialy-konferentsiy/06%20Семенов%20М.А.%20(ФГУП%20ПО%20Маяк)%20-%20Презентация.pdf). Accessed March 27, 2023.]

Согласно действующим нормативам, отвержденные ВАО подлежат захоронению в геологические формации глубиной до нескольких сотен метров [24]. Одними из важнейших качественных характеристик конечных форм являются механические и теплофизические свойства. Пределы прочности при изгибе и сжатии определяют сохранение целостности матрицы при транспортировочных операциях и воздействии давления геологической среды в пункте конечного размещения. Недостаточная прочность блоков матриц может привести к образованию трещин и разломов с развитой поверхностью, что снижает устойчивость материала к выщелачиванию.

Теплопроводность матрицы характеризует ее устойчивость к перегреву вследствие распада инкорпорированных радионуклидов. Также показатель влияет на предельные доли включаемых ВАО и размеры слитка, обеспечивающих приемлемый разогрев матрицы. Низкая теплопроводность может привести к локальному перегреву матрицы, сопровождающемуся механическим напряжением и, в итоге, приводящим к разрушению матрицы.

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) влияет на изменение размеров слитка матрицы в процессе падения ее тепловыделения, обусловленного распадом короткоживущих радионуклидов. Показатель критически важен на этапе выбора контейнера; значения ТКЛР конечной формы и материала ее упаковки не должны существенно различаться.

Целью работы являлось подтверждение соответствия механических и теплофизических свойств титанатно-цирконатных минералоподобных матриц, предназначенных для иммобилизации РЗЭ-актинидной фракции ВАО действующим требованиям российского законодательства, которые предъявляются к конечным формам направляемых на захоронение радиоактивных отходов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе испытывались следующие виды кристаллических матриц для иммобилизации РЗЭ-актинидной фракции:

- со структурой титанатно-цирконатного пироклора $\text{Ln}_2\text{ZrTiO}_7$ (до 62 мас. % Ln_2O_3);
- фаза орторомбического титаната РЗЭ и рутила $\text{Ln}_4\text{Ti}_9\text{O}_{24}+\text{TiO}_2$ (до 33 мас. % Ln_2O_3).

Выбор указанных кристаллических матриц обусловлен их универсальностью, выражающейся в способности включать РЗЭ-актинидную фракцию с различным соотношением An : Ln (актинидов и лантаноидов). Данное решение удобно с технологической точки зрения, т.к. не накладывает жестких ограничений на процесс фракционирования.

Матричные материалы синтезировали с использованием оригинального способа, включающего получение гранулированного предшественника из неактивного имитатора жидких ВАО и твердых минералообразователей с последующей переплавкой в высокочастотной индукционной печи с холодным тиглем (ИПХТ). Получаемые матрицы представляли собой слитки диаметром 120 мм и высотой ~120 мм. Перед проведением испытаний исследуемый материал проходил входной контроль на соответствие фазового и химического составов заданным с использованием атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой Vista PRO (*Varian*, Австралия) и порошкового рентгеновского дифрактометра ДРОН-4М (ПО «*Буревестник*», СССР). Расшифровку рентгенодифракционных данных и идентификацию фаз осуществляли в программном пакете Match! (*Crystalimpact GmbH*, Германия) и базе данных ICDD-2⁵.

Кристаллические матрицы с подтвержденными характеристиками разделяли на образцы для исследований механических и теплофизических свойств. Фрагментацию материала и обработку поверхностей осуществляли с помощью прецизионных станков: отрезного Mecatome T210 (*Presi SAS*, Франция) и шлифовально-полировального Mecatech 234 (*Presi SAS*, Франция) соответственно. Конфигурации образцов и ссылки на методики испытаний, в соответствии с требованиями которых они изготавливались, представлены в табл. 1.

На рис. 1 показан внешний вид образцов, на рис. 2 — дифракционная картина матриц со структурами пироклора (а) и орторомбического титаната (б).

Определение прочности при сжатии и изгибе проводили на универсальной испытательной машине LFM-50 (*Walter+Bai*, Швейцария). Конечные значения параметров рассчитывали как средние арифметические в серии измерений. Модули Юнга измеряли акустическим методом путем фиксации времени прохождения через образец ультразвукового сигнала с частотой 2.5 МГц. Скорость распространения (v_l) ультразвуковых продольных волн определяли по формуле (1):

$$v_l = \frac{l}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

где l — длина образца, м; t_1 — время пробега ультразвуковых волн с образцом, с; t_2 — время прохождения ультразвуковых волн без образца, с.

Модуль Юнга (E) рассчитывали по формуле (2):

$$E = v_l^2 \times \rho, \quad (2)$$

где ρ — плотность, кг/м³.

⁵ International Center for Diffraction Data. <https://www.icdd.com/>. Дата обращения 10.03.2023. / Accessed March 10, 2023.

Таблица 1. Номенклатура образцов минералоподобных матриц (МПМ), изготовленных для исследования механических и теплофизических свойств

Table 1. Nomenclature of mineral-like matrices (MLMs) samples made for the mechanical and thermophysical properties study

Определяемое свойство Properties	Типоразмеры образцов, мм Sample sizes, mm	Нормативный документ Regulatory act	Количество подготовленных образцов, шт Number of prepared samples, pcs		
			Пирохлор Pyrochlore structure	Орторомбический титанат Orthorhombic titanate structure	
Прочность на изгиб, упругий модуль при изгибе Flexural strength, flexural modulus	Балка квадратного сечения $4.5 \times 4.5 \times 35.0$ Square beam $4.5 \times 4.5 \times 35.0$	ГОСТ 24409-80 ⁶ GOST R 24409-80 ⁶	14	15	
Прочность на сжатие, модуль Юнга при сжатии Compressive strength, Young's modulus in compression	Куб со стороной 10 Cube with a side of 10	ГОСТ Р 57606-2017 (ИСО 20504:2006) ⁷ GOST R 57606-2017 (ISO 20504:2006) ⁷	21	19	
Теплопроводность Thermal conductivity	Температуропроводность Thermal diffusivity	Прямоугольный параллелепипед $10.0 \times 10.0 \times 2.5$ Rectangular parallelepiped $10.0 \times 10.0 \times 2.5$	ГОСТ Р 24409-80 ASTM E1461-13 ⁸	3	4
	Теплоемкость Heat capacity	Квадратная пластина $3.4 \times 3.4 \times 1.0$ Square plate $3.4 \times 3.4 \times 1.0$	ГОСТ 24409-80 ASTM E1269-11 ⁹ GOST R 24409-80 ASTM E1269-11 ⁹	3	3
ТКЛР Linear expansion temperature coefficient (LETC)	Балка квадратного сечения $4 \times 4 \times 30$ Square beam $4 \times 4 \times 30$	ГОСТ Р 57743-2017 (ИСО 17139:2014) ¹⁰ GOST R 57743-2017 (ISO 17139:2014) ¹⁰	5	3	

