

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-183-195>
УДК 537.622.4:621.318.1



Оригинальная статья

Д. И. Тишкевич^{1*}, С. А. Герман¹, А. Л. Желудкевич¹, Т. Н. Вершинина^{2,3},
А. А. Роткович¹, А. А. Бондарук¹, С. В. Леончик¹, В. С. Урбанович¹,
Е. С. Дашкевич¹, А. В. Труханов¹

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,

ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Российская Федерация

³Университет «Дубна»,
ул. Университетская, 19, 141982, Дубна, Российская Федерация

**НОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Аннотация. В качестве защиты от ионизирующего излучения предложен новый композиционный материал системы W–Bi₂O₃. Представлена усовершенствованная методика горячего изостатического прессования для получения композиционных материалов. Длительность спекания в условиях высокого давления и температуры составила 3 мин. Исследование микроструктуры и химического состава образцов композитов W–Bi₂O₃ проводили с использованием сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии соответственно. Оценку плотности полученных материалов осуществляли с помощью метода Архимеда. Наиболее плотными оказались образцы, полученные при давлении 5 ГПа и температурах 25 и 500 °С, плотность которых составила 18,10 и 17,85 г/см³ соответственно. Установлено, что воздействие высоких температур в процессе спекания негативно сказывается как на микроструктуре, так и на плотности образцов из-за протекания окислительно-восстановительной реакции, сопровождающейся восстановлением Bi и окислением W. Результаты исследования структуры композиционных материалов системы W–Bi₂O₃ методом рентгеноструктурного анализа показали, что все образцы включают основную объемно-центрированную фазу W, а наличие фазы WO₂ отмечается лишь при увеличении температуры синтеза до 850 °С, что подтверждается возникновением рефлексов 111 и 22-2. Проведено исследование эффективности экранирования композиционных материалов от гамма-излучения с помощью программного комплекса Phy-X/PSD. В качестве источника гамма-квантов использовали Co⁶⁰ с энергией 0,826–2,506 МэВ. Результаты моделирования были сравнены с расчетами для Pb и Bi. Определены основные параметры: линейный коэффициент ослабления, длина свободного пробега и слой половинного ослабления. Результаты расчета показали, что композит системы W–Bi₂O₃ по своим экранирующим свойствам превосходит Pb и Bi, что делает его перспективным для использования в качестве материала радиационной защиты.

Ключевые слова: композиты на основе вольфрама, висмут, горячее изостатическое прессование, структура, эффективность экранирования, гамма-излучение

Благодарности: работа выполнена при поддержке научно-технической программы Союзного государства «Комплекс-СГ» (договор № 42-2023 от 27.03.2023 г.).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Тишкевич Дарья Ивановна* – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0001-9774-8522>. E-mail: dashachushkova@gmail.com; Герман Степан Алексеевич – лаборант лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Нацио-

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

нальнай акадэміі навук Беларусі па матэрыялаведэнню. E-mail: stepangrmp@gmail.com; *Желудкевич Александр Ларионович* – кандидат фізіка-матэматычных навук, доцент, заведуючы лабораторыяй фізікі магнітных матэрыялаў Научно-практычнага цэнтра Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па матэрыялаведэнню. <https://orcid.org/0000-0003-1900-0564>. E-mail: zheludkevich27@gmail.com; *Вершинина Татьяна Николаевна* – кандидат фізіка-матэматычных навук, доцент, старшы навучны супрацоўнік лабораторыі нейтроннай фізікі ім. І. М. Франка. <https://orcid.org/0000-0002-7748-5443>. E-mail: vershinina@nf.jinr.ru; *Роткович Анастасия Александровна* – маладшы навучны супрацоўнік лабораторыі фізікі магнітных плёнак Научно-практычнага цэнтра Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па матэрыялаведэнню. E-mail: rotkovich@gmail.com; *Бондарук Анастасия Александровна* – маладшы навучны супрацоўнік лабораторыі фізікі магнітных плёнак Научно-практычнага цэнтра Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па матэрыялаведэнню. <https://orcid.org/0000-0003-4126-5294>. E-mail: bondaruk625@gmail.com; *Леончик Сергей Викентьевич* – кандидат фізіка-матэматычных навук, заведуючы лабораторыяй тугоплавкай керамікі і наноматэрыялаў Научно-практычнага цэнтра Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па матэрыялаведэнню. E-mail: leonchik@physics.by; *Урбанович Владимир Степанович* – кандидат фізіка-матэматычных навук, вядучы навучны супрацоўнік лабораторыі тугоплавкай керамікі і наноматэрыялаў Научно-практычнага цэнтра Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па матэрыялаведэнню. E-mail: urban@physics.by; *Дашкевич Елена Сергеевна* – навучны супрацоўнік лабораторыі фізікі магнітных плёнак Научно-практычнага цэнтра Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па матэрыялаведэнню. E-mail: gramovich5@yandex.ru; *Труханов Алексей Валентинович* – доктар фізіка-матэматычных навук, доцент, заступнік генеральнага дырэктара Научно-практычнага цэнтра Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі па матэрыялаведэнню. <https://orcid.org/0000-0003-3430-9578>. E-mail: truhanov86@mail.ru

Вклад авторов: *Тишкевич Дарья Ивановна* – абоснаванне концепцыі, разробка дызайна эксперыментальнага ісследования, планіраванне ісследования, правядзенне эксперыменту, напісанне тэкста рукапісу; *Герман Степан Алексеевич* – правядзенне інструментальных ісследованияў, напісанне тэкста рукапісу; *Желудкевич Александр Ларионович* – планіраванне ісследования, правядзенне эксперыменту, рэдактіраванне тэкста рукапісу; *Вершинина Татьяна Николаевна* – разробка дызайна эксперыментальнага ісследования, інтэрпрэтацыя рэзультатаў ісследования, рэдактіраванне тэкста рукапісу; *Роткович Анастасия Александровна* – збор і сістэматызацыя даных, мадэліраванне (камп’ютэрнае, матэматычнае), рэдактіраванне тэкста рукапісу; *Бондарук Анастасия Александровна* – аналіз і абагульненне даных літэратуры, прымяненне статыстычных (матэматычных) метадаў для аналізу даных, работа з графічным матэрыялам; *Леончик Сергей Викентьевич* – інтэрпрэтацыя рэзультатаў ісследования, абагульненне рэзультатаў ісследования; *Урбанович Владимир Степанович* – правядзенне эксперыменту, рэдактіраванне тэкста рукапісу; *Дашкевич Елена Сергеевна* – збор і сістэматызацыя даных, рэдактіраванне тэкста рукапісу; *Труханов Алексей Валентинович* – інтэрпрэтацыя рэзультатаў ісследования, рэдактіраванне тэкста рукапісу.

