



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 666.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-85-91

ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ГАФНАТОВ И ТИТАНАТОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

Шарипзянова Г.Х.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. С открытием новых горизонтов в ядерной энергетике, особенно в контексте разработки реакторов третьего поколения и их усовершенствованных вариантов, значительно возросли требования к безопасности и экологической устойчивости ядерных технологий. Важным аспектом этих требований является эффективное функционирование материалов для поглощающих элементов, которые играют ключевую роль в контроле и регуляции ядерной реакции. Поглотители обеспечивают возможность надежного управления реакцией, снижая риски и соблюдая нормы защиты окружающей среды. Гафнаты представляют собой один из наиболее перспективных классов материалов для использования в новых реакторах. Эти соединения характеризуются высокой нейтронной поглощающей способностью и стабильными физико-химическими свойствами при высоких температурах. Одним из главных преимуществ титанатов является их способность создавать эффективные структуры, способные быстро реагировать на изменения условий работы реактора. Это позволяет им сохранять свои характеристики даже в условиях высоких температур и радиационного воздействия. Рассмотрены преимущества использования гадолиния в качестве выгорающего поглотителя, способного увеличить исходную загрузку топлива и расширить активную зону реактора, а также поле энерговыделения. Приведены результаты экспериментального исследования коррозионной стойкости титаната гадолиния, полученного механохимическим методом. Испытания проводятся в автоклаве при высоких температурах и давлении, с измерением изменений образцов в процессе термообработки. Полученные данные повышают эффективность применения дополнительно материала. В заключении сделан вывод о необходимости разработки технологий массового производства поглощающих элементов, а также улучшения управления качеством и снижения затрат на их изготовление. Отмечено, что разработка новых материалов на основе сложнооксидной керамики редкоземельных элементов требует решения проблем, связанных с их введением в массовое производство, улучшением качества и сокращением производственных издержек.

Ключевые слова: гафнаты, титанаты, оксиды, редкоземельные металлы, механохимия, синтез, свойства

© Шарипзянова Г.Х., 2025

Для цитирования

Шарипзянова Г.Х. Получение и применение гафнатов и титанатов редкоземельных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 85-91. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-85-91>



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

PRODUCTION AND APPLICATION OF HAFNATES AND TITANATES OF RARE EARTH METALS

Sharipzyanova G.Kh.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract. With the opening of new horizons in nuclear energy, especially in the context of the development of third-generation reactors and their improved versions, the requirements for safety and environmental sustainability of nuclear technologies have increased significantly. An important aspect of these requirements is the efficient functioning of materials for absorber elements, which play a key role in monitoring and regulating the nuclear reaction. Absorbers ensure the possibility of reliable reaction control, reducing risks and complying with environmental protection standards. Hafnates are one of the most promising grades of materials for use in new reactors. These compounds are characterized by high neutron absorption capacity and stable physicochemical properties at high temperatures. One of the main advantages of titanates is their ability to create effective structures that can quickly respond to changes in reactor operating conditions. This allows them to retain their characteristics even at high temperatures and radiation exposure. The advantages of using gadolinium as a burnable absorber, which can increase the initial fuel load and expand the reactor core, as well as the energy release field, are considered. The article presents the results of an experimental study of the corrosion resistance of gadolinium titanate obtained by a mechanochemical method. The tests are carried out in an autoclave at high temperatures and pressure, with measurements of changes in samples during heat treatment. The data obtained increase the efficiency of using additional material. The conclusion is made on the need to develop technologies for mass production of absorbing elements, as well as improving the quality control and reducing the costs of manufacture. It is noted that the development of new materials based on complex oxide ceramics of rare earth elements requires solving problems associated with the introduction into mass production, quality improvement and production costs reduction.

