УДК 699.887
doi: 10.33622/0869-7019.2025.01.42-46

# Влияние структуры радиационно-защитного материала на его радиационную стойкость

**Василий Дмитриевич ЧЕРКАСОВ**[1], доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, зав. кафедрой прикладной механики, vd-cherkasov@yandex.ru

**Владимир Иванович РИМШИН**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, профессор кафедры[3], зав. лабораторией «Мониторинг ЖКХ и радиационной безопасности в строительстве»[2], v.rimshin@niisf.ru

**Дмитрий Васильевич ЧЕРКАСОВ**[1], кандидат технических наук, доцент кафедры, dv-cherkasov@yandex.ru

[1] Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, 430005 Саранск, ул. Большевистская, 68

[2] Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), 127238 Москва, Локомотивный пр., 21

[3] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

***Аннотация***. *Строительные конструкции, находящиеся в зоне воздействия радиации, сами становятся источником радиации. Известные на сегодня методы дезактивации достаточно сложны и малоэффективны для обработки строительных конструкций. Это обусловлено тем, что поверхностный слой поражения бетона, металла составляет 1–5 мм. Решение этой проблемы видится в применении радиационно-защитных покрытий, которые после накопления радионуклидов могут быть демонтированы и утилизированы. При этом поражения строительных конструкций не происходит. Радиационно-защитные свойства покрытия зависят от вида наполнителя и структуры материала. В статье рассматривается влияние структуры радиационно-защитного материала на его радиационно-защитные свойства. Для этого с помощью атомно-силовой микроскопии был выявлен состав фаз, определяющих структуру материала, который представляет собой механическую смесь в виде конгломератов. В структуре материала образуются фазы различных размеров. Благодаря этому материал имеет высокие радиационно-защитные свойства и показатели стойкости к радиации.*

***Ключевые слова***: *радионуклиды, радиационно-защитные покрытия, строительные конструкции, радиационная стойкость, атомно-силовая микроскопия*

***Для цитирования***: *Черкасов В. Д., Римшин В. И., Черкасов Д. В.* Влияние структуры радиационно-защитного материала на его радиационную стойкость // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 1. С. 42–46. doi: 10.33622/0869-7019.2025.01.42-46

## THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF A RADIATION-PROTECTIVE MATERIAL ON ITS RADIATION RESISTANCE

**Vasily D. CHERKASOV**[1], vd-cherkasov@yandex.ru, **Vladimir I. RIMSHIN**[2,3], v.rimshin@niisf.ru
**Dmitry V. CHERKASOV**[1], dv-cherkasov@yandex.ru

[1] National Research Ogarev Mordovia State University, ul. Bolshevistkaya, 68, Saransk 430005, Russian Federation

[2] Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Lokomotivnyy proezd, 21, Moscow 127238, Russian Federation

[3] National Research Moscow State Civil Engineering University, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

***Abstract***. *Building structures located in the radiation exposure area themselves become a source of radiation. Existing decontamination methods are quite complex and ineffective for processing building structures. This is due to the fact that the surface layer of concrete and metal damage is 1–5 mm. The solution to this problem is seen in the use of radiation-protective coatings, which can be dismantled and disposed of after the accumulation of radionuclides. In this case, damage to building structures does not occur. The radiation-protective properties of the coating depend on the type of filler and the structure of the material. The article examines the influence of the structure of a radiation-protective material on its radiation-protective properties. To do this, atomic force microscopy was used to identify the composition of the phases that determine the structure of the material, which is a mechanical mixture in the form of conglomerates. Phases of various sizes are formed in the structure of the material. Due to this, the material has high radiation protection properties and resistance to radiation.*

***Keywords***: *radionuclides, radiation-protective coatings, building structures, radiation resistance, atomic force microscopy*

***For citation***: Cherkasov V. D., Rimshin V. I., Cherkasov D. V. The Influence of the Structure of a Radiation-Protective Material on Its Radiation Resistance. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2025, no. 1, pp. 42–46. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2025.01.42-46

© ЧЕРКАСОВ В. Д., РИМШИН В. И., ЧЕРКАСОВ Д. В., 2025

## Введение

В настоящее время остро строит проблема утилизации радиоактивных отходов, среди которых большой объем занимают строительные конструкции, вступившие в контакт с радиацией. С помощью методов дезактивации сложно и малоэффективно очистить строительные конструкции от радионуклидов [1], поскольку слой поражения в таких материалах, как бетон, металл, составляет 1—5 мм. Решение этой проблемы видится в использовании самоклеящихся радиационно-защитных покрытиий, которые легко монтируются и при насыщении радионуклидами могут быть быстро демонтированы [2, 3]. При этом основная конструкция не будет поражена радионуклидами.