Для цитирования: Новые композиционные материалы для защиты от гамма-излучения / Д. И. Тишкевич [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 3. – С. 183–195. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-183-195>

Поступила в редакцию: 02.06.2023

Утверждена к публикации: 07.09.2023

Подписана в печать: 21.09.2023

Original article

Daria I. Tishkevich^{1*}, Stepan A. German¹, Aliaksandr L. Zheludkevich¹, Tatiana N. Vershinina^{2,3}, Anastasia A. Rotkovich¹, Anastasia A. Bondaruk¹, Sergey V. Leonchik¹, Vladimir S. Urbanovich¹, Elena S. Dashkevich¹, Alex V. Trukhanov¹

¹Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus,
19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute for Nuclear Research,

6, Joliot-Curie Str., 141980, Dubna, Russian Federation

³University “Dubna”, 19, Universitetskaya Str., 141982, Dubna, Russian Federation

NEW COMPOSITE MATERIALS FOR PROTECTION AGAINST GAMMA RADIATION

Abstract. A new composite material of W–Bi₂O₃ system is proposed as a protection against ionizing radiation. An improved method of hot isostatic pressing for the preparation of composite materials is proposed. The duration of sintering under conditions of high pressure and temperature was 3 minutes. The study of the morphology and chemical composition of W–Bi₂O₃ composites was carried out using scanning electron microscopy and X-ray energy-dispersive spectroscopy respectively. The density evaluation of the obtained materials was carried out using the Archimedes’ method. The densest samples were obtained at a pressure of 5 GPa and temperatures of 25 and 500 °C, the density of which was 18.10 and 17.85 g/cm³, respectively. It is shown that exposure to high temperatures during sintering adversely affects both the microstructure and density of the samples due to the redox reaction accompanied by the reduction of Bi and the oxidation of W. The results of studying the W–Bi₂O₃ structure by X-ray diffraction analysis showed that all samples include the main body-centered phase W, and the presence of the WO₂ phase is noted only when the sintering temperature is increased to 850 °C, which is confirmed

by the appearance of reflections 111 and 22-2. Shielding effectiveness of the W–Bi₂O₃ composite materials from gamma radiation using the Phy-X/PSD software was evaluated. Co⁶⁰ with an energy of 0.826–2.506 MeV was used as a source of gamma quanta. The simulation results were compared with the calculations for Pb and Bi. Key parameters such as linear attenuation coefficient, mean free path and half value layer are determined. The calculation results showed that the W–Bi₂O₃ composite surpasses Pb and Bi in its shielding properties, which makes it promising for use as a radiation shielding material.

Keywords: tungsten composite, bismuth, hot isostatic pressing, structure, shielding efficiency, gamma radiation

Acknowledgements: this research was funded by the scientific and technical program of the Common State “Complex-SG” (contract no. 42-2023 from 27.03.2023).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Daria I. Tishkevich* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher, Laboratory of Physics of Magnetic Films at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0001-9774-8522>. E-mail: dashachushkova@gmail.com; *Stepan A. German* – Laboratory Assistant of the Laboratory of Physics of Magnetic Films at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: stepangrmn@gmail.com; *Aliaksandr L. Zhaludkevich* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Head of Laboratory of Physics of Magnetic Materials at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-1900-0564>. E-mail: zheludkevich27@gmail.com; *Tatiana N. Vershinina* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher at Frank Laboratory of Neutron Physics. <https://orcid.org/0000-0002-7748-5443>. E-mail: vershinina@nf.jinr.ru; *Anastasia A. Rotkovich* – Junior Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Films at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: rotkovich@gmail.com; *Anastasia A. Bondaruk* – Junior Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Films at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4126-5294>. E-mail: bondaruk625@gmail.com; *Sergey V. Leonchik* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Refractory Ceramics and Nanomaterials at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: leonchik@physics.by; *Vladimir S. Urbanovich* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Refractory Ceramics and Nanomaterials Center at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: urban@physics.by; *Elena S. Dashkevich* – Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Films at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: gramovich5@yandex.ru; *Alex V. Trukhanov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Deputy General Director at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-3430-9578>. E-mail: truhanov86@mail.ru

Contribution of the authors: *Daria I. Tishkevich* – justification of the concept, development of the design of an experimental study, planning of the investigations, conducting an experiment, writing and editing of the manuscript text; *Stepan A. German* – conducting of the instrumental research, writing and editing of the manuscript text; *Aliaksandr L. Zhaludkevich* – planning of the study, conducting the experiment, editing of the manuscript text; *Tatiana N. Vershinina* – development of the design of an experimental study, interpretation of the results, editing of the manuscript text; *Anastasia A. Rotkovich* – collection and systematization of the data, modeling (computer, mathematical), editing of the manuscript text; *Anastasia A. Bondaruk* – analysis and generalization of literature data, application of statistical (mathematical) methods for data analysis, work with graphic material; *Sergey V. Leonchik* – interpretation of research results, generalization of research results; *Vladimir S. Urbanovich* – conducting an experiment, editing of the manuscript text; *Elena S. Dashkevich* – collection and systematization of data, editing of the manuscript text; *Alex V. Trukhanov* – interpretation of the results, editing of the manuscript text.

For citations: Tishkevich D. I., German S. A., Zhaludkevich A. L., Vershinina T. N., Rotkovich A. A., Bondaruk A. A., Leonchik S. V., Urbanovich V. S., Dashkevich E. S., Trukhanov A. V. New composite materials for protection against gamma radiation. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 3, pp. 183–195 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-183-195>

Received: 02.06.2023

Approved for publication: 07.09.2023

Signed to the press: 21.09.2023

Введение. В настоящее время во многих областях промышленности (электронная, атомная, медицина, космическая и т.д.) получили широкое распространение микроэлектронные изделия, а применение ионизирующего излучения в различных направлениях научной деятельности значительно возрастает [1]. Современные технологии позволяют разрабатывать микроэлектронные приборы с высокой степенью миниатюризации и производительности, что обуславливает сильную зависимость надежности данного оборудования от условий окружающей среды [2]. Ионизирующее излучение – любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к ее ионизации (гамма-, рентгеновское излучение, электроны, протоны и т.д.) [3]. Так, при взаимодействии гамма-излучения с твердым телом наблюдаются следующие процессы: фотоэффект, эффект Комптона, образование электрон-позитронных пар [4, 5].

Для защиты электронных устройств от воздействия ионизирующего излучения разработан ряд методов [6]. Локальная защита с использованием материалов на основе тяжелых элементов является эффективным методом защиты от излучения. Наиболее широко распространенным материалом в этой области является свинец [7]. Физические и механические свойства свинца сделали его перспективным материалом для радиационной защиты. Свинец недорогой, прост в обработке, однако его токсичность может нанести большой вред организму человека и окружающей среде [7–10]. В связи с этим существует потребность в разработке альтернативных материалов, которые являются более экологически чистыми, при этом их можно использовать в качестве экранирующего материала.

Авторы работы [7] провели сравнение характеристик свинца, вольфрама и композита WC–Co, полученных методом горячего прессования. Для WC–Co и свинца были зафиксированы практически одинаковые результаты в свойствах линейного ослабления гамма-излучения изотопов Cs¹³⁷ (1,06 и 1,05 см⁻¹ соответственно) и Co⁶⁰ (0,64 и 0,62 см⁻¹ соответственно), в то время как W показал наилучшие результаты: 1,7 см⁻¹ для Cs¹³⁷ и 1,02 см⁻¹ для Co⁶⁰. При этом чистый W имеет наименьшее значение слоя половинного ослабления (0,407 см для Cs¹³⁷ и 0,676 см для Co⁶⁰). Для WC–Co значения слоя половинного ослабления составили 0,652 и 1,07 см соответственно, тогда как для Pb – 0,66 и 1,1 см.

В [8] сравнивались свойства образцов толщиной 0,1, 0,5 и 1 см из WC и Pb. Результаты этой работы показали, что WC в диапазоне энергий гамма-излучения 0,160–0,662 МэВ обладает практически эквивалентными линейным и массовым коэффициентами ослабления. Авторы работ [9–13] синтезировали легкие композиты, такие как полиэтилен высокой плотности, теллуриновые стекла с добавлением оксида бария в различных отношениях, и выявили, что их свойства как материалов радиационной защиты хуже свинца (плотность свинца составляет 11,34 г/см³, плотность теллуридных стекол – 5,29–5,34 г/см³ в зависимости от состава), однако безвредность таких материалов ставит их на ступень выше свинцовой защиты. В [14, 15] рассматривались различные бессвинцовые композиты (Sb/Bi, Ba/Bi, Sb/W и др.) и однокомпонентные материалы (Bi, W, Sb, Ba, Cs и др.) и проводилось их сравнение с Pb. Рассматриваемые материалы продемонстрировали экранирующие свойства, практически эквивалентные свинцу.