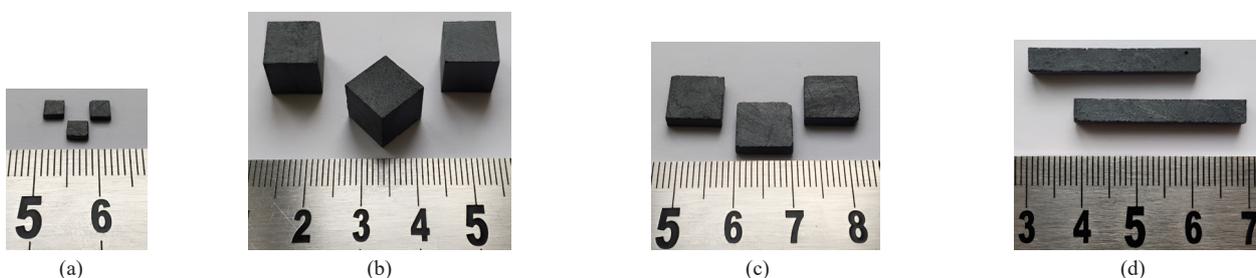


Рис. 1. Внешний вид образцов МПМ различного типоразмера: (а) образцы для определения теплоемкости; (б) образцы для определения предела прочности при сжатии; (с) образцы для определения температуропроводности; (д) образцы для определения предела прочности при изгибе

Fig. 1. Appearance of MLMs samples of various sizes: (a) heat capacity determining samples; (b) compressive strength determining samples; (c) thermal diffusivity determining samples; (d) ultimate strength in bending determining samples

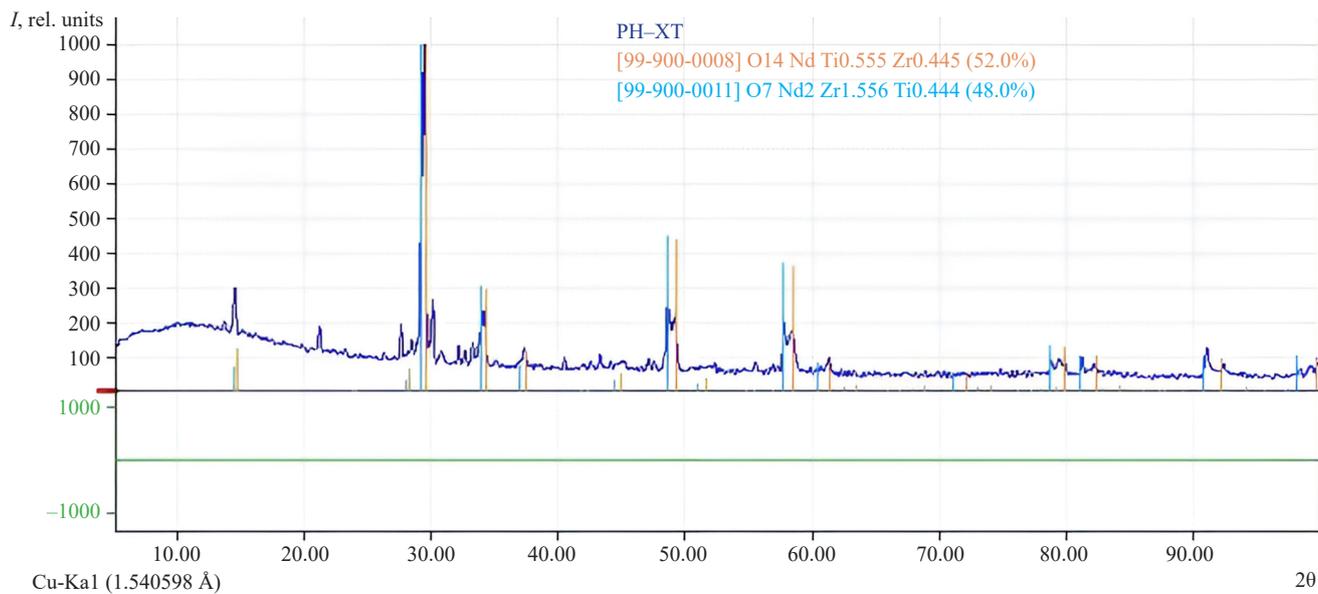
⁶ ГОСТ 24409-80. Межгосударственный стандарт. Материалы керамические электротехнические. Методы испытаний. М.: Стандартинформ; 2005. [GOST 24409-80. Interstate Standard. Ceramic electrotechnical materials. Methods of testing. Moscow: Standartinform; 2005.]

⁷ ГОСТ Р 57606-2017 (ИСО 20504:2006). Национальный стандарт Российской Федерации. Композиты керамические. Метод испытания на сжатие при нормальной температуре. М.: Стандартинформ; 2017. [GOST R 57606-2017 (ISO 20504:2006). National Standard of the Russian Federation. Fine ceramics. Test method for compressive behavior of continuous fiber-reinforced composites at room temperature, MOD. Moscow: Standartinform; 2017.]

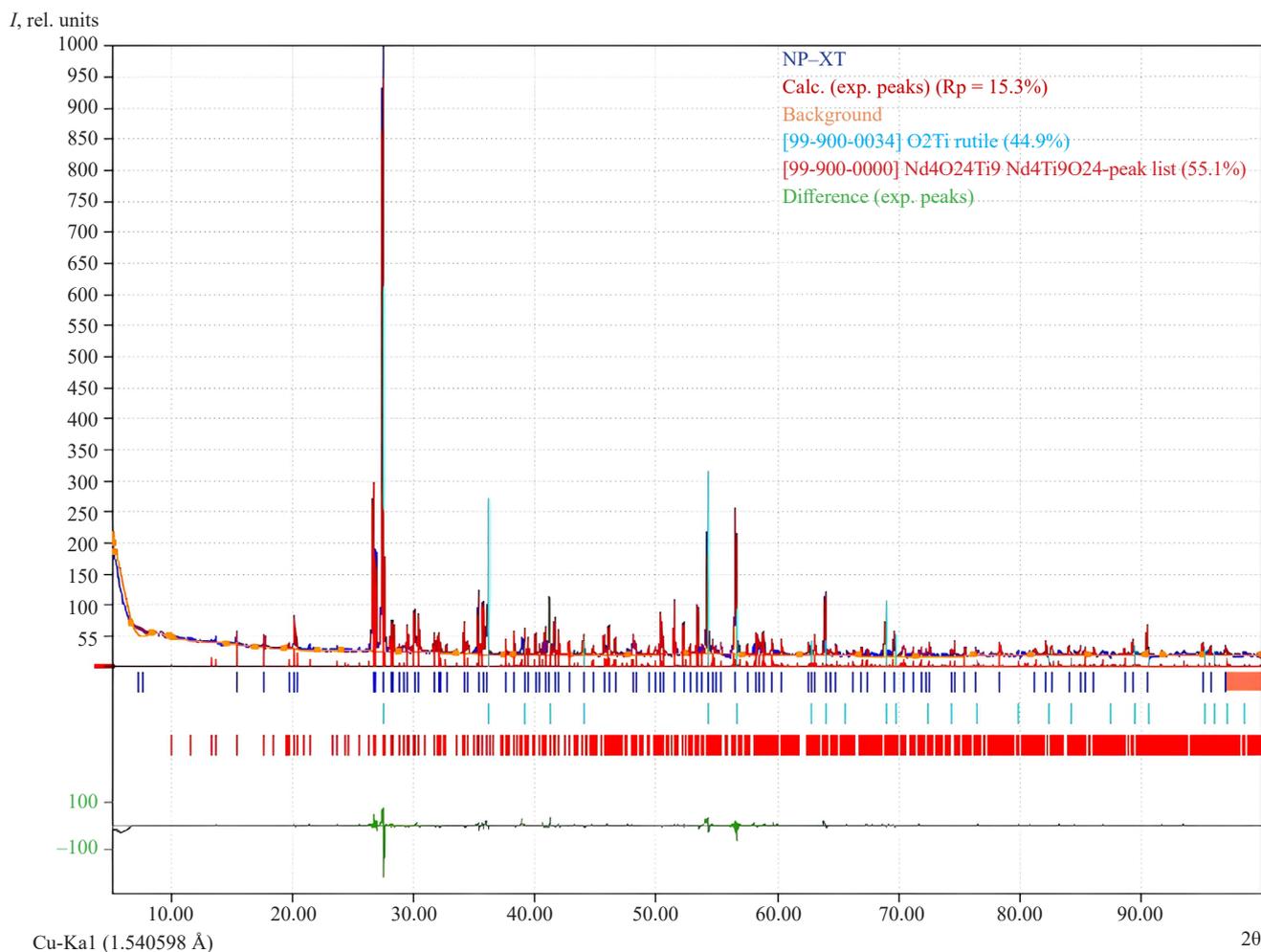
⁸ ASTM E1461-13. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. <https://www.astm.org/e1461-13.html>. Дата обращения 15.01.2023. / Accessed January 15, 2023.

