

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.34:622
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-71-77



СЛОЖНООКСИДНАЯ КЕРАМИКА РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Шарипзянова Г.Х.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Abstract. Статья посвящена проблеме улучшения эксплуатационных показателей систем ядерных реакторов, актуальность которой возрастает с развитием научно-технического и технологического прогресса. Одним из условий успешного применения керамических материалов в качестве поглощающих элементов для реакторов на тепловых нейтронах является детальное изучение их микроструктуры и эксплуатационных свойств. Керамика на основе гафната и оксидов редкоземельных элементов в определенных условиях показывает высокую термостойкость и радиационную устойчивость, поэтому для достижения оптимальных нормативных эксплуатационных характеристик применяемых материалов крайне важно контролировать условия получения сложнооксидной керамики, что позволяет получить однофазные структуры с высокой плотностью и идеальной в данных условиях флюоритной решеткой. Такой подход к решению проблемы еще на стадии проектирования не только улучшает поглощающие свойства материалов, но и значительно увеличивает срок их службы в условиях высоких температур и нейтронного облучения. Исследования показывают, что добавление определенных оксидов редкоземельных металлов способствует улучшению механических свойств материалов, что делает их более долговечными и эффективными. Дальнейшее развитие этого направления открывает новые горизонты для повышения безопасности и эффективности ядерной энергетики. Материалы статьи представляют интерес при модернизации технологических процессов ядерных технологий на стадии проектирования и начального освоения, а также при подготовке специалистов высшей квалификации. Полученные в ходе комплексных исследований результаты нуждаются в дальнейшем осмысливании. Результаты исследований также показали, что гафнат диспрозия, как и другие материалы с неупорядоченной структурой, обладают высокой радиационной стойкостью. Установлено, что изменение состава обуславливает синтез, а использование различных методов позволяет получать материалы с дифференцированными свойствами, что непосредственно влияет на физические и эксплуатационные характеристики.

Keywords: керамика, синтез, ядерный реактор, поглощающий элемент, оптические покрытия

© Шарипзянова Г.Х., 2025

Для цитирования

Шарипзянова Г.Х. Сложнооксидная керамика редкоземельных элементов для ядерных реакторов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 71-77.
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-71-77>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

COMPLEX OXIDE CERAMICS OF RARE EARTH ELEMENTS FOR NUCLEAR REACTORS

Sharipzyanova G.Kh.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Аннотация. The article is devoted to the problem of improving the operational performance of nuclear reactor systems, the relevance of which increases with the development of scientific, technical and technological progress. One of the conditions for the successful use of ceramic materials as absorbing elements for thermal neutron reactors is a detailed study of their microstructure and operational properties. Ceramics based on hafnates and oxides of rare earth elements under certain conditions shows high heat resistance and radiation resistance, therefore, in order to achieve optimal regulatory operational characteristics of the materials used, it is extremely important to control the conditions for obtaining complex oxide ceramics, which allows obtaining single-phase structures with high density and an ideal fluorite lattice in these conditions. Such an approach to solving the problem at the design stage not only improves the absorbing properties of materials, but also significantly increases their service life under high temperatures and neutron irradiation. Research shows that adding certain rare earth metal oxides improves the mechanical properties of materials, making them more durable and efficient. Further development of this area opens up new horizons for improving the safety and efficiency of nuclear power. The materials of the article are of interest in modernizing technological processes of nuclear technologies at the design and initial development stage, as well as in training highly qualified specialists and ordinary readers. The results obtained in the course of complex studies require further understanding. The results of the studies also showed that dysprosium hafnate, like other materials with a disordered structure, have high radiation resistance. It has been established that a change in composition determines synthesis, and the use of various methods allows obtaining materials with differentiated properties, which directly affects the physical and operational characteristics.

Ключевые слова: ceramics, synthesis, technology, nuclear reactor, absorbing element

For citation

Sharipzyanova G.Kh. Complex Oxide Ceramics of Rare Earth Elements for Nuclear Reactors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 71-77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-71-77>

Введение

Прогресс постиндустриального периода требует создания новых материалов с уникальными свойствами, которые должны обеспечить эффективную работу износостойких и термостойких материалов для энергетического и иного высокотехнологичного оборудования. Гафнаты редкоземельных элементов могут быть использованы как носители катализаторов при использовании термбарьерных покрытий для получения сверхпроводящих материалов, люминофоров и других уникальных материалов.