Различные композиции цемента [16], композиции на основе вольфрама [17–19] также были подробно рассмотрены и изучены. Причем композиты с вольфрамом (W–C, W–Cu) показали наилучшие результаты из всех вышеупомянутых материалов. Так, в [18] был синтезирован композиционный материал из WC и этиленвинилацетата (WC–ЭВА) в разных соотношениях (50 % ЭВА + 50 % WC; 40 % ЭВА + 60 % WC; 30 % ЭВА + 70 % WC), эффективность экранирования образцов сравнивали с эффективностью слоя Pb толщиной 1 и 2 мм. В качестве источника излучения выступили изотопы Cs¹³⁷. Полученные результаты для каждого из рассматриваемых составов WC–ЭВА были эквивалентны друг другу и превышали эффективность экранирования свинцом на 5 % при толщине 1 мм и на 9–10 % для толщины 2 мм. Тогда как для источника I¹³¹ эти значения были в 1,5 раза выше эффективности свинцовой защиты.

Основным из главных параметров, характеризующих материалы радиационной защиты, является их плотность. В силу высоких плотности и температуры плавления, а также доступности по цене альтернативой свинцу является вольфрам [14, 15, 17–19]. Однако из-за его тугоплавкости процесс получения современными методами порошковой металлургии вольфрамовых экранов радиационной защиты является весьма длительным и дорогостоящим [20]. Для решения этой проблемы предлагается использовать легкоплавкие материалы в качестве связующих (матрицы). В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты можно разделить на матрицу и включенные в нее армирующие элементы [21]. Для этого в качестве связующего компонента в композиции на основе вольфрама применяются углеродные материалы, медь, кобальт, висмут и др. [17–25].

Существует множество методов изготовления композитов на основе тугоплавких материалов: магнетронное распыление, газовое распыление, центробежное распыление, искровое плазменное спекание, технологии 3D-печати, селективное лазерное плавление, экструзия, струйная печать, горячая штамповка и др. [21, 27–32]. Однако значительная длительность процессов обуславливает

использование иных методов синтеза, продолжительность которых меньше и конечный результат соответствует предъявляемым требованиям к материалу.

Цель данной работы – получение композиционного материала W–Bi₂O₃ методом горячего изостатического прессования, анализ влияния условий синтеза композиционных материалов на физико-технические свойства и эффективность экранирования гамма-излучения.

Методика эксперимента. Исходный материал представлял собой смесь порошков, полученную путем измельчения и перемешивания отдельно взятых порошков W (99 мас.%) и связующего материала Bi₂O₃ (1 мас.%) с помощью планетарной шаровой мельницы Fritsch Pulverisette (FRITSCH Laboratory Instruments, Германия). Продолжительность гомогенизации составляла 3 ч при скорости вращения 300 об/мин. Полученную смесь порошков формовали в образцы в виде таблеток размером 2,3 ± 0,1 см путем холодного твердофазного прессования.

Далее с помощью метода горячего изостатического прессования (одновременного термобарического воздействия на замкнутый объем) при различных условиях синтеза (табл. 1) были получены образцы композиционного материала W–Bi₂O₃, которые представляли собой пластины размером 2 × 2 см и толщиной 2 мм. Всего было изготовлено шесть образцов одинаковой формы.

Таблица 1. Условия синтеза композиционного материала W–Bi₂O₃

Table 1. Synthesis conditions of the W–Bi₂O₃ composite material

№ образца	Температура синтеза, °С	Давление, ГПа
1	2000	5
2	1500	
3	1000	
4	850	
5	500	
6	25	

Каждый из образцов был помещен в контейнер, в котором находилась графитосодержащая смесь с низким сопротивлением, обеспечивающая быстрый набор высоких значений температуры. Известно, что высокие значения температур стимулируют пластичность зерен, вследствие чего возможно получение материалов со значением плотности, близким к теоретическому [26]. Высокое значение давления (5 ГПа), которым воздействовали на все образцы, способствовало увеличению площади реакции из-за хорошего уплотнения зерен порошков. Главная особенность данного метода – высокая скорость процесса, которая обеспечивается тем, что нагрев и охлаждение полученных образцов протекает при постоянном воздействии высокого давления.

Исследование морфологии и химического состава образцов композитов проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Carl Zeiss EVO10 (Carl Zeiss, Германия) в сочетании с детектором энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС) Oxford (Oxford Instruments NanoAnalysis, Германия).

Значения эффективных плотностей образцов рассчитывали с помощью метода гидростатического взвешивания, суть которого заключается в измерении массы образцов в два этапа: вначале на воздухе, а потом в жидкости с известными точными значениями плотности. В нашем случае в качестве жидкости выступала дистиллированная вода. Значения плотностей были получены с использованием справочных значений плотностей отдельно взятых компонентов композиционного материала и результатов гидростатического взвешивания. Теоретическая плотность ($\rho_{\text{теор}}$) рассчитывалась по формуле

$$\rho_{\text{теор}} = \frac{1}{V}, \quad (1)$$

где V – объем композита, см³, который в свою очередь определялся следующим образом:

$$V = \frac{x_W}{\rho_W} + \frac{x_{\text{Bi}_2\text{O}_3}}{\rho_{\text{Bi}_2\text{O}_3}}. \quad (2)$$

Здесь x – процентное содержание компонента композиционного материала; ρ – плотность компонента композиционного материала, г/см³.

Эффективная плотность ($\rho_{\text{эф}}$) рассчитывалась по формуле

$$\rho_{\text{эф}} = \frac{M}{M - m} \cdot \rho_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где M – масса композита на воздухе, г; m – масса композита в жидкости, г; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, г/см³. Выражение (3) показывает, насколько близки значения эффективной плотности образцов к теоретической для состава W–Bi₂O₃ в процентном отношении.

Эффективная плотность ($\rho_{\text{эф}}$) каждого образца сравнивалась с теоретической плотностью, с помощью чего рассчитывалась относительная плотность образцов ($\rho_{\text{отн}}$, %):

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_{\text{эф}}}{\rho_{\text{теор}}} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Относительную пористость ($P_{\text{отн}}$) образцов определяли согласно выражению

$$P_{\text{отн}} = 100 \% - \rho_{\text{отн}}. \quad (5)$$

Исследование фазового состава и оценка параметров элементарной решетки осуществлялись методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с использованием порошкового дифрактометра PANalytical EMPYREAN (Malvern Panalytical Ltd., Великобритания) с CuK_α-излучением. Дифракционные линии регистрировали для $2\Theta = 20\text{--}106^\circ$ с шагом $0,02^\circ$. Объемные доли отдельных фаз оценивались с использованием программы PowderCell 2.4.

Эффективность экранирования гамма-излучения определяли методом моделирования с помощью программного комплекса Phy-X/PSD [31]. В качестве источника гамма-квантов использовали Co⁶⁰ с энергией 0,826–2,506 МэВ. С помощью данного программного обеспечения были определены следующие параметры:

линейный коэффициент ослабления (ЛКО)

$$\text{ЛКО} = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{N_0}{N} \right), \quad (6)$$

слой половинного поглощения (СПО)

$$\text{СПО} = \frac{0,693}{\text{ЛКО}}, \quad (7)$$

длина свободного пробега (ДСП)

$$\text{ДСП} = \frac{1}{\text{ЛКО}}, \quad (8)$$

где ρ – плотность исследуемого материала, г/см³; x – толщина материала, см; N_0 – интенсивность падающего на экран гамма-излучения, Вт/см²; N – интенсивность прошедшего через экран гамма-излучения, Вт/см². Следует пояснить, что СПО – это толщина материала экрана, после прохождения которого интенсивность направленного ионизирующего излучения уменьшится в 2 раза, служит характеристикой защитных свойств материала от воздействия ионизирующего излучения; ДСП – это среднее расстояние, которое может пройти гамма-квант без столкновения, после чего изменяется его направление или энергия.