⁹ ASTM E1269-11. Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry.

¹⁰ ГОСТ Р 57743-2017 (ИСО 17139:2014). Национальный стандарт Российской Федерации. Композиты керамические. Определение теплового расширения. М.: Стандартинформ; 2017. [GOST R 57743-2017 (ISO 17139:2014). National Standard of the Russian Federation. Fine ceramics. Thermophysical properties of ceramic composites — Determination of thermal expansion, MOD. Moscow: Standartinform; 2017.]



(a)



(b)

Рис. 2. Диффрактограммы синтезированных матриц: (а) титанатно-цирконатная матрица со структурой пирохлора; (б) матрица со структурой орторомбического титаната РЗЭ

Fig. 2. Synthesized matrices X-ray diffraction patterns: (a) titanate-zirconate matrix with the pyrochlore structure; (b) matrix with the structure of orthorhombic REE titanate

Теплопроводность определяли расчетным методом на основании измеренных значений теплоемкости и температуропроводности по формуле (3):

$$\lambda = 1000000 \times a \times c \times \rho, \quad (3)$$

где a — коэффициент температуропроводности, м²/с; c — удельная теплоемкость, Дж/(г·К); λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ — плотность материала, т/м³.

Определение теплоемкости проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 404 F1 (Netzsch, ФРГ). Температуропроводность определяли с помощью измерителя теплофизических параметров твердых тел LFA 457 (Netzsch, ФРГ), использующего принцип лазерной вспышки [25, 26]. В обоих видах испытаний для каждого вида матриц проводилось по три параллельных измерения в диапазоне 50–500°C с шагом 50°C при скорости нагрева печи 3°C/мин.

ТКЛР определяли с применением горизонтально-го dilatометра с толкателем DIL 402 (Netzsch, ФРГ) в диапазоне температур от 20 до 500°C с шагом 20°C, скорость нагрева печи составляла 3°C/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как упоминалось ранее, в Российской Федерации единственной аттестованной конечной формой для иммобилизации ВАО является АФС, требования к ее качеству приведены в ГОСТ Р 50926-96¹¹. Исходными данными для формирования нормативного документа послужили показатели стекла, получаемого на ПО «Маяк» при отверждении коллективного потока жидких ВАО, образующихся при переработке ОЯТ различного генезиса. Для матриц с кристаллической структурой указанный стандарт применим весьма ограничено ввиду принципиальных отличий природы исследуемых материалов. Вместе с тем можно предположить, что перспективные матричные материалы будут внедряться в случае достижения ими сопоставимых или превосходящих значений по сравнению с представленными в нормативном документе. В связи с этим показатели физических свойств ГОСТ Р 50926-96 выбраны в качестве базовых для сравнения. Результаты испытаний с референтными значениями стандарта представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты исследования механических и теплофизических свойств

Table 2. Results of the study of mechanical and thermophysical properties

Вид испытаний Type of test	Показатели из ГОСТ Р 50926-96 GOST R 50926-96 requirements	Измеренные значения Measured values	
		Пирохлор Ln ₂ TiZrO ₇ Pyrochlore Ln ₂ TiZrO ₇	Орторомбический титанат РЗЭ Ln ₄ Ti ₉ O ₂₄ +TiO ₂ Orothorhombic REE titanate Ln ₄ Ti ₉ O ₂₄ +TiO ₂
Теплопроводность в интервале температур от 20 до 500°C, Вт/(м·К) Thermal conductivity in the temperature range from 20 to 500°C, W/(m·K)	1–2	0.91–1.18	1.54–1.71
ТКЛР в интервале температур от 20 до 500°C, К ⁻¹ · 10 ⁻⁶ , не более LETC in the temperature range from 20 to 500°C, К ⁻¹ · 10 ⁻⁶ , no more than	9	9.12–10.10	6.96–7.88
Модуль Юнга при сжатии, кН/м ² , не менее Young's modulus in compression, kN/m ² , no less than	5.4 · 10 ⁷	1.78 · 10 ⁸	2.15 · 10 ⁸
Предел прочности на сжатие, МПа, не менее Ultimate compressive strength, MPa, no less than	9	179 ± 26	150 ± 10
Предел прочности на изгиб, МПа, не менее Bending strength, MPa, no less than	41	57.8 ± 3.9	20.6 ± 4.0

¹¹ ГОСТ Р 50926-96. Государственный стандарт Российской Федерации. Отходы высокоактивные отвержденные. Общие технические требования. М.: Госстандарт России; 1997. [GOST R 50926-96. State Standard of the Russian Federation. High level solidified waste. General technical requirements. Moscow: Gosstandart Rossii; 1997.]

Как видно из данных табл. 2, значения модуля Юнга кристаллических матриц со структурами пироклора и орторомбического титаната РЗЭ достигают значений $2.15 \cdot 10^8$ кН/м², что весьма существенно превосходит требования, предъявляемые к остеклованным ВАО ($5.4 \cdot 10^7$ кН/м²). Тем самым снимаются вопросы штабелирования при контейнеризации, промежуточном хранении и захоронении.

Измеренные пределы прочности при сжатии укладываются в диапазон, свойственный распространенным техническим оксидным керамкам — от 30 МПа для строительной керамики до 300 МПа для технического корунда. Пределы прочности для пироклора и орторомбического титаната РЗЭ составили 179 и 150 МПа соответственно, в то время как для АФС данный показатель составляет 9 МПа.