Keywords: hafnates, titanates, oxides, rare earth metals, mechanochemistry, synthesis, properties

For citation

Sharipzyanova G.Kh. Production and Application of Hafnates and Titanates of Rare Earth Metals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 85-91. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-85-91>

Введение

Использование гафнатов и титанатов, содержащих редкоземельные элементы, в качестве материалов для поглощающих элементов (ПЭЛ) активно исследуется в последние годы в разработке ядерных реакторов нового поколения. Это обусловлено как стремлением к обеспечению безопасности эксплуатации реакторов, так и требованиями к государственной защите. Основное предназначение ПЭЛ заключается в обеспечении контролируемого протекания ядерной реакции. Применение сложных оксидов лантаноидов, таких как оксид диспрозия и оксид европия, в составе поглощающих элементов нового поколения позволяет улучшить их технологические свойства. В дополнение к гафнатам, титанатам и цирконатам, содержащим лантаноиды, создается экономический интерес для различных промышленных применений [1-3]. Эти соединения находят применение в качестве каталитических материалов, термических барьеров, а также в микроэлектронике и оптике. Особенности сложных оксидов заключается в их способности образовывать твердые растворы в различных составах, что позволяет целенаправленно регулировать их физико-химические характеристики [4, 5].

Механохимический синтез, основанный на интенсивном механическом воздействии, является эф-

фективным и экономичным методом получения сложных оксидов. Этот процесс позволяет получать порошкообразные материалы с высокой степенью открытости и контролируемыми размерами частиц. Использование высокоэнергетических турбин обеспечивает эффективное разрушение исходных компонентов и последующее образование новых сетевых связей, формируя требуемый продукт с заданными свойствами.

Гадолиний и его соединения являются обязательными компонентами, применяемыми в ядерной энергетике, где они используются в качестве выгорающих поглотителей. Гадолиний обладает уникальной технологией, позволяющей эффективно использовать нейтроны, включая тепловые и промежуточные. Это обусловлено наличием изотопов ^{155}Gd и ^{157}Gd , характеризующих различные сечения захвата нейтронов. Гадолиний относится к быстро выгорающим поглотителям, что означает, что он быстро движется и позволяет предотвратить потерю нейтронов по мере выгорания изотопов. По этой причине гадолиний обычно не применяется в регулирующих элементах реакторов, предназначенных для длительного использования. Однако его применение в выгорающих поглотителях позволяет увеличить начальную загрузку топлива в активную зону реактора, тем самым продлевая топливный цикл и оп-

тимизируя работу реактора. Кроме того, использование оксидов гадолиния позволяет увеличить дальность энерговыделения в активном направлении и снизить общее количество регулирующих элементов [6, 7].

В современной химии материалов синтез сложных оксидов – это область инноваций и попытки сыграть ключевую роль в формировании различных подходов, которые предлагают уникальные способы получения материалов с заданными свойствами, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного метода зависит от требуемых свойств конкретного продукта и желаемого размера частиц.

Материалы и методы исследования

Цель исследования – повышение коррозионной стойкости титаната гадолиния, не снижая высокой сопротивляемости радиационному воздействию.

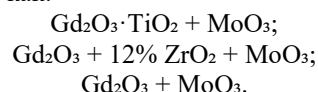
В работе исследован механохимический синтез как наиболее экономичный и целесообразный метод получения гафнатов и титанатов лантаноидов. Этот метод позволяет получать порошковые соединения с помощью механохимических составов и различных физико-механических методов.

Для исследования коррозионной стойкости образцов их поместили в автоклав. Образцы представляют собой негерметичные материалы, содержащие внутри порошкообразные вещества. Термическая обработка проводилась при температуре 300°C и давлении 17 МПа. Образцы извлекали из автоклава через печь на некоторое время, после чего проводилось измерение их массы.

Исследование посвящено актуальной проблеме разработки перспективных поглощающих элементов для ядерных реакторов нового поколения с акцентом на использование гафнатов и титанатов редкоземельных металлов, в частности гадолиния. Эти материалы играют ключевую роль в обеспечении контролируемого протекания ядерного режима и повышении без-

опасности эксплуатации реактора. Рассмотрена необходимость применения сложных оксидов лантаноидов, таких как оксид диспрозия и оксид европия, для усовершенствования технологических свойств ПЭЛ. Особое внимание уделено гадолинию, который эффективно обеспечивает поглощающие свойства нейтронов в широком энергетическом контексте.

Основным объектом исследования являлся титанат гадолиния ($Gd_2O_3 \cdot TiO_2$), полученный механохимическим методом. Также изучались составы с добавлением оксидов молибдена (MoO_3) и циркония (ZrO_2), такие как:



Коррозионные испытания в автоклаве проводились в течение 3000 ч (около 125 суток) при температуре 300°C и давлении 17–18 МПа. При проведении исследований применялись методы коррозионных испытаний [8].