Полученные расчетные параметры для композиционного материала W–Bi₂O₃ сравнивали с Pb и Bi, результаты для которых также были получены с помощью Phy-X/PSD.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения плотности и пористости композиционного материала W–Bi₂O₃ приведены в табл. 2. Видно, что наибольшее значение плотности композита 18,10 г/см³ соответствует образцу, спеченному при 500 °С (№ 5), который в свою очередь немного уступает по этому параметру материалу, спеченному при 25 °С (№ 6). Наименьшим значением плотности (16,98 г/см³) обладает образец № 1, полученный при 2000 °С.

Т а б л и ц а 2. Результаты определения плотности и пористости образцов композиционного материала W–Bi₂O₃

Table 2. The results of determining the density and porosity of the W–Bi₂O₃ composite materials samples

№ образца	$\rho_{(W-Bi_2O_3)}$, г/см ³	$P_{отн}$, %	$P_{отн}$, %
1	16,98	89,13	10,87
2	17,29	90,76	9,24
3	17,45	91,06	8,94
4	17,36	91,11	8,89
5	17,85	93,70	6,30
6	18,10	95,01	4,99

Исследование относительной плотности показало, что она достаточно высока для всех образцов и составляет 89,13–95,01 %. В то же время по мере уменьшения температуры спекания этот параметр снижается от 10,87 до 4,99 %, что свидетельствует о небольшом отклонении от теоретического значения и высокой степени компактизации образцов.

Анализ СЭМ-изображений (рис. 1) выявил, что при повышении температуры спекания образцов композиционных материалов возникают дефекты на их поверхности и в объеме. Особенно отмечаются дефекты микроструктуры для образца № 1 (рис. 1, *a*), который был получен при наибольшей температуре. Тогда как образец № 3 (рис. 1, *b*) обладает дефектами меньших размеров и их количество снижается с уменьшением температуры до 1000 °С. Образцы с наибольшей плотностью № 5 (рис. 1, *c*) и № 6 (рис. 1, *d*), полученные при 500 °С и 25 °С соответственно, имеют значительно меньшее количество дефектов по сравнению с образцами, полученными при более высоких температурах.

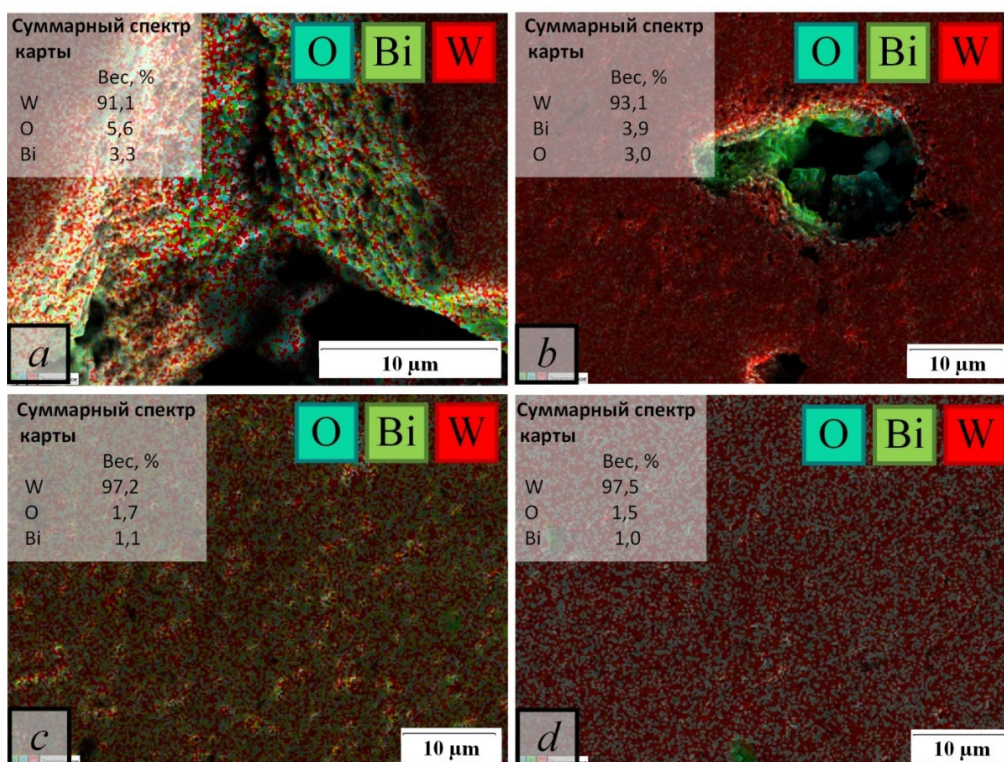


Рис. 1. Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, и карты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии для образцов композиционных материалов W–Bi₂O₃: № 1 (*a*), № 3 (*b*), № 5 (*c*), № 6 (*d*)

Fig. 1. Images obtained using a scanning electron microscope and maps of energy dispersive X-ray spectroscopy of the W–Bi₂O₃ composite materials samples: no. 1 (*a*), no. 3 (*b*), no. 5 (*c*), no. 6 (*d*)

Результаты химического анализа показали, что содержание кислородной фазы увеличивается с ростом температуры спекания образцов. Образцы, синтезированные в диапазоне температур от 25 до 500 °С, обладают большим содержанием вольфрама, что свидетельствует о более плотной структуре (образцы № 5 и № 6). Повышение содержания кислорода в образцах № 1 и № 3 (температура синтеза 2000 °С и 1000 °С соответственно) может быть обусловлено протеканием окислительно-восстановительной реакции (ОВР) с возрастанием температуры синтеза. Очевидно, что дефектность структуры образцов № 1 и № 3 напрямую связана с повышенным содержанием кислорода (см. рис. 1, *a* и *b*). В данном случае при протекании ОВР оксид висмута восстанавливается до металлического висмута, в то время как вольфрам окисляется и становится WO_2 , что подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа (рис. 2). Вероятнее всего, протекание ОВР можно назвать главной причиной возникновения дефектов.

Оценка результатов РСА показала, что все образцы включают основную объемно-центрированную фазу W, а наличие фазы WO_2 отмечается при увеличении температуры синтеза до 850 °С, что подтверждается возникновением рефлексов 111 и 22-2. Доля Bi_2O_3 в спеченном материале составляет 1 мас.% и Bi не удается зафиксировать на дифрактограммах, поскольку данное количество фазы соответствует пределу обнаружения метода. Наличие рефлексов, отвечающих за фазу WO_2 , можно связать с температурой окисления W, значение которой при нормальных условиях находится в диапазоне 400–490 °С. Однако в условиях высокого давления и ограниченного объема температура может возрастать, что объясняет отсутствие оксидной фазы у образца, полученного при 500 °С, и появление этой же фазы у образца, спеченного при 850 °С.