Обычно предел прочности на сжатие керамического материала и модуль Юнга характеризуются величинами одного порядка. Многократная разница, наблюдаемая в случае исследуемых матриц, обусловлена присутствием в образцах некоторого количества пор. Усредненные показатели пределов прочности при изгибе составили 20.6 и 57.8 МПа для кристаллических матриц со структурами пироклора и орторомбического титаната РЗЭ соответственно. Полученные значения в 4–7 раз ниже показателей, измеренных при сжимающих нагрузках, что типично для конструкционной керамики. Как известно, изгиб является частным случаем одновременных сжатия и растяжения [27]. Ожидаемо низкий показатель обусловлен в том числе кристаллической структурой, сравнительно плохо воспринимающей изгибающие

нагрузки. Нивелировать эту особенность предполагается на этапе конструирования инженерных барьеров. Необходимая жесткость упаковки должна быть обеспечена боковой стенкой невозвратного контейнера, используемого для промежуточного хранения и захоронения.

Результаты определения теплоемкости образцов МПМ в диапазоне температур 50–500°C представлены на рис. 3.

Коэффициенты температуропроводности получали путем сравнения экспериментальной термограммы с теоретической моделью. Результаты определения, усредненные по трем параллельным измерениям образцов матриц каждого вида, представлены на рис. 4.

Зависимости теплопроводностей матриц от температуры, полученные расчетным путем, приведены на рис. 5.

Как видно из приведенных зависимостей, на теплопроводность материала существенно влияет его химический состав. Теплопроводность матрицы со структурой орторомбического титаната РЗЭ выше во всем диапазоне исследуемых температур, что, по-видимому, обусловлено вкладом фазы рутила, собственный показатель которого весьма высок и достигает 5.3 Вт/(м·К) при 473 К [31]. Показатели испытанных матриц варьируются от 0.9 до 1.7 Вт/(м·К) и практически полностью укладываются в диапазон 1–2 Вт/(м·К), регламентированный ГОСТ Р 50926-96. В целом же значения теплопроводности обеих матриц близки к характерному для оксидных керамик диапазону 0.8–1.5 Вт/(м·К), вариации внутри

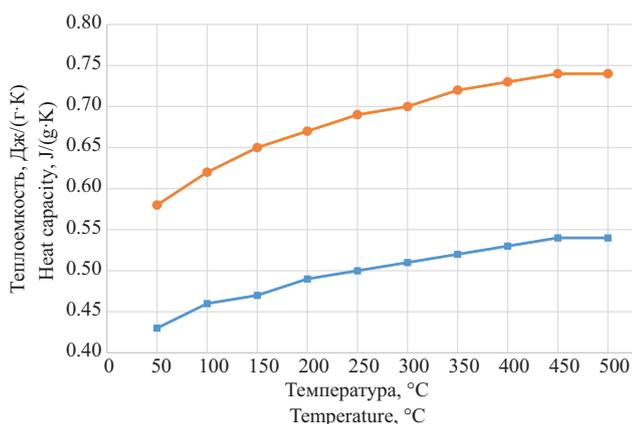


Рис. 3. Зависимости удельной теплоемкости кристаллических матриц от температуры (квадраты, синяя линия — матрица со структурой пироклора; круги, рыжая линия — матрица со структурой орторомбического титаната РЗЭ)

Fig. 3. Dependencies of the crystalline matrices specific heat on temperature (squares, blue line — a matrix with a pyrochlore structure; circles, red line — a matrix with structure of an orthorhombic REE titanate)

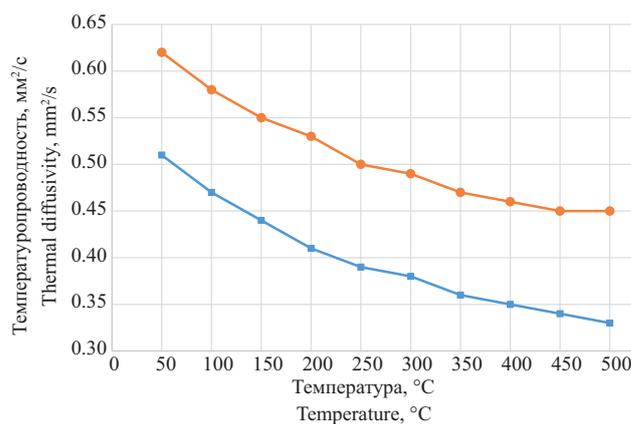


Рис. 4. Зависимости удельной температуропроводности кристаллических матриц от температуры (квадраты, синяя линия — матрица со структурой пироклора; круги, рыжая линия — матрица со структурой орторомбического титаната РЗЭ)

Fig. 4. Dependencies of the crystalline matrices specific thermal diffusivity on temperature (squares, blue line — a matrix with a pyrochlore structure; circles, red line — a matrix with structure of an orthorhombic REE titanate)

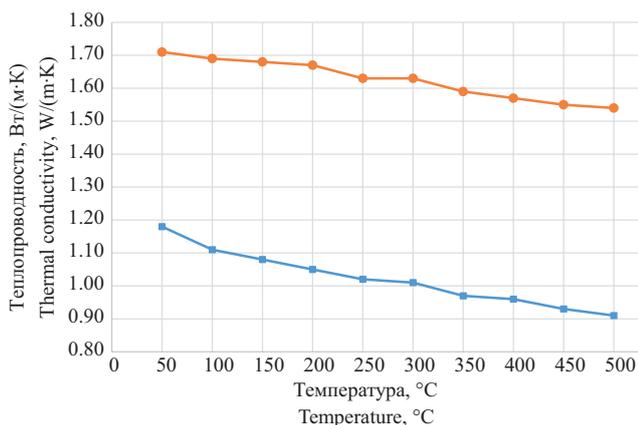


Рис. 5. Зависимости коэффициентов теплопроводности кристаллических матриц от температуры (квадраты, синяя линия — матрица со структурой пироклора; круги, рыжая линия — матрица со структурой орторомбического титаната РЗЭ)

Fig. 5. Dependencies of the thermal conductivity coefficients of crystalline matrices on temperature (squares, blue line — a matrix with a pyrochlore structure; circles, red line — a matrix with structure of anorthorhombic REE titanate)

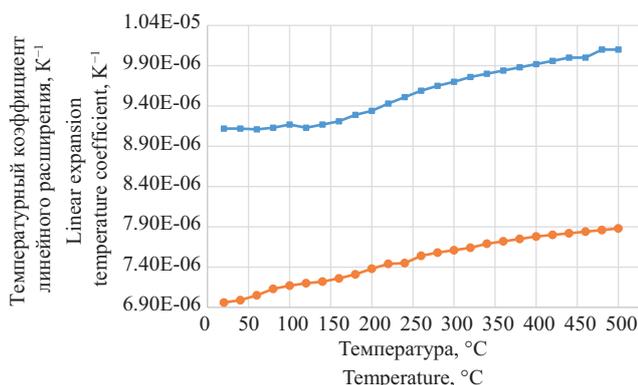


Рис. 6. Зависимости ТКЛР матриц от температуры (квадраты, синяя линия — матрица со структурой пироклора; круги, рыжая линия — матрица со структурой орторомбического титаната РЗЭ)

Fig. 6. Dependence of the matrices thermal expansion coefficient on temperature (squares, blue line — a matrix with a pyrochlore structure; circles, a red line — a matrix with an orthorhombic REE titanate structure)

которого обусловлены различиями химического состава и пористости материалов. К известным исключениям можно отнести керамики на основе Al_2O_3 , теплопроводность которых в диапазоне 100–1000°C может составлять от 30 до 6 Вт/(м·К). Снижение теплопроводности также типично для неметаллических материалов. Увеличение показателя может наблюдаться только в области температур выше 600°C для кварцевого стекла и нескольких типов полупрозрачных материалов для теплового излучения.