В последнее время сложилась тенденция применения полимерных радиационно-защитных материалов [4—11 и др.]. Это вызвано тем, что полимерные материалы более легкие и удобны в монтаже, а по сравнению со свинцом и более экологичны [12, 13 и др.]. В полимерных материалах большую роль в поглощении радионуклидов играют наполнители с высоким зарядовым числом ядра. Такими наполнителями являются вольфрам, барий, висмут и др. [14 и др.]. При введении наполнителя в полимер необходимо добиться его равномерного распределения в матрице. Радиационно-защитные свойства таких материалов, в частности, зависят от структуры материала.

Целью рассматриваемых исследований являлось установление влияния структуры материала на его радиационно-защитные свойства. Для этого с помощью атомно-силовой микроскопии определяли фазы включений, составляющих структуру материала.

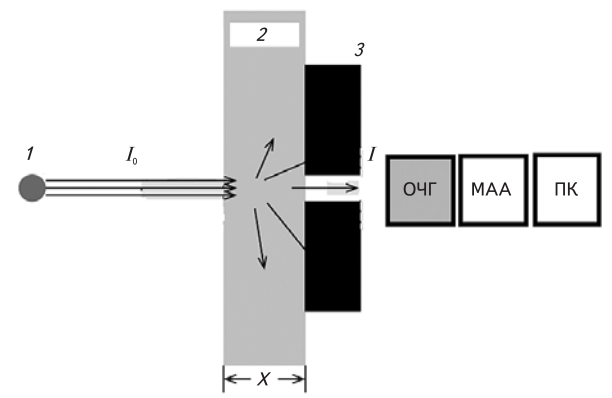
## Методы исследования

### *Определение линейного коэффициента поглощения излучения*

Испытание выполняется следующим образом. При помощи детектора устанавливают начальную интенсивность электромагнитного излучения без образца $I_0$ и интенсивность падающего электромагнитного излучения, прошедшего через пластину из радиационно-защитного материала $I$. Интенсивность падающего электромагнитного излучения определяют с помощью лабораторной установки, принципиальная схема которой показана на *рис. 1*.

Для испытания из полосы материала с заранее измеренной толщиной вырубают образцы размером 100 (± 2)×100 (± 2) мм.

В качестве источников излучения применяются изотопные источники гамма-квантов Am-241 и Cs-137, энергия гамма-квантов составляет 59 и 661 кэВ соответственно. Изотоп Am-241 соответствует энергии излучения рентгеновской трубки с напряжением на аноде 100 кВ.




*1 — источник; 2 — образец; 3 — коллиматор; ОЧГ — германиевый детектор; МАА — многоканальный анализатор; ПК — персональный компьютер*

**Рис. 1**. *Схема лабораторной установки*

В ходе испытаний при облучении образца источником излучения Cs-137 расстояние от источника до торца детектора должно составлять 80 мм, при использовании Am-241 — 8 мм.

Линейный коэффициент поглощения материала μ, см$^{-1}$, определяется по формуле

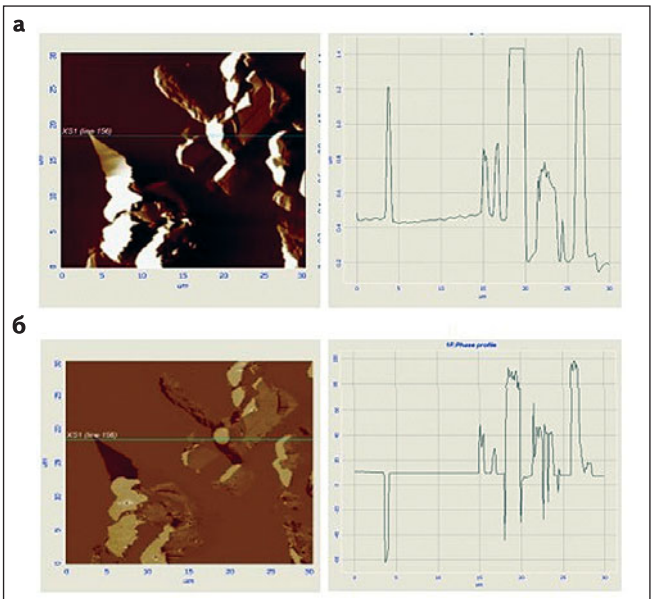
$$\mu = \frac{1}{x}\ln\frac{I_0}{I}, \quad (1)$$

где $x$ — толщина образца; $I_0$ — начальная интенсивность электромагнитного излучения; $I$ — интенсивность падающего электромагнитного излучения, прошедшего через пластину из радиационно-защитного материала.