В связи с проектированием перспективных реакторных установок нового поколения выбор поглощающего материала для кластерного органа регулирования (КРО) становится критически важным этапом. В настоящее время во многих установках в качестве материала для поглощающих элементов (ПЭЛ) используется карбид бора, который отличается своей высокой физической и химической стабильностью при тепловых воздействиях, а также низкой активностью. Его эффективность состоит в поглощении нейтронов изотопом ^{10}B , поэтому он используется для регулирования выделения энергии в реакторах на быстрых нейтронах. Кроме того, сравнительно низкая стоимость и минимальная наведённая активность отработавших стержней значительно упрощают и удешевляют процесс хранения и переработки.

Современные ПЭЛ основаны на сложных оксидах лантаноидов [1, 2], таких как диспрозий и европий, что улучшает их технологические характеристики и расширяет возможности для эффективного контроля ядерных реакций [3].

Сложнооксидная керамика, основанная на оксидах редкоземельных элементов, представляет собой линейку уникальных материалов с большим потенциалом для их применения в качестве поглощающих элементов в ядерных реакторах [3, 4]. Эти материалы обладают рядом значимых свойств, делающих их особенно привлекательными для использования в качестве поглощающих элементов в современных установках ядерного реактора.

Сложнооксидная керамика редкоземельных элементов характеризуется высокой плотностью, что позволяет ей эффективно замедлять и поглощать нейтроны [5, 6].

Одной из ключевых проблем при эксплуатации ядерных реакторов является коррозия материалов в условиях повышенной температуры и давления. Сложнооксидная керамика демонстрирует высокую устойчивость к коррозии в водяном паре, что значительно повышает их долговечность [7, 8]. Материалы для ядерных реакторов должны выдерживать интенсивное облучение без существенной потери своих свойств. Керамика на основе редкоземельных элементов обладает высокой радиационной стойкостью, что позволяет использовать ее в течение длительного времени.

Учитывая перечисленные выше преимущества, сложнооксидная керамика редкоземельных элементов рассматривается как перспективный материал для создания новых поколений поглощающих элементов ядерных реакторов. Она может способствовать повышению безопасности и эффективности эксплуатации ядерных установок [8, 9].

Перед внедрением керамики в промышленное производство необходимо провести исследования, направленные на оптимизацию ее свойств и разработку соответствующих технологий производства [10, 11].

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовались следующие исходные материалы:

- оксиды редкоземельных элементов;
- реагенты для проведения золь-гель-синтеза;
- газовые среды: в качестве газовой среды при термической обработке материалов используется вакуум;
- подложки: используются различные подложки для нанесения тонких пленок, материал не уточняется.

Методы синтеза материалов:

- Твердофазный синтез: исходные оксиды тщательно обрабатывались в заданных молярных соединениях, затем проводилась термообработка при высоких температурах (до 1600 °C) для получения поликристаллических порошков.
- Гибридный золь-гель-синтез: применялся для получения сложных оксидных соединений. Золь-гель-метод основан на введении легирующих добавок на основе растворов солей или алкоксидов в спирты с последующей термической обработкой для формирования оксидной структуры.
- Механическое перемещение: порошки перемещаются механическим способом для последовательного прессования в таблетках.

Методы формирования образцов:

- Горячее прессование: для получения более плотных и прочных таблеток-мишеней диаметром 80-100 мм применялось горячее прессование при температуре 1600°C и давлении 300 МПа.
- Электронно-лучевое напыление: для нанесения тонких пленок на подложки.
- Магнетронное напыление: для нанесения тонких пленок на подложки.

Методы исследования:

- Рентгенофазовый анализ: для определения фазового состава и кристаллической структуры полученных порошков и пленок используют механический дифрактометр.
- Элементный анализ: применялся для определения содержания элементов в электронных соединениях и пленках.
- Оптическая спектроскопия: изучались оптические характеристики, включая коэффициент пропускания и отражения пленок.
- Механические испытания: оценивалась механическая прочность, адгезия и твердость тонких пленок.