Полученные результаты и их обсуждение

Титанат гадолиния обеспечивает стабильность в экстремальных условиях. Для оценки коррозионной стойкости материалов в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации ядерных реакторов, использовали автоклавные испытания, в ходе которых материалы испытываются при очень высоких температурах и в течение длительного времени (см. **рисунок**) [9].

В частности, титанат гадолиния изменял свое поведение в автоклаве при температуре 300°C и давлении 18 МПа в течение 3000 ч. Результаты показали, что соединение гадолиния с оксидом титана значительно повышает его устойчивость к воздействию окружающей среды по сравнению с другими соединениями (см. **таблицу**).

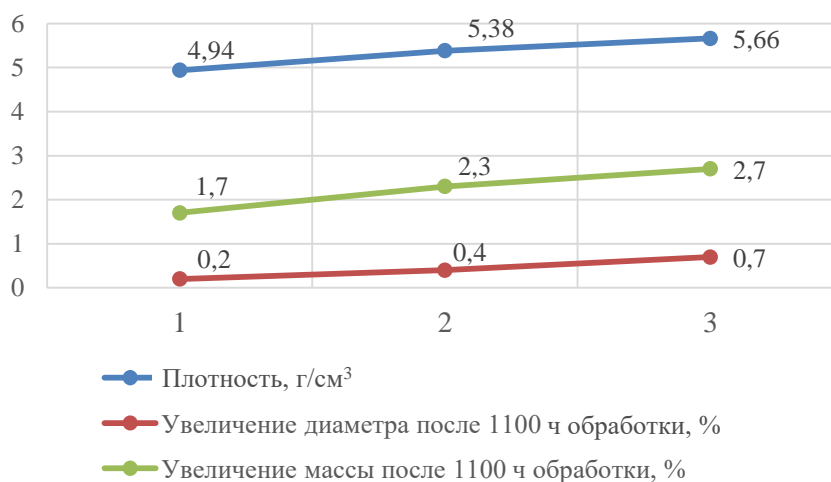


Рис. Результаты испытаний титаната гадолиния: 1 – состав порошков $Gd_2O_3 \cdot TiO_2 + MoO_3$;

2 – состав порошков $Gd_2O_3 + 12\% ZrO_2 + MoO_3$; 3 – состав порошков $Gd_2O_3 + MoO_3$;

Fig. Gadolinium titanate test results: 1 is composition of powders $Gd_2O_3 \cdot TiO_2 + MoO_3$;

2 is composition of powders $Gd_2O_3 + 12\% ZrO_2 + MoO_3$; 3 is composition of powders $Gd_2O_3 + MoO_3$

Таблица. Результаты автоклавных испытаний
Table. Autoclave test results

Химический состав	Температура, °С	Изменение массы, %	Изменение диаметра, %	Фазовый состав
80%Gd ₂ O ₃ +18% TiO ₂ +2%MoO ₃	1500	3,9	0	Gd ₂ MoO ₁₂
84,5%Gd ₂ O ₃ +14,5%MoO ₃ +1%MgO	1500	0,3	0	Gd ₂ TiO ₅

Данный материал обладает превосходной коррозионной стойкостью. За указанный период времени не было зафиксировано значительных изменений ни массы, ни диаметра образцов, что свидетельствует об отсутствии выраженных технологических процессов.

Для сравнения аналогичные эксперименты были проведены с молибдатом и цирконатом гадолиния. Результаты этих испытаний показали, что титанат гадолиния сохраняет более высокую коррозионную устойчивость по сравнению с материалами других соединений.

Среди методов жидкофазного синтеза используется гидротермальный метод. В этом процессе режим поддерживают в герметичных сосудах (автоклавах) при повышенных температурах и давлениях, что позволяет формировать кристаллические структуры с высокой степенью воздействия. Конкретный пример – синтез титаната лантана, где соосажденные гидроксиды титана и лантана взаимодействуют в рамках катализатора (например, гидроксида калия). Постобработка с использованием уксусной кислоты и промывки водой удаляет нежелательные вредные продукты, обеспечивая чистоту конечного материала.