На рис. 3 приведен график зависимости содержания фаз чистого вольфрама и оксида вольфрама в исследуемых композиционных материалах от температуры синтеза образцов. Видно, что увеличение объемной доли WO_2 происходит с ростом температуры спекания образцов. Так, в образце № 6, спеченном при 5 ГПа и 25 °С, отсутствует WO_2 -фаза, как и в образце № 5, полученном при 5 ГПа и 500 °С. Однако с увеличением температуры спекания с 1000 по 2000 °С

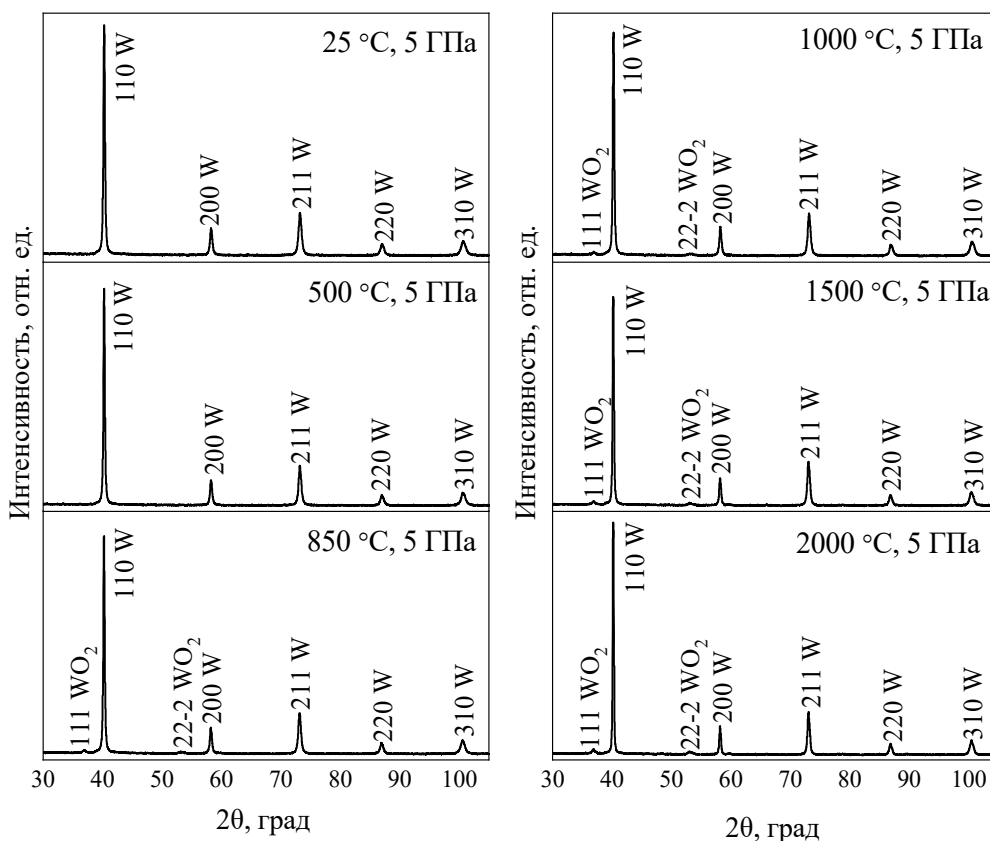


Рис. 2. Результаты рентгеноструктурного анализа образцов композита W– Bi_2O_3

Fig. 2. Results of X-ray diffraction analysis of the W– Bi_2O_3 composite samples

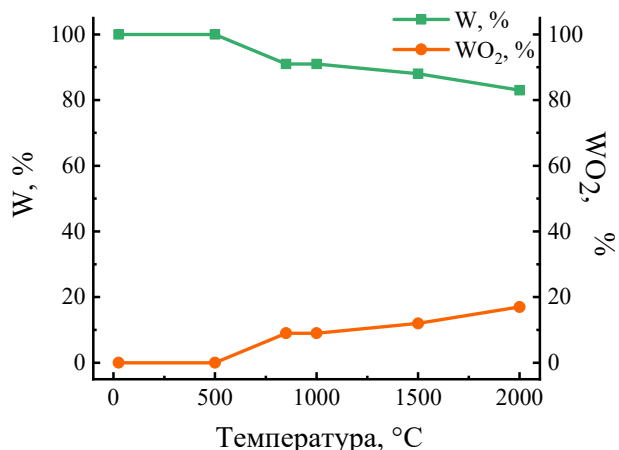


Рис. 3. График зависимости содержания фаз W и WO₂ от температуры спекания образцов композиционного материала W–Bi₂O₃

Fig. 3. Graph of the dependence of the content of W and WO₂ phases on the sintering temperature of W–Bi₂O₃ composite material samples

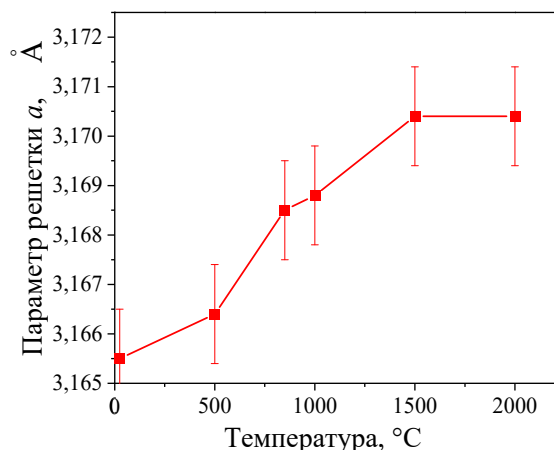


Рис. 4. График зависимости параметра решетки W от температуры спекания образцов композиционного материала W–Bi₂O₃

Fig. 4. Graph of dependence of the W lattice parameter on sintering temperature of W–Bi₂O₃ composite material samples

(образцы № 4 и № 1 соответственно) наблюдается возникновение фазы WO₂ и содержание W снижается от 91 до 83 % (образец № 1, полученный при 2000 °C).

График зависимости параметра решетки W от температуры спекания представлен на рис. 4. Видно, что при увеличении температуры до 1500 °C происходит рост параметра решетки W, и далее, при повышении температуры до 2000 °C, параметр решетки остается неизменным. В связи с этим можно предположить, что висмут имеет незначительную растворимость в вольфраме.

Эффективность экранирования гамма-излучения определяли для образца W–Bi₂O₃ с наибольшим значением плотности (образец № 6, плотность 18,10 г/см³) и сравнили с Pb и Bi для демонстрации преимуществ рассматриваемого композиционного материала. На рис. 5 представлены графики зависимости параметров, характеризующих эффективность экранирования, от энергии гамма-излучения в диапазоне 0,826–2,506 МэВ.

Из рис. 5, а видно, что композиционный материал W–Bi₂O₃ обладает более высоким значением ЛКО, что говорит об его эффективности по отношению к сравниваемым материалам. В данном диапазоне энергий основным механизмом взаимодействия гамма-излучения с материалами с высоким атомным номером, такими как W, Pb и Bi, является комптоновское рассеяние, которое зависит от атомного номера материала и его плотности [33, 34]. Так, при достижении энергии в 0,826 МэВ значение ЛКО для композиционного материала W–Bi₂O₃ составляет 1,19 см⁻¹, тогда как для Pb и Bi при той же энергии значение ЛКО равно 0,97 и 0,85 см⁻¹ соответственно.