Определение ТКЛР осуществлялось в диапазоне температур от 20 до 500°C с шагом 20°C при скорости нагрева 3°C/мин. Испытания матрицы со структурой пироклора проводили для пяти параллельных образцов, со структурой орторомбического титаната РЗЭ — для трех. Результаты измерений представлены в графическом виде на рис. 6.

Как видно из рис. 6, в обоих случаях наблюдается плавный рост ТКЛР с увеличением температуры, что типично для подавляющего большинства видов технических керамик [29]. Увеличение показателя с ростом температуры является обычным для большинства твердых веществ и, в случае исследуемых материалов, свидетельствует об отсутствии аллотропных преобразований в процессе нагрева, при которых возможно снижение объема. Флуктуации, наблюдаемые при 100 и 240°C на кривых матриц со структурами пироклора и орторомбического титаната РЗЭ, обусловлены, по-видимому, погрешностями измерений.

Стоит отметить, что теплофизические и механические свойства исследуемых матриц близки к типичным показателям технической керамики и в основном соответствуют либо превосходят характеристики АФС, используемых для иммобилизации ВАО.

Таким образом, можно не без основания предварительно заключить, что кристаллические матрицы способны полноценно выполнять функцию конечных форм для иммобилизации соответствующих фракций ВАО. Применение материалов данного типа позволит повысить долговременную безопасность площадок промежуточного хранения и пунктов глубинного захоронения кондиционированных отходов. Особенности матриц, обусловленные их кристаллической структурой, не являются ограничением к их применению и нивелируются качествами инженерных барьеров, в частности, первичной упаковкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы определены механические и теплофизические свойства кристаллических матриц для иммобилизации РЗЭ-актинидной фракции, полученной в укрупненном масштабе с использованием способа, совмещающего гранулированного предшественника и его плавку в ИПХТ.

Установлено, что пределы прочности при сжатии матриц со структурами пироклора и орторомбического титаната РЗЭ в ~17–20 раз превосходят показатель, регламентированный для АФС. Данное обстоятельство указывает на возможность безопасного обращения с конечным продуктом в ходе манипуляций на этапах внутриобъектового перемещения, транспортировки к месту захоронения и, собственно, при захоронении.

Пределы прочности при изгибе меньше показателей стекла до 50%, что обусловлено природой кристаллического материала, плохо воспринимающего растягивающие нагрузки. Однако эта особенность может быть нивелирована жесткостью первичной упаковки.

Величины коэффициентов теплопроводности в интервале температур 50–500°C составляют от 0.91 до 1.71 Вт/(м·К) в зависимости от состава матрицы. ТКЛР характеризуется достаточно низкими значениями $(7-10) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что сравнимо с показателями корунда $(8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})$ и кварцевого стекла $(8.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})$.

В целом, механические и теплофизические свойства МПМ сопоставимы или превосходят регламентированные показатели консервативных конечных форм, что, в дополнение к другим преимуществам, подтверждает перспективность их применения для иммобилизации фракционированных отходов.

При внедрении технологии иммобилизации фракционированных ВАО необходимо уделить внимание разработке специализированных невозвратных контейнеров, учитывающих ТКЛР кристаллических матриц и сравнительно небольшие пределы прочности при изгибе.

Благодарности

Проект в рамках единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом» (ЕОП) ЕОП-ТЦПМ-25.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путилов А.В., Воробьев А.Г., Бугаенко М.В. Стратегия и практика обращения с радиоактивными отходами и их геологического захоронения. *Горный журнал*. 2015;10:6–10. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.01>
2. Гупало Т.А., Чистяков В.Н., Фещенко А.И., Суворова А.А., Шадрин А.Ю., Шмидт О.В. Кормилицын М.В., Осипенко А.Г. Технико-экономическое моделирование технологических схем подготовки высокоактивных отходов от переработки отработавшего ядерного топлива для окончательной изоляции. *Вопросы радиационной безопасности*. 2012;4(68):38–48.
3. Линге И.И., Уткин С.С., Кулагина Т.А., Трохов Н.Н. Подземная исследовательская лаборатория на участке «Енисейский» Нижнеканского массива Красноярского края. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2019;12(7):830–841.
4. Дорофеев А.Н., Большов Л.А., Линге И.И., Уткин С.С., Савельева Е.А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. *Радиоактивные отходы*. 2017;1(1):34–43.
5. Кочкин Б.Т., Богатов С.А. Перспективы использования скважинной концепции для удаления РАО в России. *Радиоактивные отходы*. 2022;2(19):85–99. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2022-2-85-99>

Acknowledgments

The project was undertaken under the Unified Industry Thematic Plan of Rosatom State Corporation ЕОП-ТТсРМ-25.

Вклад авторов

М.Ю. Каленова, И.В. Кузнецов, О.И. Стефановская, В.А. Степанов — выбор направления и методическое сопровождение исследования.

М.Ю. Каленова, И.В. Кузнецов, А.Ю. Зобкова — подготовка рукописи.

И.М. Мельникова, А.С. Щепин, К.В. Клемазов — сбор данных.

О.Н. Будин, К.В. Клемазов, В.А. Степанов, И.М. Мельникова — анализ и интерпретация результатов.

А.С. Щепин, О.Н. Будин — синтез образцов и пробоподготовка.

Authors' contributions

M.Yu. Kalenova, I.V. Kuznetsov, O.I. Stefanovskaya, V.A. Stepanov — study concept and methodological support.

M.Yu. Kalenova, I.V. Kuznetsov, A.Yu. Zobkova — draft manuscript preparation.

I.M. Melnikova, A.S. Shchepin, K.V. Klemazov — data collection.

O.N. Budin, V.A. Stepanov, K.V. Klemazov, I.M. Melnikova — analysis and interpretation of results.

A.S. Shchepin, O.N. Budin — specimen synthesis and sample preparation.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

1. Putilov A.V., Vorobiev A.G., Bugaenko M.V. The strategy and practice of radioactive waste management and their geological disposal. *Gornyi Zhurnal = Mining J*. 2015;10:6–10 (in Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.01>
2. Gupalo T.A., Chistyakov V.N., Feshchenko A.I., Suvorova A.A., Shadrin A.Yu., Schmidt O.V. Kormilitsyn M.V., Osipenko A.G. Technical and economic modeling of technological schemes of preparation of high level wastes from processing of spent nuclear fuel for final isolation. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Issues of Radiation Safety*. 2012;4(68):38–48 (in Russ.).
3. Linge I.I., Utkin S.S., Kulagina T.A., Trokhov N.N. Underground research laboratory in “the Yenisei” section of the Nizhnekansky massif of the Krasnoyarsk Region. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of the Siberian Federal University. Series: Technics and Technologies*. 2019;12(7):830–841 (in Russ.).
4. Dorofeev A.N., Bolshov L.A., Linge I.I., Utkin S.S., Savelyeva E.A. Strategic master plan for R&D demonstrating the safety of construction, operation and closure of a deep geological disposal facility for radioactive waste. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*. 2017;1(1):34–43 (in Russ.).