Другой подход – соосаждение, которое позволяет получить более однородные по составу порошки, чем при твердофазном синтезе. В этом случае необходимые ионы одновременно осаждаются из растворов в виде нерастворимых соединений, которые в дальнейшем подвергаются отжигу. Так, гафнат лантана можно получить, добавляя гидроксид натрия к раствору, содержащему хлорид лантана и нитрат гафния. Образовавшиеся осадки помещают в автоклав, а затем отмывают от примеси.

Золь-гель-технология – это метод, в котором исходные соединения, часто алкоксиды металлов, растворяются в воде или спирте. В результате гидролиза и поликонденсации образуется золь, который затем превращается в гель, а после сушки и отжига – в оксидный порошок. Этот метод позволяет получать материалы с контролируемым размером пор.

Сжигание металлоорганических прекурсоров – еще один метод, позволяющий получать порошкообразные оксиды, но уже путем сжигания специально приготовленных соединений, содержащих требуемые металлы. В результате быстрого нагревания используется мелкодисперсный порошкообразный оксид, часто находящийся на большой площади поверхности.

Альтернативным и эффективным способом получения гафнатов лантаноидов является сжигание металлоорганических прекурсоров или смесей нитратов металлов в составе органического топлива, такого как

глицин. Контролируемое сжигание обеспечивает образование мелкодисперсных порошков с заданными свойствами. Однако данные методы требуют дальнейшего изучения параметров синтеза, таких как температура, тип горения и т. д., так как они определяют состав и свойства конечного продукта.

Для получения высокодисперсных гафнатов редкоземельных металлов с пироклорной структурой применяют диспергационные и конденсационные методы, соблюдение требуемых фаз внутри системы [10].

Выбор метода синтеза зависит от области применения соединений. Если материал планируется использовать в качестве покрытий, предпочтение отдается крупнодисперсным порошкам [11].

Твердофазный синтез с измельчением и прессованием исходных смесей оксидов используется для получения чистых соединений сложного оксида, включающих перемешивание, прессование, термообработку при разных температурах и последующее измельчение для дальнейшей обработки.

Сложные оксиды лантаноидов получают путем интенсивного помола в шаровой мельнице. Исследуют структурные изменения, возникающие при спекании, а также электропроводность получаемых соединений. Термодинамические характеристики оксидов также изучаются, однако фазовый состав и структура продуктов часто не учитываются [12].

Для получения растворов переменного состава используется метод соосаждения, позволяющий наносить их на металлические подложки.

Пленки на основе La₂O₃·HfO₂ получают методом МOCVD с использованием гафния и лантана. Структура менялась в зависимости от состава лантана.

Для резистивного напыления использовали расплавы, для электронно-лучевого – таблетки. Соединения с низкотемпературным плавлением напыляют резистивным методом, а тугоплавкие – электронно-лучевым.

Гафнат гадолиния может быть получен с применением термической обработки, включающей сушку и прокаливание. Для изучения свойств привлечены такие методы анализа, как рентгенофазовый и элементный. Для определения оптических и механических характеристик, влагостойкости и радиационной стойкости материалов дополнительно применяют электронно-лучевое и магнетронное напыление и соответствующие измерения [13-15].

Исследования показывают, что соотношение атомов гафния и гадолиния в полученном соединении составляет 2:1. Соединение такой структуры, как флюорит, и экспериментальный метод синтеза не да-

ли хороших результатов в рентгенофазовом анализе. Мишени для электронно-лучевого напыления получают холодным прессованием с последующим прокаливанием. Для увеличения плотности и уменьшения пористости таблетки отжигают в вакууме. Мишени для магнетронного напыления получают методом горячего прессования [16]. Горячее прессование позволяет получать материалы с низкой пористостью, что выгодно отличает его от метода холодного прессования с последующим отжигом, при котором пористость может достигать 16–35%.

Гафнат гадолия представляет собой перспективное соединение для создания покрытий, работающих в видимой и ближней инфракрасной зоне. Важно отметить, что способ получения покрытия не оказывает отрицательного влияния на его оптические свойства. По своим характеристикам гафнат гадолия имеет общие с оксидом циркония, гафния и цирконата гадолия свойства и отличается при этом высокой механической прочностью, влажностойкостью и повышенной радиационной стойкостью, особенно при горячем прессовании в вакуумной среде [17, 18].