Результаты расчета толщины слоя половинного ослабления (см. рис. 5, б) показали, что W–Bi₂O₃ обладает наименьшими значениями СПО в сравнении с Pb и Bi. Так, при энергии 2,506 МэВ СПО для свинца составляет 1,4 см, тогда как для висмута он равен 1,6 см, а для композиционного материала W–Bi₂O₃ – 0,91 см. Данные результаты свидетельствуют о том, что наилучшими массогабаритными параметрами из всех исследуемых материалов обладает композит W–Bi₂O₃, поэтому для эффективной защиты от гамма-излучения в диапазоне энергий 0,826–2,506 МэВ рекомендуется изготавливать экраны толщиной 2 мм и более. Результаты расчетов длины свободного пробега, представленные на рис. 5, в, показали, что для энергии 2,506 МэВ значение ДСП для композиционного материала W–Bi₂O₃ составляет 1,3 см, для Pb оно равняется 2,02 см, тогда как Bi – 2,3 см, что также свидетельствует о превосходстве композита над сравниваемыми материалами.

Заключение. С использованием усовершенствованного метода горячего изостатического прессования синтезированы образцы на основе композиционного материала системы W–Bi₂O₃. Изучение влияния условий высокого давления и температур на микроструктуру и плотность

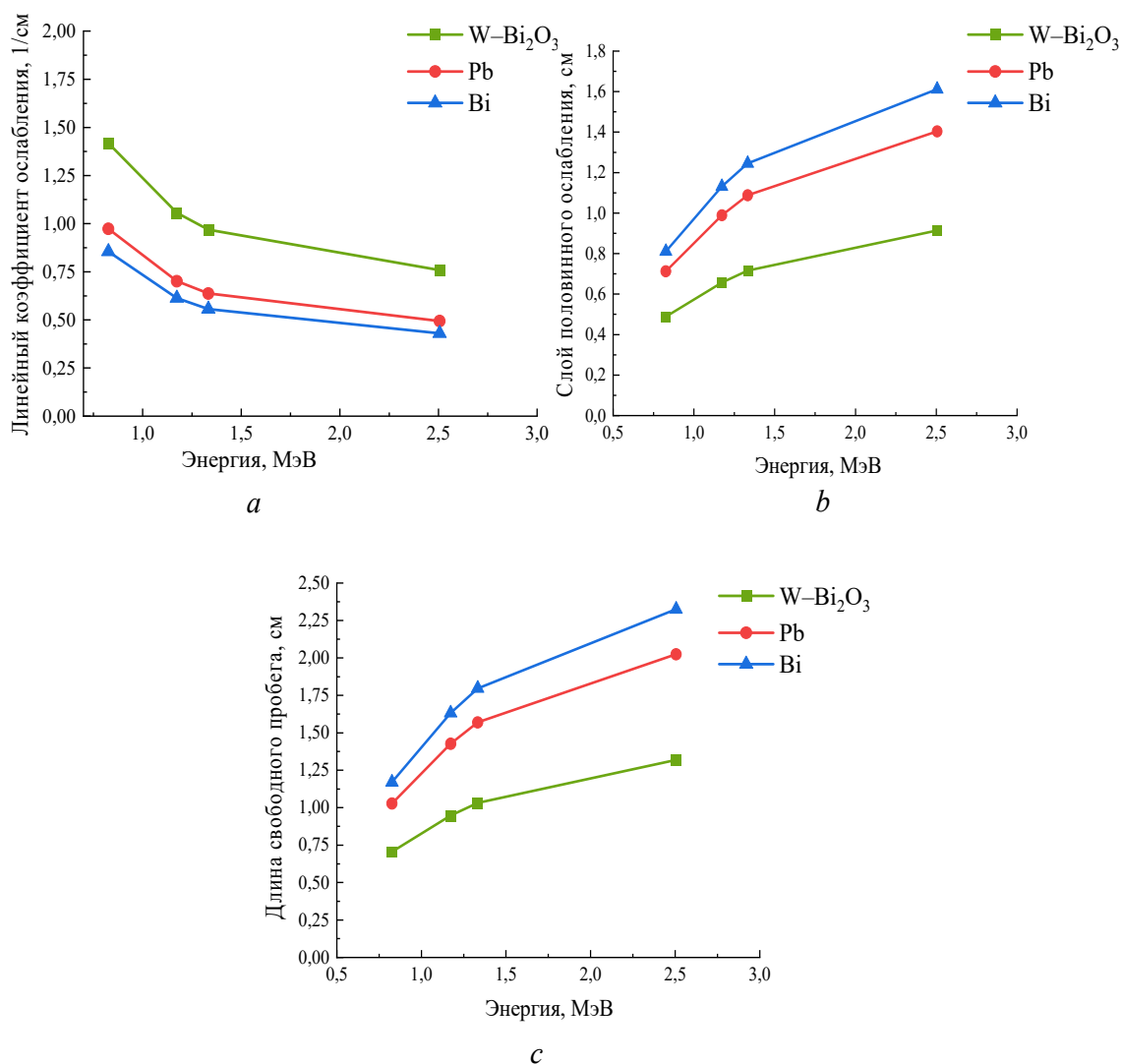


Рис. 5. Зависимость линейного коэффициента ослабления (а), слоя половинного поглощения (b) и длины свободного пробега (с) композиционных материалов W-Bi₂O₃ в диапазоне энергий гамма-излучения 0,340–2,506 МэВ Fig. 5. Dependence of linear attenuation coefficient (a), half value layer (b) and mean free path (c) of W-Bi₂O₃ composite materials samples in the range of gamma radiation energies of 0.340–2.506 MeV

показало, что при давлении 5 ГПа с ростом температуры с 25 по 2000 °С количество дефектов в композитах увеличивается, а значение плотности снижается от 18,10 до 16,98 г/см³, тогда как расчетные значения пористости растут с 4,99 по 10,87 % соответственно.

При исследовании структуры образцов композитов W-Bi₂O₃ установлено, что все образцы имеют основную объемно-центрированную фазу W, а наличие фазы WO₂ отмечается при увеличении температуры синтеза до 850 °С, что подтверждается возникновением рефлексов 111 и 22-2. Отмечено увеличение содержания фазы WO₂ с ростом температуры спекания образцов. При изменении температуры до 1500 °С наблюдается рост значений параметра решетки W, и далее, при повышении температуры до 2000 °С, параметр решетки остается неизменным. В связи с этим можно предположить, что висмут имеет незначительную растворимость в вольфраме.

Проведена оценка эффективности экранирования композиционными материалами системы W-Bi₂O₃ от воздействия гамма-излучения методом математического моделирования в программном комплексе PhyX-PSD. В качестве источника гамма-излучения использовались изотопы Co⁶⁰ с энергией 0,826–2,506 МэВ. С целью сравнительного анализа моделирование проводили для таких материалов, как Pb и Bi. Расчеты показали, что для использования в качестве экранов радиационной защиты среди рассматриваемых материалов наиболее перспективны композиты W-Bi₂O₃. Особенно эффективными они являются в области наименьших энергий 0,826–1,173 МэВ,

тогда как при воздействии гамма-излучения с энергией от 1,173 до 2,506 МэВ необходимо изготавливать экраны с более высокими массогабаритными параметрами, а именно толщиной от 1,5 до 2,0 мм.

Рассмотренный композиционный материал является перспективным вариантом для замены свинца в сфере радиационной защиты. При соблюдении условий синтеза свойства композиционного материала отлично подходят для использования его в качестве радиационного экрана, а особенно эффективное его использование будет в условиях эксплуатации микроэлектронных приборов при воздействии низких энергий ионизирующего излучения. В будущем планируется изучение других составов для поиска альтернативных материалов, которые могут использоваться в качестве радиационных экранов.