- Испытания на влагостойкость: проводились для оценки устойчивости пленки к влажной среде.
- Испытания на радиационную стойкость: оценивалась устойчивость материалов к радиационному климату.
- Термическая обработка: проводилась для изменения плотности и снижения пористости таблетки.
- Коррозионные испытания: для оценки устойчивости к коррозии.

Полученные результаты и их обсуждение

Материалы, обладающие кристаллической структурой типа флюорита, создают уникальную устойчивость к радиационному солнечному свету. Это свойство, подтвержденное как экспериментальными исследованиями, так и теоретическими выводами, позволяет им сохранять свои характеристики даже в условиях интенсивного воздействия [12, 13].

Кристаллические структуры с большим количеством хаотично созданных вакансий в ионной решетке характеризуются тем, что атомы, смешанные со своих позиций под влиянием излучения, не могут перемещаться на значительные расстояния [14].

В области узнаваемости нейтронов гафнат диспрозия проявляет себя с повышенной эффективностью [15, 16]. В спектре нейтронов, разрядам для водо-водяных реакторов, таких как ВВЭР-1000, этот материал находится на 8-10%, что позволяет обеспечить устойчивость нейтронов по сравнению с титанатом диспрозия и сплавом 80%Ag-15%In-5%Cd [17].

Такое превосходство обусловлено особенностями атомного состава гафната диспрозия. Изотопы диспрозия (156Dy, 158Dy, 160Dy, 161Dy, 162Dy, 163Dy и 164Dy) играют ключевую роль в группировке нейтронов, в их структуру входят изотопы гафния (174Hf и 177Hf), образующие значительные резонансные соединения в промежуточной части энергетического ядра нейтронов [18].

Важно отметить, что размеры распределения нейтронов для изотопов диспрозия и гафния в различных диапазонах энергий различны. Это позволяет, изменения пропорцию Dy/Hf в составе материала, целенаправленно регулировать его эффективность разделения, сохранив при этом кристаллическую структуру флюорита.

Возможно частичное замещение оксидов диспрозия и гафния в исходных источниках на химические аналоги. Так, оксид диспрозия может быть частично заменен оксидами других редкоземельных элементов, таких как гадолиний, эрбий или иттрий, оксид гафния – оксидом циркония. Благодаря химическому сходству этих элементов, такие преобразования не приводят к появлению дефектов кристаллической структуры материала и не снижают его высокую устойчивость к радиационному солнечному свету. В силу этих условий гафнат диспрозия представляет собой универсальный материал для объединения нейтронов с широким спектром возможностей для «настройки» его эффективности [19].

Технологические преимущества гафната диспрозия обусловили его стабильную однофазную структуру флюоритного твердого раствора во всех температурных условиях – от температуры нагрева до точки плавления [20].

Регулируя расположение Dy/Hf, можно точно «настроить» способность гафната диспрозия поглощать нейтроны [21].

Наиболее перспективны для тепловых водоохлаждаемых ядерных реакторов органы регулирования на основе гамма-поглотителей. В них образуются газообразные продукты ядерных реакций и они характеризуются более высокой, по сравнению с борсодержащими поглотителями, радиационной стойкостью [22]. Проведенные исследования показали, что перспективные поглощающие материалы для органов регулирования тепловых реакторов из гафната и титаната диспрозия в наибольшей степени соответствуют критериям работоспособности при длительной (более 15 лет) работе в АЗ ЯР ВВЭР-1000.

Первые опытные испытания поглощающих элементов с титанатом диспрозия в 5-м блоке НВАЭС позволили увеличить ресурсные характеристики в режиме автоматического регулирования до 4-х лет вместо 2-х лет штатных ПЭлов с карбидом бора. Проведенные материаловедческие исследования показали, что ресурс ПЭлов с Dy_2TiO_5 далеко не исчерпан и эксплуатация их может быть продолжена [23].

Более 17 лет стержни СУЗ с титанатом диспрозия успешно отработали в исследовательском ядерном реакторе МИР, достигнув флюенса быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$). По сравнению с титанатом диспрозия, гафнант диспрозия имеет ряд дополнительных эксплуатационных преимуществ: более высокую радиационную и коррозионную стойкость, возможность одновременного использования его в качестве поглощающего и конструкционного материала, более высокую исходную эффективность поглощения нейтронов, меньшую скорость выгорания поглощающих изотопов [26].