Особенностью гафната гадолия является снижение его показателя преломления в ближней и видимой зоне инфракрасного излучения [21, 22]. При этом материал имеет низкое отражение света, что делает его привлекательным для использования в оптических покрытиях. Важное замечание: метод получения покрытий не обеспечивает хороших надежных оптических свойств [23].

Исследования в области ядерной энергетики ведут активный поиск альтернатив традиционному используемым материалам для поглощающих элементов, таких как бористая сталь и карбид бора. Эти материалы, несмотря на свою эффективность для ряда групп нейтронов, имеют недостатки, ограничивающие их применение в современных реакторах.

Постоянное радиационное повреждение материалов под действием интенсивного нейтронного облучения, неизбежно возникающего в процессе функционирования реактора, приводит к разрушению материала, что снижает его механическую прочность и надежность работы в целом. Накопление газообразного гелия в материале также является существенным фактором, влияющим на его свойства.

Кроме того, эффективность регулирующих элементов на основе бора ограничена выгоранием изотопов бора до уровня 45-50%. В частности, в реакторах типа ВВЭР-1000, где активно используются регулирование и автоматическая защита, выключение этого предела происходит за короткие сроки, а именно за три года в режиме автоматического регулирования и за пять лет в режиме автоматической защиты.

Для повышения ресурса регулирующих элементов необходима замена карбида бора на более радиационно-стойкий материал. Оксид европия, хотя и обеспечивает более длительный срок службы регулирующих элементов, также имеет ряд недостатков. Главным из них является образование долгоживущих

высокоактивных радионуклидов ^{152}Eu и ^{154}Eu в процессе работы реактора, что усложняет хранение и транспортировку отработанных материалов. Возникновение аварийных ситуаций на АЭС в результате неконтролируемого распространения данных радионуклидов может повлечь за собой серьезные экологические последствия.

В поисках более совершенных материалов для регулирующих элементов внимание было обращено на титанат и гафнат диспрозия, а также на металлический гафний. Исследования показали, что эти материалы обладают значительно более высокой радиационной стойкостью по сравнению с бористой сталью и карбидом бора.

В области ядерной энергетики при выборе материалов для элементов управления особенно важна их радиационная стойкость. Традиционные материалы, такие как бористая сталь и карбид бора, имеют ограниченный срок службы из-за радиационных повреждений. Альтернатива в виде титаната диспрозия даёт лучшие результаты. Этот материал продемонстрировал 4 года работы в режиме регулирования на Нововоронежской АЭС и 18 лет в исследовательском реакторе МИР. Тем не менее при длительной эксплуатации возникает проблема истирания оболочек, особенно в кластерных органах управления реакторами типа PWR.

В реакторах типа РБМК-1000 (1500) применение титаната диспрозия вместо карбида бора в регулирующих элементах является целесообразным и перспективным направлением.

Технологический процесс получения покрытия не влияет на базовые свойства гафната гадолия [24, 25]. Для повышения эксплуатационных характеристик регулирующих элементов необходимо заменить карбид бора на более радиационно-стойкий материал [26, 27].

Заключение

1. Несмотря на значительные достижения в разработке новых материалов для ПЭЛ, сохраняется необходимость в создании эффективных технологий для их массового производства, улучшения управления качеством и сокращения затрат.

2. Экспериментальные исследования коррозионной стойкости титаната гадолия, полученные механикохимическим методом, показали, что базовым составом материала является соединение гадолия с оксидом титана ($\text{Gd}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$). Этот состав продемонстрировал повышенную устойчивость к высоким температурам (300°C) и давлению (18 МПа) в течение 3000 ч в автоклаве по сравнению с соединениями гадолия с оксидом молибдена и оксидом циркония. Полученные данные подтверждают перспективность использования титаната гадолия в качестве материала для поглощающих элементов в ядерных реакторах нового поколения.