Список используемых источников

1. Nanomaterials for radiation shielding / S. Thibeault [et al.] // *MRS Bulletin*. – 2015. – Vol. 40, iss. 10. – P. 836–841. <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.225>
2. Shultis, J. K. Radiation shielding technology / J. K. Shultis, R. E. Faw // *Health Phys.* – 2005. – Vol. 88, iss. 4. – P. 297–322. <http://doi.org/10.1097/01.HP.0000148615.73825.b1>
3. Zinkle, S. Radiation Effects in Refractory Alloys / S. Zinkle, F. Wiffen // *AIP Conf. Proc.* – 2004. – Vol. 699, iss. 1. – P. 733–740. <https://doi.org/10.1063/1.1649637>
4. Егранов, А. В. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом: учеб. пособие / А. В. Егранов. – Иркутск: Изд-во ИрГУ, 2013. – 114 с. – (Сер. «Методы экспериментальной физики конденсированного состояния»).
5. Воздействие ионизирующего излучения на вещество / Г. В. Новиков [и др.] // *Вестн. Том. гос. ун-та*. – 2008. – Т. 13, вып. 1. – С. 62–64.
6. Townsend, L. W. Overview of active methods for shielding spacecraft from energetic space radiation / L. W. Townsend // 1st International Workshop on Space Radiation Research and 11th Annual NASA Space Radiation Health Investigators Workshop Arona (Italy), May 27–31, 2000. – P. 84–85.
7. Buyuk, B. Comparison of Lead and WC-Co Materials against Gamma Irradiation / B. Buyuk, A. B. Tugrul // *Acta Phys. Pol., A*. – 2014. – Vol. 125. – P. 423–425. <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.125.423>
8. Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine / N. J. AbuAlRoos [et al.] // *Physica Medica*. – 2020. – Vol. 78. – P. 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.017>
9. Effect of BaO on lead free zinc barium tellurite glass for radiation shielding materials in nuclear application / K. Boonin [et al.] // *J. Non-Cryst. Solids*. – 2020. – Vol. 550. – Art. ID 120386. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120386>
10. Feasibility of polymer-based composite materials as radiation shield / M. Almurayshid [et al.] // *Radiat. Phys. Chem.* – 2021. – Vol. 183. – Art. ID 109425. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109425>
11. Gurler, O. Determination of Radiation Shielding Properties of Some Polymer and Plastic Materials against Gamma-Rays / O. Gurler, U. Tarim // *Acta Phys. Pol., A*. – 2016. – Vol. 130, iss. 1. – P. 236–238. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.236>
12. A lanthanum-barium-borovanadate glass containing Bi₂O₃ for radiation shielding applications / R. Kurtulus [et al.] // *Radiat. Phys. Chem.* – 2021. – Vol. 186. – Art. ID 109557. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109557>
13. Polymeric composite materials for radiation shielding: a review / C. V. More [et al.] // *Environ. Chem. Lett.* – 2021. – Vol. 19, iss. 3. – P. 2057–2090. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>
14. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments / J. P. McCaffrey [et al.] // *Medical Physics*. – 2007. – Vol. 34, iss. 2. – P. 530–537. <https://doi.org/10.1118/1.2426404>
15. McCaffrey, J. P. Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers / J. P. McCaffrey, E. Mainegra-Hing, H. Shen // *Medical Physics*. – 2009. – Vol. 36, iss. 12. – P. 5586–5594. <https://doi.org/10.1118/1.3260839>
16. Waly, El-Sayed A. Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials / El-Sayed A. Waly, M. A. Bourham // *Ann. Nucl. Energy*. – 2015. – Vol. 85. – P. 306–310. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.05.011>
17. Soylyu, H. M. Gamma radiation shielding efficiency of a new lead-free composite material / H. M. Soylyu, F. Yurt Lambrecht, O. A. Ersöz // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2015. – Vol. 305, iss. 2. – P. 529–534. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4051-3>
18. Isostatic Hot Pressed W–Cu Composites with Nanosized Grain Boundaries: Microstructure, Structure and Radiation Shielding Efficiency against Gamma Rays / D. I. Tishkevich [et al.] // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, iss. 10. – Art. ID 1642. <https://doi.org/10.3390/nano12101642>
19. Nano-W Dispersed Gamma Radiation Shielding Materials / Jaewoo Kim [et al.] // *Adv. Eng. Mater.* – 2014. – Vol. 16, iss. 9. – P. 1083–1089. <https://doi.org/10.1002/adem.201400127>
20. Function composites materials for shielding applications: Correlation between phase separation and attenuation properties / D. I. Tishkevich [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2019. – Vol. 771. – P. 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.209>

21. Laser powder bed fusion additive manufacturing of highly conductive parts made of optically absorptive carburized CuCr1 powder / Suraj Dinkar Jadhav [et al.] // *Materials & Design*. – 2021. – Vol. 198. – Art. ID 109369. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109369>
22. The crystallization character of W-Cu thin films at the early stage of deposition / Tianle Xie [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2019. – Vol. 690. – Art. ID 137555. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137555>
23. Directed energy deposition additive manufacturing of functionally graded Al-W composites / J. P. Kelly [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 39. – Art. ID 101845. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101845>
24. AbuAlRoos, N. J. Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review / N. J. AbuAlRoos, N. A. Baharul Amin, R. Zainon // *Radiat. Phys. Chem.* – 2019. – Vol. 165. – Art. ID 108439. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108439>
25. Muhammad Arif Sazali. A review on multilayer radiation shielding / Muhammad Arif Sazali, Nahrul Khair Alang Md Rashid, Khaidzir Hamzah // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 555, iss. 1. – Art. ID 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/555/1/012008>
26. Таиров, Ю. М. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов: учеб. для вузов / Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков. – 3-е изд. – СПб.: Лань, 2002. – 424 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
27. Порошковая металлургия: материалы, технология, свойства, области применения: справочник / И. М. Федорченко [и др.]; отв. ред. И. М. Федорченко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 624 с.
28. Development of oxide dispersion strengthened W alloys produced by hot isostatic pressing / J. Martinez [et al.] // *Fusion Eng. Des.* – 2011. – Vol. 86, iss. 9–11. – P. 2534–2537. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.01.134>
29. Electrodeposition conditions-dependent crystal structure, morphology and electronic properties of Bi films / A. Fedotov [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2021. – Vol. 887. – Art. ID 161451. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161451>
30. Preparation and characterization of nanosized W-Cu powders by a novel solution combustion and hydrogen reduction method / Xi Zhu [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2019. – Vol. 793. – P. 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.163>
31. Microstructure and mechanical properties investigation of WCu composites prepared from dual-layer coated powders / Yuan Li [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* – 2020. – Vol. 516. – Art. ID 146098. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146098>
32. Phy-X/PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry / E. Şakara [et al.] // *Radiat. Phys. Chem.* – 2020. – Vol. 166. – Art. ID 108496. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496>
33. Chen, S. Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams / S. Chen, M. Bourham, A. Rabiei // *Radiat. Phys. Chem.* – 2015. – Vol. 117. – P. 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.07.003>
34. Radiochemistry and Nuclear Chemistry / G. Choppin [et al.]. – 4th Ed. – Academic Press, 2013. – Chapter 7: Absorption of Nuclear Radiation. – P. 163–208. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405897-2.00007-0>