Использование гибридного золь-гель-метода открывает возможности для создания сложных оксидных соединений с разнообразным химическим составом. Точное соблюдение стехиометрических соотношений достигается путем строгого дозирования исходных компонентов и контроля параметров процесса, таких как температура реакции и интенсивность перемешивания.

Введение легирующих примесей на основе редкоземельных элементов осуществляется как посредством растворов алкоксидов в спиртовой среде, так и с применением растворов солей. Данный подход позволяет синтезировать порошкообразные сложные оксиды, имеющие структуру первокита, цеолита или граната и модифицированные различными редкоземельными элементами. Полученные материалы могут быть востребованы не только в керамическом производстве, но и в качестве катализаторов для органического синтеза. Применение данных порошков для создания керамических изделий позволяет значительно сократить затраты на оборудование и энергопотребление по сравнению с технологией выращивания монокристаллов [27].

Тонкие пленки, используемые в оптике, находят широкайшее применение в самых сложных областях, от точного приборостроения и исследований до лазерных технологий, спектроскопии и астрономических исследований.

В области материаловедения оксидные соединения представляют собой обширный класс веществ, уникаль-

ные физические и химические свойства открывают широкие перспективы для их применения в различных высокотехнологичных отраслях. Отличительной особенностью оксидных материалов является их устойчивость к экстремально высоким температурам, интенсивным механическим воздействиям, ионизирующему излучению, а также к агрессивным химическим средам. Пленки, созданные на основе оксидов, проявляют поразительную стойкость к этим факторам, что делает их незаменимыми в условиях, где требуется надежность и эксплуатация [28, 29].

Одной из наиболее важных характеристик оксидных материалов, обуславливающих их широкое применение в оптике, является их показатель преломления, который может заключаться в интервале от 1,45 до 2,6. Именно эта возможность позволяет использовать оксидные пленки в качестве слоев с различными проявлениями преломления, создавать многослойные оптические покрытия, способные эффективно работать в широком спектральном контексте. Многослойные покрытия дают желаемые оптические свойства, такие как превосходное рассеивание, отражение, или особые спектральные характеристики.

В результате с помощью оксидов таких соединений, как гафнанты, цирконаты и титанаты лантаноидов, наблюдается улучшенная эффективность, в том числе повышенная прочность и расширенный диапазон прозрачности. Эти свойства делают их перспективными для использования в различных средах, включая создание оптических систем, работающих в условиях высокого спроса. В частности, цирконат и титанат гадолиния обладают потенциалом для создания сложных покрытий, предназначенных для оптических систем, функционирующих в ближней и видимой зоне инфракрасного излучения.

При производстве оптических покрытий, помимо требуемых характеристик, важно учитывать и физико-механические свойства материалов, включая их агрегатное состояние. Соединения, используемые для нанесения пленок, должны быть либо в виде расплавов, либо в виде таблеток с высокой подсветкой. Даже незначительное разбрзгивание или испарение материала может привести к дефектам покрытия, поэтому таблетки должны обладать минимальной пористостью. Расплавы, как правило, используются при резистивном напылении, а таблетки применяются в методе электронно-лучевого напыления. Резистивное напыление хорошо подходит для материалов с низкой температурой плавления, в то время как электронно-лучевое напыление, когда материал испаряется под действием сфокусированного пучка электронов, позволяет наносить покрытия из тугоплавких материалов, таких как селениды, оксиды и сульфиды.

Гафнант гадолиния, как один из перспективных материалов для оптических покрытий, может быть получен несколькими способами. Одним из них является прямой синтез диоксида гафния и оксида гадолиния. Другой подход заключается в совместном осаждении аммиаком из растворов оксохлорида гафния и хлорида гадолиния с последующими этапами сушки и прокаливания для получения целевого оксида [30, 31].