Список источников

- Третьяков Ю.Д., Лепис Х. Химия и технология твердофазных материалов: учеб. пособие. Москва: Изд-во МГУ, 1985. 253 с.
- 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.
- Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining / Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. // Metallurgist. 2023, vol. 67, no. 3-4. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
- Толкачева А.С., Павлова И.А. Общие вопросы технологии тонкой керамики: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 184 с.
- Синтез и исследование термической стабильности высокодисперсных тугоплавких цирконатов и гафнатов лантана и неодима для термобарьерных покрытий / В.Г. Севастьянов, Е.П. Симоненко, Н.А. Игнатов, Р.Г. Павелко, Н.Т. Кузнецов // Композиты и наноструктуры. 2009. №1. С. 50-58.
- 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.
- Термические и теплофизические свойства теплозащитных покрытий на основе цирконата лантана / И. В. Мазин, Л. Х. Балдаев, Д. В. Дробот, А. М. Ахметгареева, А. О. Жуков, А. Г. Хисматуллин // Перспективные материалы. 2013. №7. С. 21-30.
- ГОСТ Р 9.905 - 2007 (ИСО 7384:2001, ИСО 11845:1995). Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2020.
- McCormick P.G., Froes F.H. The fundamentals of Mechanochemical processing // JOM. November. 1998, pp. 61-65.
- Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
- Жуков А.В., Чижевская С.В., Пьяе Пью. Гетерофазный синтез гидроксидов циркония как альтернатива осадительным методам // Химическая промышленность сегодня. 2020. № 3. С. 42-47.
- Sol-gel synthesis and crystallization kinetics of dysprosium titanate $Dy_2Ti_2O_7$ for photonic applications / Potel M. et al. // Mater. Chem. Phys. 2015, vol. 168, pp. 159-167.
- Mahato N., Gupta A., Balani K. Doped zirconia and ceria-based electrolytes for solid oxide fuel cells: a review // Nanomaterials and Energy. 2012, vol. 1, no. 1, pp. 27-45.
- Fabrication of Lu_2O_3 : Eu transparent ceramics using powder consisting of mono-dispersed spheres / C. Ma, X. Li, S. Liu, Q. Zhu, D. Huo, J.-G. Li, X. Sun // Ceramics International. 2015, vol. 41, no. 8, pp. 9577-9584.
- Патент RU 2430884 C1. Способ получения сложных оксидных соединений редкоземельных металлов / Кузнецов М.В., Морозов Ю.Г. Оpubл. 10.10.2011. Бюл. № 28.
- Патент RU 2142654 C1. Нейтроннопоглощающий материал / Захаров Ю.К., Красовский В.Д., Маковский А.В. и др. Оpubл. 10.12.1999.
- Резниченко В.А., Аверин В.В., Олюнина Т.В. Титанаты: научные основы, технология, производство. М.: Наука, 2010. 267 с.
- Ермилов А.Г., Богатырева Е.В. Предварительная механоактивация. М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. 135 с.
- Механизм образования флюоритоподобных фаз в системах $Ti_2 Y_2 O_3 (Er_2 O_3, Sc_2 O_3)$ / Ляшенко Л.П., Никонов Ю.П., Раевский А.В., Щербакова Л.Г. // Материаловедение. 1999. № 1. С. 29-33.
- Нанокристаллические сложные оксиды, получаемые механохимическим синтезом / Григорьева Т.Ф., Барина А.П. и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 1998. Т. 6. №2-3. С. 115-119.
- Патент РФ RU 2 124 240 C1. Поглотитель нейтронов для ядерных реакторов / Рисованный В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П. и др. Оpubл. 27.12.1998.
- Разработка и освоение производства гафната диспрозия как поглощающего материала для органов регулирования перспективных реакторов на тепловых нейтронах / Рисованный В.Д., Захаров А.В., Муралева Е.М., Соколов В.Ф. // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». Димитровград, 2011. № 2. С. 8-13.
- Соединения редкоземельных элементов. Карбонаты, оксалаты, нитраты, титанаты / Комиссарова Л.Н., Шацкий В.М., Пушкина Г.Я., Щербакова Л.Г., Мамсурова Л.Г., Суханова Г.Е. М.: Наука, 1984. 235 с.
- Шляхтина А.В. Морфотропия, изоморфизм и полиморфизм сложных оксидов на основе $Ln_2M_2O_7$ ($Ln = La-Lu, Y, Sc; M = Ti, Zr, Hf, Sn$) // Кристаллография. 2013. Т. 58. № 4. С. 545-560.
- Solid-state reaction, microstructure and phase relations in the ZrO_2 -rich region of the ZrO_2 - Yb_2O_3 system / M. Gonzalez, C. Moure, J.R. Jurado and P. Duran // Journal of materials science. 1993, vol. 28, no. 13, pp. 3451-3456.
- The effect of nanosize Y_2O_3 - ZrO_2 , Ce_2O_3 - ZrO_2 , and Ce_2O_3 - Y_2O_3 - ZrO_2 precursor dispersity on the conductivity and sensor properties of final ceramics / V.G. Konakov, A.V. Shorokhov, N.V. Borisova, S.N. Golubev, E.N. Solovieva and V.M. Ushakov // Reviews on Advanced Materials Science. 2012, vol. 32, no. 1, pp. 34-43.
- Исследование содержания и возможности извлечения матричных и редких элементов из золошлаковых отходов предприятия теплоэнергетики / Черкасова Т.Г., Черкасова Е.В., Тихомирова А.В., Гилязидинова Н.В., Ключев Р.В., Мартюшев Н.В., Карлина А.И., Скиба В.Ю. // Металлург. 2021. № 11. С. 96-100. DOI: 10.52351/00260827_2021_11_96.