References

1. Thibeault S., Kang J., Sauti G., Park C., Fay C., King G. Nanomaterials for radiation shielding. *MRS Bulletin*, 2015, vol. 40, iss. 10, pp. 836–841. <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.225>
2. Shultis J. K., Faw R. E. Radiation shielding technology. *Health Physics*, 2005, vol. 88, iss. 4, pp. 297–322. <http://doi.org/10.1097/01.HP.0000148615.73825.b1>
3. Zinkle S., Wiffen F. Radiation Effects in Refractory Alloys. *AIP Conference Proceedings*, 2004, vol. 699, iss. 1, pp. 733–740. <https://doi.org/10.1063/1.1649637>
4. Egranov A. V. *Interaction of Ionizing Radiation with Matter*. Irkutsk, Publ. of the Irkutsk State University, 2013. 114 p. (in Russian).
5. Novikov G. V., Chivanov A. V., Letnev A. V., Merkulova E. S., Fedorov V. A. The effect of ionizing radiation on the substance. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*, 2008, vol. 13, iss. 1, pp. 62–64 (in Russian).
6. Townsend L. W. Overview of active methods for shielding spacecraft from energetic space radiation. *1st International Workshop on Space Radiation Research and 11th Annual NASA Space Radiation Health Investigators Workshop Arona (Italy), May 27–31, 2000*, pp. 84–85.
7. Buyuk B., Tugrul A. B. Comparison of Lead and WC-Co Materials against Gamma Irradiation. *Acta Physica Polonica A*, 2014, vol. 125, pp. 423–425. <http://doi.org/10.12693/APhysPolA.125.423>
8. AbuAlRoos N. J., Azman M. N., Baharul Amin N. A., Zainon R. Tungsten-based material as promising new lead-free gamma radiation shielding material in nuclear medicine. *Physica Medica*, 2020, vol. 78, pp. 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.017>
9. Boonin K., Yasaka P., Limkitjaroenporn P., Rajaramakrishna R., Askin A., Sayyed M. I., Kothan S., Kaewkhao J. Effect of BaO on lead free zinc barium tellurite glass for radiation shielding materials in nuclear application. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, vol. 550, art. ID 120386. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120386>
10. Almurrayshid M., Alsagabi S., Alssalim Y., Alotaibi Z., Almsalam R. Feasibility of polymer-based composite materials as radiation shield. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, vol. 183, art. ID 109425. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109425>
11. Gurler O., Tarim U. Determination of Radiation Shielding Properties of Some Polymer and Plastic Materials against Gamma-Rays. *Acta Physica Polonica A*, 2016, vol. 130, iss. 1, pp. 236–238. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.236>

12. Kurtulus R., Sayyed M. I., Kavaz T., Mahmoud K. A., Tashlykov O. L., Khandaker M. U., Bradley D. A. A lanthanum-barium-borovanadate glass containing Bi₂O₃ for radiation shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, vol. 186, art. ID 109557. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109557>
13. More C. V., Alsayed Z., Badawi M. S., Thabet A. A. Pawar P. P. Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, vol. 19, iss. 3, pp. 2057–2090. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>
14. McCaffrey J. P., Shen H., Downton B., Mainegra-Hing E. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Medical Physics*, 2007, vol. 34, iss. 2, pp. 530–537. <https://doi.org/10.1118/1.2426404>
15. McCaffrey J. P., Mainegra-Hing E., Shen H. Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers. *Medical Physics*, 2009, vol. 36, iss. 12, pp. 5586–5594. <https://doi.org/10.1118/1.3260839>
16. El-Sayed A. Waly, Mohamed A. Bourham, Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 85, pp. 306–310. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.05.011>
17. Soylu H. M., Yurt Lambrecht F., Ersöz O. A. Gamma radiation shielding efficiency of a new lead-free composite material. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, vol. 305, iss. 2, pp. 529–534. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4051-3>
18. Tishkevich D. I., Zubar T. I., Zhaludkevich A. L., Razanau I. U., Vershinina T. N., Bondaruk A. A., Zhelez-nova E. K. [et al.]. Isostatic Hot Pressed W–Cu Composites with Nanosized Grain Boundaries: Microstructure, Structure and Radiation Shielding Efficiency against Gamma Rays. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, iss. 10, art. ID 1642. <https://doi.org/10.3390/nano12101642>
19. Jaewoo Kim, Duckbong Seo, Byung Chul Lee, Young Soo Seo, Miller W. H. Nano-W Dispersed Gamma Radiation Shielding Materials. *Advanced Engineering Material*, 2014, vol. 16, iss. 9, pp. 1083–1089. <https://doi.org/10.1002/adem.201400127>
20. Tishkevich D. I., Grabchikov S. S., Lastovskii S. B., Trukhanov S. V., Vasin D. S., Zubar T. I., Kozlovskiy A. L. [et al.]. Function composites materials for shielding applications: Correlation between phase separation and attenuation properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 771, pp. 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.209>
21. Jadhav S. D., Dhekne P. P., Brodu E., Hooreweder B. Van, Dadbakhsh S., Kruth J.-P., Humbeeck J. Van, Vanmeensel K. Laser powder bed fusion additive manufacturing of highly conductive parts made of optically absorptive carburized CuCr1 powder. *Materials & Design*, 2021, vol. 198, art. ID 109369. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109369>
22. Tianle Xie, Licai Fu, Baolong Gao, Jiajun Zhu, Wulin Yang, Deyi Li, Lingping Zhou. The crystallization character of W-Cu thin films at the early stage of deposition. *Thin Solid Films*, 2019, vol. 690, art. ID 137555. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137555>
23. Kelly J. P., Elmer J. W., Ryerson F. J., Lee J. R. I., Haslam J. J. Directed energy deposition additive manufacturing of functionally graded Al-W composites. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 39, art. ID 101845. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101845>
24. AbuAlRoos N. J., Baharul Amin N. A., Zainon R. Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, vol. 165, art. ID 108439. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108439>
25. Sazali M. A., Rashid N. Kh. A. Md, Hamzah Kh. A review on multilayer radiation shielding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 555, iss. 1, art. ID 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/555/1/012008>
26. Tairov Iu. M., Tsvetkov V. F. *Technology of Semiconductor and Dielectric Materials*. 3rd ed. St. Petersburg, Lan' Publ., 2002. 424 p. (in Russian).
27. Fedorchenko I. M., Frantsevich I. N., Radomyselskii I. D. Koval'chenko M. S., Kislyi P. S., Kosolapova T. Ya., Mai V. K., Shcherban' N. I. *Powder Metallurgy: Materials, Technology, Properties, Applications*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985. 624 p. (in Russian).
28. Martínez J., Savoini B., Monge M. A., Muñoz A., Pareja R. Development of oxide dispersion strengthened W alloys produced by hot isostatic pressing. *Fusion Engineering and Design*, 2011, vol. 86, iss. 9–11, pp. 2534–2537. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.01.134>
29. Fedotov A., Shendyukov V., Tsybulskaya L., Perevoznikov S., Mengge Dong, Xiangxin Xue, Xiating Feng [et al.]. Electrodeposition conditions-dependent crystal structure, morphology and electronic properties of Bi films. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 887, art. ID 161451. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161451>
30. Xi Zhu, Jigui Cheng, Pengqi Chen, Bangzheng Wei, Yufei Gao, Dalu Gao. Preparation and characterization of nanosized W-Cu powders by a novel solution combustion and hydrogen reduction method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 793, pp. 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.163>
31. Yuan Li, Guoqiang Luo, Yi Sun, Jian Zhang, Qiang Shen, Lianmeng Zhang. Microstructure and mechanical properties investigation of WCu composites prepared from dual-layer coated powders. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 516, art. ID 146098. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146098>
32. Şakara E., Özpolatlı Ö. F., Alımcı B., Sayyed M. I., Kurudireka M. Phy-X/PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, vol. 166, art. ID 108496. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496>
33. Chen S., Bourham M., Rabiei A. Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams. *Radiation Physics and Chemistry*, 2015, vol. 117, pp. 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.07.003>
34. Choppin G., Liljenzin J.-O., Rydberg J., Ekberg C. *Radiochemistry and Nuclear Chemistry. Chapter 7: Absorption of Nuclear Radiation*. 4th Ed. Academic Press, 2013, pp. 163–208. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405897-2.00007-0>