Полученные порошки гафната гадолиния тщательно анализируются с помощью рентгенофазового анализа и элементного анализа, позволяющего установить фазовый состав и содержание элементов в материале. Далее для изучения свойств пленочных покрытий полученные порошки подвергают электронно-лучевому и магнетронному напылению. Затем были проведены детальные исследования по таким характеристикам, как механическая прочность, устойчивость к воздействию влаги и радиационная стойкость пленочных покрытий.

Исследования показывают, что при синтезе гафната гадолиния соотношение атомов гафния и гадолиния составляет 2:1, полученные соединения обладают кристаллической структурой типа флюорита. Важно отметить, что метод синтеза не оказывает существенного влияния на результаты рентгенофазового анализа.

При проведении электронно-лучевого напыления в качестве мишени использовались таблетки гафната гадолиния диаметром 19-20 мм, полученные путем холодного прессования порошка при давлении 30 МПа и применении термической обработки. Таблетки, полученные синтезом из исходных оксидов, не соответствуют целям из-за недостаточной физической прочности. Для повышения плотности и минимизации пористости таблетки подвергают вакуумному отжигу при температуре 1400°C в течение трех часов [32].

В настоящее время при изготовлении оптических элементов, включенных в силовую оптику, предпочтение отдается магнетронному напылению. Для этого метода потребуются мишени диаметром 80-100 мм, которые невозможно получить при помощи холодного прессования из-за недостаточной прочности. Поэтому для производства мишеней используется метод горячего прессования при температуре 1600°C и давлении 300 МПа в течение трех часов. Этот метод позволяет получать более плотные и прочные мишени с минимальной пористостью [33].

Проведенные исследования подтвердили, что гафнат диспрозия обладает уникальными свойствами, такими как высокая радиационная стойкость и коррозионная устойчивость, что делает его перспективным материалом для использования в ядерных реакторах. Эксперименты показали, что варьирование соотношения Dy/Hf позволяет точно настраивать эффективность поглощения нейтронов, что особенно важно для реакторов типа ВВЭР-1000. Кроме того, частичное замещение оксидов диспрозия и гафния другими редкоземельными элементами, например гадолинием или иттрием, не нарушает кристаллическую структуру материала и сохраняет его эксплуатационные характеристики.

Также были изучены методы синтеза гафната гадолиния и его применение в оптических покрытиях. Установлено, что материал кристаллизуется в структуру типа флюорита независимо от способа получения. Для создания мишеней с низкой пористостью и высокой механической прочностью применялись методы горячего прессования и вакуумного отжига.

Эти результаты демонстрируют широкие возможности применения гафната редкоземельных

элементов не только в ядерной энергетике, но и в других высокотехнологичных областях, таких как оптика и катализ.

Заключение

Основные научные результаты, полученные в работе:

1. Механохимический синтез в течение 30–60 мин позволяет получать порошки сложнооксидной керамики на основе редкоземельных элементов с заданными свойствами.
2. Гафнаты, цирконаты и титанаты редкоземельных металлов демонстрируют высокую радиационную стойкость и не образуют газообразных продуктов при выгорании, что упрощает их использование в ядерных реакторах.
3. Гафнат диспрозия обладает высокой эффективностью поглощения нейтронов, регулируемой за счет изменения соотношения Dy/Hf.
4. Частичное замещение оксидов диспрозия и гафния другими редкоземельными элементами не нарушает структуру материала, сохраняя его стабильность.
5. Гафнат гадолиния, полученный различными методами, сохраняет флюоритовую структуру и подходит для создания оптических покрытий.
6. Для производства мишеней с низкой пористостью эффективны методы горячего прессования и вакуумного отжига.

7. Гафнаты редкоземельных элементов перспективны для использования в ядерных реакторах, оптических системах и других высокотехнологичных областях благодаря их уникальным свойствам и возможности тонкой настройки характеристик.

8. Проведенные исследования открывают новые возможности для создания материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами, способствующими развитию современных технологий.

Список литературы

1. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing / Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. // Metallurgist. 2023, vol. 67, no. 1-2, pp. 96-103. DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5.
2. Performance evaluation of functioning of natural-industrial system of mining-processing complex with help of analytical and mathematical models / Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch., Pilieva D.E. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018, vol. 327, p. 022013.
3. Третьяков Ю.Д., Метлин Ю.Г. Керамика – материал будущего. М.: Знание, 1987. 47 с.
4. Третьяков Ю.Д., Лепис Х. Химия и технология твердофазных материалов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1985. 253 с.
5. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993. 192 с.