6. Кудрявцев Е.Г., Хаперская А.В. Проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом в России и перспективы их решения. *Российский химический журнал*. 2010;54(3):8–11.
7. Глаголенко Ю.В., Дзекун Е.Г., Дрожко Е.Г., Медведев Г.М., Ровный С.И., Сулов А.П. Стратегия обращения с радиоактивными отходами на производственном объединении «Маяк». *Вопросы радиационной безопасности*. 1996;2:3–10.
8. Ожован М.И., Полуэктов П.П. Стекла для иммобилизации ядерных отходов. *Природа*. 2010;3(1135):3–11.
9. Алой А.С., Блохин А.И., Блохин П.А., Ковалев Н.В. Радиационные характеристики боросиликатного стекла, содержащего высокоактивные отходы. *Радиоактивные отходы*. 2020;3(12):93–100. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-3-93-100>
10. Алой А.С., Трофименко А.В., Кольцова Т.И., Никандрова М.В. Физико-химические характеристики остеклованных модельных ВАО ОДЦ ГХК. *Радиоактивные отходы*. 2018;4(5):67–75.
11. Логунов М.В., Ворошилов Ю.А., Бабаин В.А., Скобцов А.С. Опыт освоения, промышленной эксплуатации и оптимизации комплексной экстракционно-осадительной технологии фракционирования жидких высокоактивных отходов на ПО «МАЯК». *Радиохимия*. 2020;62(6):463–484. <https://doi.org/10.31857/S0033831120060027>
12. Тананаев И.Г., Мясоедов Б.Ф. Методы и подходы к технологическому выделению ценных радионуклидов из отработавшего ядерного топлива. *Радиохимия*. 2016;58(3):222–228.
13. Баторшин Г.Ш., Кириллов С.Н., Смирнов И.В., Сарычев Г.А., Тананаев И.Г., Фёдорова О.В., Мясоедов Б.Ф. Комплексное выделение ценных компонентов из техногенных радиоактивных отходов как вариант создания рентабельного ЗЯТЦ. *Вопросы радиационной безопасности*. 2015;3(79):30–36.
14. Salvatores M., Palmiotti G. Radioactive waste partitioning and transmutation within advanced fuel cycles: Achievements and challenges. *Progress in Particle and Nuclear Physics*. 2011;66(1):144–166. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2010.10.001>
15. Мамчи́ч М.В., Голецкий Н.Д., Ткаченко Л.И., Визный А.Н., Наумов А.А., Белова Е.В., Пузиков Е.А., Зильберман Б.Я. Разработка и проверка схемы фракционирования ВАО с использованием экстрагента TODGA в «легком» растворителе. *Радиохимия*. 2021;63(4):372–380. <https://doi.org/10.31857/S0033831121040092>
16. Wei Y.Z., Wang X.P., Liu R.Q., Wu Y., Usuda S., Arai T. An advanced partitioning process for key elements separation from high level liquid waste. *Sci. China Chem.* 2012;55(9):1726–1731. <https://doi.org/10.1007/s11426-012-4697-4>
17. Iqbal M., Waheed K., Rahat S.B., Lee T.M., Lee M.S. An overview of molecular extractants in room temperature ionic liquids and task specific ionic liquids for the partitioning of actinides/lanthanides. *J. Radioanal. Nuclear Chem.* 2020;325(1):1–31. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07199-1>
18. Nayak P.K., Kumaresan R., Venkatesan K.A., Antony M.P., Vasudeva Rao P.R. A New Method for Partitioning of Trivalent Actinides from High-Level Liquid Waste. *Sep. Sci. Technol.* 2013;48(9):1409–1416. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.737401>
19. Awwad N.S. Introductory Chapter: From the Cradle to the Grave for the Nuclear Fuel Cycle. In: Awwad N.S. (Ed.). *Nuclear Power Plants – The Processes from the Cradle to the Grave*. London: IntechOpen; 2021. 168 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87697>
5. Kochkin B.T., Bogatov S.A. Borehole RW disposal concept and prospects of its implementation in Russia. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*. 2022;2(19):85–99 (in Russ). <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2022-2-85-99>
6. Kudryavtsev E.G. Khaperskaya A.V. Problems of SNF handling in Russia and prospects for their solution. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal = Russ. Chem. J.* 2010;54(3):8–11 (in Russ.).
7. Glagolenko Yu.V., Dzekun E.G., Drozhko E.G. Medvedev G.M., Rovnyi S.I., Suslov A.P. Strategy for handling radioactive waste at the Mayak production association. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Issues of Radiation Safety*. 1996;2:3–10 (in Russ.).
8. Ozhovan M.I., Poluektov P.P. Glasses for immobilization of nuclear waste. *Priroda J.* 2010;3(1135):3–11 (in Russ.).
9. Aloy A.S., Blokhin A.I., Blokhin P.A., Kovalev N.V. Radiation characteristics of borosilicate glass containing high-level waste. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*. 2020;3(12):93–100 (in Russ.). <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-3-93-100>
10. Aloy A.S., Trofimenko A.V., Koltsova T.I., Nikandrova M.V. Physico-chemical characteristics of vitrified simulated HLW at EDC MCC. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*. 2018;4(5):67–75 (in Russ.).
11. Logunov M.V., Voroshilov Yu.A., Babain V.A., Skobtsov A.S. Experience of Mastering, Industrial Exploitation, and Optimization of the Integrated Extraction–Precipitation Technology for Fractionation of Liquid High-Activity Wastes at Mayak Production Association. *Radiochemistry*. 2020;62(6):700–722. <https://doi.org/10.1134/S1066362220060028> [Original Russian Text: Logunov M.V., Voroshilov Yu.A., Babain V.A., Skobtsov A.S. Experience of Mastering, Industrial Exploitation, and Optimization of the Integrated Extraction–Precipitation Technology for Fractionation of Liquid High-Activity Wastes at Mayak Production Association. *Radiokhimiya*. 2020;62(6):463–484 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033831120060027>]
12. Tananaev I.G., Myasoedov B.F. Commercial recovery of valuable radionuclides from spent nuclear fuel: Methods and approaches. *Radiochemistry*. 2016;58(3):257–264. <https://doi.org/10.1134/S1066362216030061> [Original Russian Text: Tananaev I.G., Myasoedov B.F. Commercial recovery of valuable radionuclides from spent nuclear fuel: Methods and approaches. *Radiokhimiya*. 2016;58(3):222–228 (in Russ.).]
13. Batorshin G.Sh., Kirillov S.N., Smirnov I.V., Sarychev G.A., Tananaev I.G., Fedorova O.V., Myasoedov B.F. Complex extraction of valuable components from anthropogenic waste as an option of establishing cost-effective closed nuclear fuel cycle. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Issues of Radiation Safety*. 2015;3(79):30–36 (in Russ.).
14. Salvatores M., Palmiotti G. Radioactive waste partitioning and transmutation within advanced fuel cycles: Achievements and challenges. *Progress in Particle and Nuclear Physics*. 2011;66(1):144–166. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2010.10.001>
15. Mamchich M.V., Goletsky N.D., Tkachenko L.I., Vyznyi A.N., Naumov A.A., Puzikov E.A., Zil'berman B.Y., Belova E.V. Development and Verification of a Scheme for Fractionation of HAWs with TODGA Extractive Agent in a “Light” Diluent. *Radiochemistry*. 2021;63(4):462–469. <https://doi.org/10.1134/S1066362221040093> [Original Russian Text: Mamchich M.V., Goletsky N.D., Tkachenko L.I., Vyznyi A.N., Naumov A.A., Belova E.V., Puzikov E.A., Zil'berman B.Y. Development and Verification of a Scheme for Fractionation of HAWs with TODGA Extractive Agent in a “Light” Diluent. *Radiokhimiya*. 2021;63(4):372–380 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033831121040092>]