References

- Tretyakov Yu.D., Lepis H. *Khimiya i tekhnologiya tverdogfaznykh materialov: ucheb. posobie* [Chemistry and technology of solid-phase materials: a textbook]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1985, 253 p. (In Russ.)
- Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev 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.
- Brigida V. S., Golik V. I., Klyuev R. V., Sabirova L. B., Mambetalieva A. R., Karlina Yu. I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. Metallurgist. 2023;67(3-4). DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

4. Tolkacheva A.S., Pavlova I.A. *Obshchie voprosy tekhnologii tonkoj keramiki: ucheb. posobie* [General issues of fine ceramics technology: a testbook]. Yekaterinburg: Ural Publishing House, 2018, 184 p. (In Russ.)
5. Sevastyanov V.G., Simonenko E.P., Ignatov N.A., Pavelko R.G., Kuznetsov N.T. Synthesis and investigation of thermal stability of highly dispersed refractory zircons and lanthanum and neodymium hafnates for thermal barrier coatings. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and nanostructures], 2009;(1):50-58. (In Russ.)
6. 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.
7. Mazilin I.V., Baldaev L.H., Drobot D.V., Akhmetgareeva A.M., Zhukov A.O., Hismatullin A.G. Thermal and thermophysical properties of thermal protective coatings based on lanthanum zirconate. *Perspektivnye materialy Promising materials*. 2013;(7):21-30. (In Russ.)
8. State standard GOST R 9.905 - 2007 (ISO 7384:2001, ISO 11845:1995). Unified system of protection against corrosion and ageing. Methods of corrosion tests. General requirements. Moscow: Standards Publishing House, 2020. (In Russ)
9. McCormick P.G., Fros F.H. Fundamentals of mechanochemical processing. *JOM*. 1998;61-65.
10. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow: FIZMLIT, 2005, 416 p. (In Russ.)
11. Zhukov A.V., Chizhevskaya S.V., Pyae Pio. Heterophase synthesis of zirconium hydroxides as an alternative to precipitation methods. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya* [Chemical Industry today], 2020;(3):42-47. (In Russ.)
12. Potel M. et al. Sol-gel synthesis and kinetics of crystallization of dysprosium titanate Dy₂Ti₂O₇ for photonic applications. *Mater. Chem. Physics*. 2015;168:159-167.
13. Mahato N., Gupta A., Balani K. Electrolytes based on zirconium and cerium dioxide for solid oxide fuel cells: review. *Nanomaterials and energy*. 2012;1(1):27-45.
14. Ma S., Li H., Liu S., Zhu K., Ho D., Lee J.-J., Song H. Production of transparent ceramics Lu₂O₃: Ec using powder consisting of monodisperse spheres. *International ceramics*. 2015;41(8):9577-9584.
15. Kuznetsov M.V., Iorozov Yu.G. *Sposob polucheniya slozhnykh oksidnykh soedinenij redkozemelnykh metallov* [Method for obtaining complex oxide compounds of rare earth metals]. Patent RF, no. 2430884 C1, 2011.
16. Zakharov Yu.D., Krasovsky V.D. Makovsky A.V. et al. *Neitronnopolgloshchayushchiy material* [Neutron-absorbing material]. Patent RF, no. 2142654 C1, 1999.