6. Толкачева А.С., Павлова И.А. Общие вопросы технологии тонкой керамики: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 184 с.
7. Балкевич В.Л. Техническая керамика. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
8. Yakovkina L.V., Kichai V.N., Smirnova T.P. Preparation and properties of thin HfO₂ films // Inorg. Mater, 2005, vol. 41, pp. 1300-1304.
9. Andrievskaya E.R. Phase equilibria in the refractory oxide systems of zirconia, hafnia and yttria with rare-earth oxides // Journal of the European Ceramic Society. 2008, vol. 28, iss. 12, pp. 2363-2388.
10. Исследование содержания и возможности извлечения матричных и редких элементов из золотшлаковых отходов предприятия теплоэнергетики / Черкасова Т.Г., Черкасова Е.В., Тихомирова А.В., Гилязидинова Н.В., Клоев Р.В., Мартюшев Н.В., Карлина А.И., Скиба В.Ю. // Металлург. 2021. № 11. С. 96-100. DOI: 10.52351/00260827_2021_11_96.
11. Термические и теплофизические свойства теплозащитных покрытий на основе цирконата лантана / И.В. Мазилин, Л.Х. Балдаев, Д.В. Дробот, А.М. Ахметгареева, А.О. Жуков, А.Г. Хисматуллин // Перспективные материалы. 2013. №7. С. 21-30.
12. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993. 187 с.
13. Аввакумов Е.Г. Механохимический синтез в неорганической химии. Новосибирск: Наука, 1991. 264 с.
14. McCormick P.G., Froes F.H. The fundamentals of Mechanochemical processing. JOM. November, 1998, pp. 61-65.
15. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М: Физматлит, 2005. 416 с.
16. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: ИЦ «Академия», 2005. 192 с.
17. Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзицигури Э.Л. Ультра-дисперсные системы: получение, свойства, применение. М.: Учеба, 2010. 182 с.
18. Sol-gel synthesis and crystallization kinetics of dysprosium-titanate Dy₂Ti₂O₇ for photonic applications / Potel M. et al. // Mater. Chem. Phys. 2015, vol. 168, pp. 159–167.
19. Radiation-induced amorphization resistance and radiation tolerance in structurally related oxides / Sickafus K.E. et al. // Nat. Mater. 2007, vol. 3, pp. 217–223.
20. Dysprosium hafnate as absorbing material for control rods / Risovany V.D. et al. // J. Nucl. Mater. 2006, vol. 355, pp. 163–170.
21. Risovany V.D., Varlashova E.E., Suslov D.N. Dysprosium titanate as an absorber material for control rods // J. Nucl. Mater. 2000, vol. 281, pp. 84–89.
22. Properties of Dysprosium Titanate as a Control Rod Material / Kim H.S. et al. 2007, pp. 10–11.
23. Hot Pressing Of Dysprosium Hafnate And Titanate Pellets / Krasnorutskii V.S. et al. 2012, vol. 50, no. 11, pp. 708–713.
24. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant / Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. // Metallurgist. 2023, vol. 66, no. 11-12, pp. 1476-1480. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
25. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Муравьева Е.М. Новые перспективные поглощающие материалы для ядерных реакторов на тепловых нейтронах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2005. № 3 (86). С. 87–93.
26. Radiation stability of WWER-1000 CPS AR absorber element with boron carbide / Fridman S.R., Risovanny V.D., Zakharov A.V., Toporova V.G. // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Physics of radiation damages and radiation science of materials. 2001, no. 2, pp. 84–90.
27. Перова Е.Б., Спиридонов Л.Н., Комисарова Л.Н. Фазовые равновесия в системе HfO₂-Dy₂O₃ // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1982. Т. 8. № 10. С. 1878–1882.
28. Махмудов Ф.А., Шаймарданов Э.Н., Кабгов Х.Б. Получение и свойства наноструктурированных оксидов диспрозия // Доклады АН Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. Вып. 2. С. 130–134.
29. Thermophysical measurements on dysprosium and gadolinium titanates / Panneerselvam G. et al. // J. Nucl. Mater. 2004, vol. 327, pp. 220–225.
30. Jung C., Kim C., Lee S. Synthesis and sintering studies on Dy₂TiO₅ prepared by polymer carrier chemical process // J. Nucl. Mater. 2006, vol. 354, pp. 137–142.
31. Mechanism of structure formation in samarium and holmium titanates prepared from mechanically activated oxides / Lyashenko L.P., Shcherbakova L.G., Kolbanov I.V., Knerel'man E.I., Davydova G.I. // Inorg. Mater. 2007, vol. 43, no. 1, pp. 46–54.
32. Регулирующий стержень ядерного реактора: патент Российской Федерации №2077741 от 20.04.1997. G21C7/10, G21C7/24 / Чернышов В.М., Ряховских В.И., Постлавский А.О., Пономаренко В.Б., Маковский В.Д., Осадчий А.И.; Лунин Г.Л., Бирюков Г.И., Васильченко И.Н.
33. Ferroelectric perovskite nanopowders obtained by mechanochemical synthesis / Szafraniak-Wiza I., Hilczer B., Talik E., Pietraszko A., Malic B. // Process. Appl. Ceram. 2010, vol. 4, no. 3, pp. 99–106.