20. Богданов Р.В., Кузнецов Р.А., Епимахов В.Н., Олейник М.С., Епимахов Т.В. *Способ иммобилизации стронций-цезиевой фракции высокоактивных отходов включением в геокерамические матрицы*: Пат. RU 2561508С1. Заявка № 2014117398/07, заявл. 29.04.2014; опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.
21. Юдинцев С.В., Никольский М.С., Никонов Б.С., Мальковский В.И. Матрицы для изоляции актинидных отходов в глубоком скважинном хранилище. *Доклады Академии наук*. 2018;480(2):217–222. <https://doi.org/10.7868/S0869565218140177>
22. Алексеева Л.С., Нохрин А.В., Каразанов К.О., Орлова А.И., Болдин М.С., Ланцев Е.А., Мурашов А.А., Чувильдеев В.Н. Исследование механических свойств и стойкости к термоудару мелкозернистой керамики YAG:ND/SiC. *Неорганические материалы*. 2022;58(2):209–214.
23. Юдинцев С.В. Изоляция фракционированных отходов ядерной энергетики. *Радиохимия*. 2021;63(5):403–430. <https://doi.org/10.31857/S0033831121050014>
24. Юдинцев С.В. Титанаты лантанидов – потенциальные матрицы для иммобилизации актинидных отходов. *Доклады Академии наук*. 2015;460(4):453–458. <https://doi.org/10.7868/S0869565215040192>
25. Баранов В.Г., Тенишев А.В., Лунёв А.В., Покровский С.А., Хлунов А.В. Высокотемпературные измерения температуропроводности реакторных материалов методом лазерной вспышки. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2011;2(4):291–302.
26. Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А. Определение коэффициента температуропроводности прозрачных материалов модифицированным методом лазерной вспышки. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2020;84(7):1004–1009. <https://doi.org/10.31857/S036767652007011X>
27. Межецкий Г.Д., Загребин Г.Г., Решетник Н.Н. *Сопротивление материалов*. 5-ое изд. М.: Дашков и К; 2016. 432 с.
28. Охотин А.С. *Теплопроводность твердых тел*. М.: Энергоатомиздат; 1984. 312 с.
29. Толкачева А.С., Павлова И.А. *Общие вопросы технологии тонкой керамики*. Екатеринбург: Изд-во УрФУ; 2018. 184 с.
16. Wei Y.Z., Wang X.P., Liu R.Q., Wu Y., Usuda S., Arai T. An advanced partitioning process for key elements separation from high level liquid waste. *Sci. China Chem*. 2012;55(9):1726–1731. <https://doi.org/10.1007/s11426-012-4697-4>
17. Iqbal M., Waheed K., Rahat S.B., Lee T.M., Lee M.S. An overview of molecular extractants in room temperature ionic liquids and task specific ionic liquids for the partitioning of actinides/lanthanides. *J. Radioanal. Nuclear Chem*. 2020;325(1):1–31. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07199-1>
18. Nayak P.K., Kumaresan R, Venkatesan K.A., Antony M.P., Vasudeva Rao P.R. A New Method for Partitioning of Trivalent Actinides from High-Level Liquid Waste. *Sep. Sci. Technol*. 2013;48(9):1409–1416. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.737401>
19. Awwad N.S. Introductory Chapter: From the Cradle to the Grave for the Nuclear Fuel Cycle. In: Awwad N.S. (Ed.). *Nuclear Power Plants – The Processes from the Cradle to the Grave*. London: IntechOpen; 2021. 168 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87697>
20. Bogdanov R.V., Kuznetsov R.A., Epimakhov V.N., Oleinik M.S., Epimakhov T.V. *Method for immobilization of strontium-cesium fraction of highly active wastes by incorporation into geo-ceramic matrices*: Pat. RU2561508C1. Publ. 27.08.2015 (in Russ.).
21. Yudin S.V., Nikolskii M.S., Nikonov B.S., Malkovskii V.I. Matrices for isolation of actinide wastes in a deep well repository. *Dokl. Earth Sci*. 2018;480(1):631–636. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18050203> [Original Russian Text: Yudin S.V., Nikolskii M.S., Nikonov B.S., Malkovskii V.I. Matrices for isolation of actinide wastes in a deep well repository. *Doklady Akademii Nauk*. 2018;480(2):217–222 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565218140177>]
22. Alekseeva L.S., Nokhrin A.V., Karazanov K.O., et al. Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of Fine-Grained Nd:YAG/SiC Ceramics. *Inorg. Mater*. 2022;58(2):199–204. <https://doi.org/10.1134/S0020168522020017> [Original Russian Text: Alekseeva L.S., Nokhrin A.V., Karazanov K.O., Orlova A.I., Boldin M.S., Lantsev E.A., Murashov A.A., Chuvildeev V.N. Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of Fine-Grained Nd:YAG/SiC Ceramics. *Neorganicheskie Materialy*. 2022;58(2):209–214 (in Russ.)]
23. Yudin S.V. Isolation of Separated Waste of Nuclear Industry. *Radiochemistry*. 2021;63(5):527–555. <https://doi.org/10.1134/S1066362221050015> [Original Russian Text: Yudin S.V. Isolation of Separated Waste of Nuclear Industry. *Radiokhimiya*. 2021;63(5):403–430 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033831121050014>]
24. Yudin S.V. Lanthanide titanates as promising matrices for immobilization of actinide wastes. *Dokl. Earth Sci*. 2015;460(2):130–136. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15020051> [Original Russian Text: Yudin S.V. Lanthanide titanates as promising matrices for immobilization of actinide wastes. *Doklady Akademii Nauk*. 2015;460(4):453–458 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565215040192>]
25. Baranov V.G., Tishchev A.V., Lunev A.V., Pokrovskii S.A., Khlunov A.V. High-temperature measurements of thermal conductivity of reactor materials by laser flash. *Yadernaya fizika i inzhiniring = Nuclear Physics and Engineering*. 2011;2(4):291–302 (in Russ.).

26. Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Golovin D.Yu., *et al.* Determining the Temperature Diffusivity of Transparent Materials via a Modified Laser Flash Technique. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics.* 2020;84(7):829–834. <https://doi.org/10.3103/S1062873820070114>
[Original Russian Text: Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Golovin D. Yu., Samodurov A.A. Determining the Temperature Diffusivity of Transparent Materials via a Modified Laser Flash Technique. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya.* 2020;84(7):1004–1009 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S036767652007011X>]
27. Mezhetskii G.D., Zagrebin G.G., Reshetnik N.N. *Soprotivlenie materialov (Strength of Materials)*. Moscow: Dashkov i K; 2016. 432 p. (in Russ.).
28. Okhotin A.S. *Teploprovodnost' tverdykh tel (Thermal Conductivity of Solids)*. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 312 p. (in Russ.).
29. Tolkacheva A.S., Pavlova I.A. *Obshchie voprosy tekhnologii tonkoi keramiki (General issues of fine ceramics technology)*. Yekaterinburg: UrFU; 2018. 184 p. (in Russ.).

Об авторах

Кузнецов Иван Владимирович, к.т.н., начальник лаборатории методов обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами, АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии им. Б.Н. Ласкорина» (АО «ВНИИХТ им. Б.Н. Ласкорина») (115524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). E-mail: ivan7501966@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 4266-0115, <https://orcid.org/0000-0002-0904-6959>

Зобкова Анна Юрьевна, к.т.н., ведущий инженер лаборатории высокотемпературной химии и электрохимии, АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии им. Б.Н. Ласкорина» (АО «ВНИИХТ им. Б.Н. Ласкорина») (115524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). E-mail: anna-zobkova@mail.ru

Каленова Майя Юрьевна, к.т.н., начальник отделения «Химические технологии замкнутого ядерного топливного цикла», АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии им. Б.Н. Ласкорина» (АО «ВНИИХТ им. Б.Н. Ласкорина») (115524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). E-mail: kalenovamu@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4093-7589>

Щепин Андрей Станиславович, ведущий инженер лаборатории методов обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами, АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии им. Б.Н. Ласкорина» (АО «ВНИИХТ им. Б.Н. Ласкорина») (115524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). E-mail: a.s.schepin@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 8370-7976, <https://orcid.org/0000-0002-8712-043X>

Будин Олег Николаевич, ведущий инженер лаборатории методов обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами, АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии им. Б.Н. Ласкорина» (АО «ВНИИХТ им. Б.Н. Ласкорина») (115524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). E-mail: o.n.budin@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 5910-6649, <https://orcid.org/0000-0002-8712-043X>

Степанов Владимир Александрович, д.ф.-м.н., профессор, начальник отделения лазерных и плазменных технологий (Отделение ЛаПлаз), Обнинский институт атомной энергетики – филиал ФГАОУ ВО Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (249039, Россия, Калужская область, Обнинск, тер. Студгородок, д. 1). E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru. Scopus Author ID 7402659774, ResearcherID C-8683-2018, SPIN-код РИНЦ 7646-7744, <https://orcid.org/0000-0003-0869-6711>

Мельникова Ирина Михайловна, младший научный сотрудник испытательного аналитического центра, АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии им. Б.Н. Ласкорина» (АО «ВНИИХТ им. Б.Н. Ласкорина») (115524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). E-mail: irina.sokolova95@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 3683-3317, <https://orcid.org/0000-0002-3666-084X>

Стефановская Ольга Ивановна, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории радиоэкологических и радиационных проблем, ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН) (119071, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4). E-mail: olga-stef@yandex.ru. Scopus Author ID 14623103700, <https://orcid.org/0000-0002-3079-8637>

Клемазов Кирилл Валерьевич, преподаватель Института лазерных и плазменных технологий (Отделение ЛаПлаз), Обнинский институт атомной энергетики – филиал ФГАОУ ВО Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (249039, Россия, Калужская область, Обнинск, тер. Студгородок, д. 1). E-mail: klemazov_kirill@mail.ru. Scopus Author ID 57212564605, SPIN-код РИНЦ 3642-0455, <https://orcid.org/0000-0002-4959-3244>

About the authors

Ivan V. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Methods of Handling Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste, Laskorin Leading Research Institute of Chemical Technology “VNIHT” (2-1, Electrodnaya ul., Moscow, 115524, Russia). E-mail: ivan7501966@mail.ru. RSCI SPIN-code 4266-0115, <https://orcid.org/0000-0002-0904-6959>

Anna Yu. Zobkova, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, Laboratory of High-Temperature Chemistry and Electrochemistry, Laskorin Leading Research Institute of Chemical Technology “VNIHT” (2-1, Electrodnaya ul., Moscow, 115524, Russia). E-mail: anna-zobkova@mail.ru

Maya Yu. Kalenova, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department “Chemical Technologies of Closed Nuclear Fuel Cycle,” Laskorin Leading Research Institute of Chemical Technology “VNIHT” (2-1, Electrodnaya ul., Moscow, 115524, Russia). E-mail: kalenovamu@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4093-7589>

Andrey S. Shchepin, Leading Engineer, Laboratory of Methods of Handling Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste, Laskorin Leading Research Institute of Chemical Technology “VNIHT” (2-1, Electrodnaya ul., Moscow, 115524, Russia). E-mail: a.s.schepin@gmail.com. RSCI SPIN-code 8370-7976, <https://orcid.org/0000-0002-8712-043X>

Oleg N. Budin, Leading Engineer, Laboratory of Methods of Handling Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste, Laskorin Leading Research Institute of Chemical Technology “VNIHT” (2-1, Electrodnaya ul., Moscow, 115524, Russia). E-mail: o.n.budin@gmail.com. RSCI SPIN-code 5910-6649, <https://orcid.org/0000-0002-8712-043X>

Vladimir A. Stepanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Laser and Plasma Technologies (LaPlaz Department), Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering – The Branch of National Research Nuclear University MEPhI (1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga oblast, 249039, Russia). E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru. Scopus Author ID 7402659774, ResearcherID C-8683-2018, RSCI SPIN-code 7646-7744, <https://orcid.org/0000-0003-0869-6711>

Irina M. Melnikova, Junior Researcher, Testing Analytical Center, Laskorin Leading Research Institute of Chemical Technology “VNIHT” (2-1, Electrodnaya ul., Moscow, 115524, Russia). E-mail: irina.sokolova95@yandex.ru. RSCI SPIN-code 3683-3317, <https://orcid.org/0000-0002-3666-084X>

Olga I. Stefanovskaya, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Radioecological and Radiation Problems, A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences (31, Leninskii pr., Moscow, 119071, Russia). E-mail: olga-stef@yandex.ru. Scopus Author ID 14623103700, <https://orcid.org/0000-0002-3079-8637>

Kirill V. Klemazov, Lecturer, Institute of Laser and Plasma Technologies (LaPlaz Department), Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering – The Branch of National Research Nuclear University MEPhI (1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga oblast, 249039, Russia). E-mail: klemazov_kirill@mail.ru. Scopus Author ID 57212564605, RSCI SPIN-code 3642-0455, <https://orcid.org/0000-0002-4959-3244>