17. Reznichenko V.A., Averin V.V., Olyunina T.V. *Titanaty: nauchnye osnovy, tekhnologiya, proizvodstvo* [Titanates: scientific foundations, technology, production]. Moscow: Nauka, 2010, 267 p. (In Russ.)
18. Ermilov A.G., Bogatyreva E.V. *Predvaritel'naya mekhanooaktivatsiya* [Preliminary mechanical activation]. Moscow: MISIS Publishing house, 2012, 135 p. (In Russ.)
19. Lyashenko L.P., Nikonov Yu.P., Rayevsky A.V., Shcherbakova L.G. The mechanism of formation of fluorite-like phases in systems up to Ti₂Y₂O₃ (Er₂O₃, in sc₂O₃ samples). *Materialovedenie* [Materials Science], 1999;(1):29-33. (In Russ.)
20. Grigorieva T.F., Barinova A.P. et al. Nanocrystalline complex oxides obtained by mechanochemical synthesis. *Khimiya v interesah ustojchivogo razvitiya* [Chemistry in the interests of sustainable development], 1998;6(2-3):115-119. (In Russ.)
21. Risovanny V.D., Zakharov A.V., Klochkov E.P. et al. *Poglotitel neutronov dlya yadernykh reaktorov* [Neutron absorber for nuclear reactors]. Patent RF, no. 2124240 C1, 1998.
22. Risovany V.D., Zakharov A.V., Muraleva E.M., Sokolov V.F. Development of production of dysprosium hafnate as an absorbing material for regulatory bodies of selective thermal neutron reactors. *Sbornik trudov AO GNC NIIAR* [Proceedings of JSC SSC NIIAR]. Dimitrovgrad, 2011;(2):8-13. (In Russ.)
23. Komissarova L.N., Shatsky V.M., Pushkin G.Ya., Shcherbakova L.G., Mamsurova L.G., Sukhanova G.E. *Soedineniya redkozemelnykh elementov. Karbonaty, oksalaty, nitraty, titanaty* [Compounds of rare earth elements. Carbonates, oxalates, nitrates, titanates]. Moscow: Nauka, 1984, 235 p. (In Russ.)
24. Shlyakhtina A.V. Morphotropy, polymorphism and isomorphism of complex oxides based on Ln₂M₂O₇ (b = La–Lu, m, SK; M = ti, ZR, HF and ZP). *Kristallografiya* [Crystallography], 2013;58(4):545-560. (In Russ.)
25. Gonzalez M., Moore K., Jurado J.R. and Durand P. Solid-phase reactions, microstructure and phase relations in the ZrO₂-rich region of the ZrO₂-Yb₂O₃ system. *Journal of Materials Science*. 1993;28(13):3451-3456.
26. Konakov V.G., Shorokhov A.V., Borisova N.V., Golubev S.N., Solovyova E.N., Ushakov V.M. Influence of dispersion of nanoscale precursors Y₂O₃-ZrO₂, Ce₂O₃-ZrO₂ and Ce₂O₃-Y₂O₃-ZrO₂ on electrical conductivity and sensory properties of finished ceramics. *Reviews on advanced materials science*. 2012;32(1):34-43.
27. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Karlina A.I., Skiba V.Y. Investigation of content and possibility of extracting matrix and rare elements from ash and slag wastes of heat power plant. *Metallurg* [Metallurgist], 2022;65(11-12):1324-1330. DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.

Поступила 28.12.2024; принята к публикации 20.02.2025; опубликована 28.03.2025
Submitted 28/12/2024; revised 20/02/2025; published 28/03/2025

Шарипзянова Гюзель Харрясовна – 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 (Eng.), Vice-Rector for Academic Affairs, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.

Email: guzel@mtw.ru. ORCID 0000-0002-0863-7490