References

1. Golik V. I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing. Metallurgist. 2023;67(1-2):96-103. DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5
2. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch., Pilieva D.E. Performance evaluation of functioning of natural-industrial system of mining-processing complex with help of analytical and mathematical models. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018;327:022013.
3. Tretyakov Yu.D., Metlin Yu.G. *Keramika – material будущего* [Ceramics – the material of the future]. Moscow: Znanie, 1987, 47 p. (In Russ.).
4. Tretyakov Yu.D., Lepis H. *Khimiya i tekhnologiya tverdogafaznykh materialov: uchebnoe posobie* [Chemistry and technology of solid-phase materials]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1985, 253 p. (In Russ.).
5. Shevchenko V.Ya., Barinov S.M. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow: Nauka, 1993, 192 p. (In Russ.).
6. Tolkacheva A.S., Pavlova I.A. *Obshchie voprosy tekhnologii tonkoy keramiki: ucheb. posobie* [General issues of fine ceramics technology: textbook]. Yekaterinburg: Ural Publishing House, 2018, 184 p. (In Russ.).
7. Balkevich V.L. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow: Stroyizdat, 1984, 256 p. (In Russ.).
8. Yakovkina L.V., Kichai V.N., Smirnova T.P. Preparation and properties of HfO₂ thin films. Inorg. Mater. 2005;41:1300–1304.

9. Andrievskaya E.R. Phase equilibria in refractory oxide systems of zirconium dioxide, hafnium and yttrium with oxides of rare earth elements. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008;28(12):2363-2388.
10. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyshev N.V., Karlina A.I., Skiba V.Y. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction. *Metallurg [Metallurgist]*, 2021;(11):96-100. DOI: 10.52351/00260827_2021_11_96.
11. Mazilin I. V., Baldaev L. H., Drobot D. V., Akhmetgareeva A.M., Zhukov A. O., Khismatullin A. G. Thermal and thermophysical properties of thermal protective coatings based on lanthanum zirconate. *Perspektivnye materialy* [Promising materials], 2013;(7):21-30.
12. Shevchenko V.Ya., Barinov S.M. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow: Nauka, 1993, 187 p. (In Russ.).
13. Avakumov E.G. *Mekhanohimicheskiy sintez v neorganicheskoy khimii* [Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry]. Novosibirsk: Nauka, 1991, 264 p. (In Russ.).
14. McCormick P.G., Fros F.H. Fundamentals of mechanochemical processing. *JOM*. 1998;61-65.
15. Gusev A.I. *Nanometrialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanometrials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow: Fizmatlit, 2005, 416 p. (In Russ.).
16. Andrievsky R.A., Ragulya A.V. *Nanostrukturnye materialy* [Nanostructured materials]. Moscow: Academy Publishing center, 2005, 192 p.
17. Ryzhonkov D.I., Levina V.V., Dzidziguri E.L. *Ultradispersnye sistemy: poluchenie, svoystva, primenie* [Ultradisperse systems: preparation, properties, application]. Moscow: Studies, 2010, 182 p. (In Russ.).
18. Potel M. et al. Sol-gel synthesis and kinetics of crystallization of dysprosium titanate $Dy_2Ti_2O_7$ for photonic applications. *Mater. Chem. Phys.* 2015;168:159-167.
19. Sikafus K.E. et al. Resistance to radiation-induced amorphization and radiation resistance of structurally related oxides. *Mater.* 2007;3:217-223.
20. Risovanny V.D. et al. Dysprosium hafnate as an absorbing material for control rods. *J. Nucl. Mater.* 2006;355:163-170.
21. Risovanny V.D., Varlashova E.E., Suslov D.N. Dysprosium titanate as an absorbent material for control rods. *J. Nucl. Mater.* 2000;281:84-89.
22. Kim H.S. et al. Properties of dysprosium titanate as a material for control rods. 2007, pp. 10-11.
23. Krasnorutsky V.S. et al. Hot pressing of granules of hafnate And dysprosium titanate. 2012;50(11):708-713.
24. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023;66(11-12):1476-1480. DOI: 10.1007/s11015-023-01462-y.
25. Risovanny V.D., Zakharov A.V., Muraleva E.M. New promising absorbing materials for thermal neutron nuclear reactors. *Vopr. atom. nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiats. povrezhdeniy i radiats. materialovedenie* [Issues of atomic science and technology. Ser. Physics of radiation damage and radiation chemistry of materials], 2005;(3(86)):87-93.
26. Friedman S.R., Risovanny V.D., Zakharov A.V., Toporova V.G. Radiation resistance of the absorbing element CPS AR VVER-1000 with boron carbide. Issues of atomic science and technology. Ser. Physics of radiation damage and radiation chemistry of materials. 2001;(2):84-90.
27. Perova E.B., Spiridonov L.N., Komisarova L.N. Phase equilibria in the $HfO_2-Dy_2O_3$ system. *Izv. AN SSSR. Neorgan. Materialy* [News of the USSR Academy of Sciences. Non-organic materials], 1982;8(10):1878-1882.
28. Mahmudov F.A., Shaimardanov E.N., Kabgov H.B. Preparation and properties of nanostructured dysprosium oxides. *Dokl. AN Rep. Tadzhikistan* [Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], 2013;56(2):130-134.
29. Panneerselvam G. et al. Thermophysical measurements on dysprosium and gadolinium titanates. *J. Nucl. Mater.* 2004;327:220-225.
30. Jung S., Kim S., Lee S. Studies of the synthesis and sintering of $Dy_2Ti_2O_5$ obtained chemically on a polymer carrier. *J. Nucl. Mater.* 2006;354:137-142.
31. Lyashenko L.P., Shcherbakova L.G., Kolbanev I.V., Knerelman E.I., Davydova G.I. Mechanism of structure formation of samarium and holmium titanates obtained from mechano-activated oxides. *Inorg. Mater.* 2007;43(1):46-54.
32. Chernyshov V.M., Ryakhovskikh V.I., Poslavsky A.O., Ponomarenko V.B., Makovsky V.D., Osadchy A.I.; Lunin G.L., Biryukov G.I., Vasilchenko I.N. *Reguliruyushchiy sterzhen yadernogo reaktora* [The regulating rod of the nuclear reactor]. Patent RU, no. 2077741, 1997.
33. Safranyak-Visa I., Hilzer B., Talik E., Pietrashko A., Malich B. Ferroelectric powders of perovskite na-n obtained by mechanochemical synthesis. *Process. Adj. Ceramics.* 2010;4(3):99-106.

Поступила 23.01.2025; принята к публикации 06.02.2025; опубликована 30.06.2025
 Submitted 23/01/2025; revised 06/02/2025; published 30/06/2025

Шарипзянова Гюзель Харрисовна – кандидат технических наук, проректор по учебной работе,
 Московский политехнический университет, Москва, Россия.
 Email: guzel@mtw.ru. ORCID 0000-0002-0863-7490

Guzel Kh. Sharipzyanova – PhD, Vice-Rector for Academic Affairs,
 Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.
 Email: guzel@mtw.ru. ORCID 0000-0002-0863-7490