### *Определение радиационной стойкости*

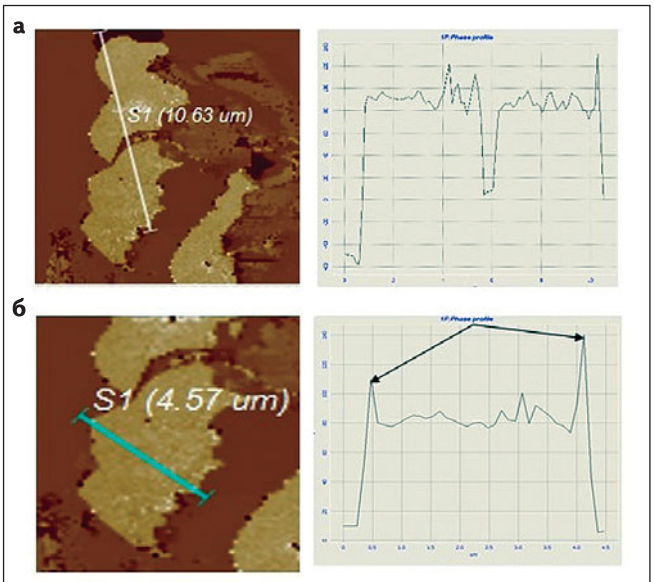
Радиационная стойкость оценивалась по характеру повреждения образцов и изменению коэффициента поглощения излучения. Для оценки радиационной стойкости образцы облучались протонами с энергией не менее 4 МэВ на ускорителе ЭГП-10 с одновременным съемом элементных карт. Облучение каждого образца проводилось в трех зонах. Площадь облучения — 0,0016 см$^2$. Время облучения каждого из образцов составляло соответственно 30, 300 и 3 000 с. В начале и конце облучения пикоамперметром фиксировался ток протонного пучка.

Оценку радиационной стойкости проводили методом 2 по ГОСТ 9.706—81 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы испытаний на стойкость к радиационному старению», сущность которого заключается в том, что образцы испытываются при нескольких значениях поглощенной дозы излучения. В нашем случае максимальное значение радиационной стойкости — $10^5$ Гр. Для образца поглощенная доза составила: $4{,}2\cdot10^4$; $4{,}2\cdot10^5$ и $2{,}6\cdot10^7$ Гр. Эти значения, за исключением первой дозы, существенно превышают контрольное ($10^5$ Гр).



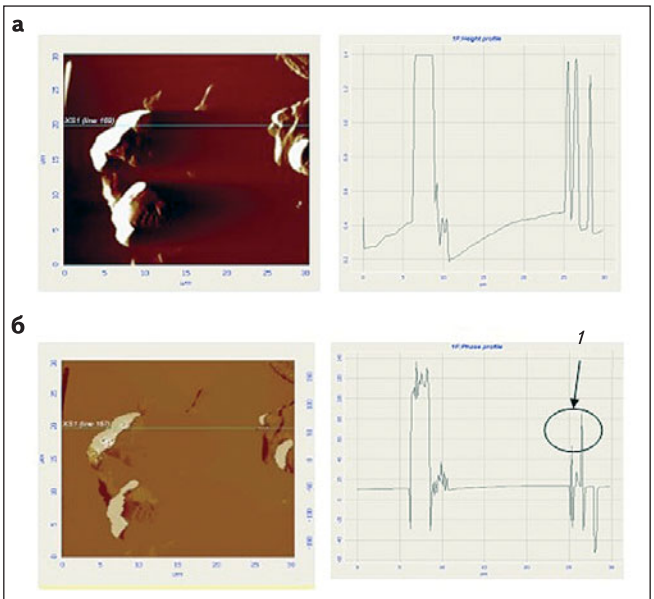

*а — топография, max высота — 1,435 мкм, перепад высот — 1,296 мкм; б — фазовый контраст, max фаза — 98°, min — (- 61°)*

**Рис. 2.** ***АСМ-скан баритового образца с крупными конгломератами, с профилем сечения 30×30 мкм***



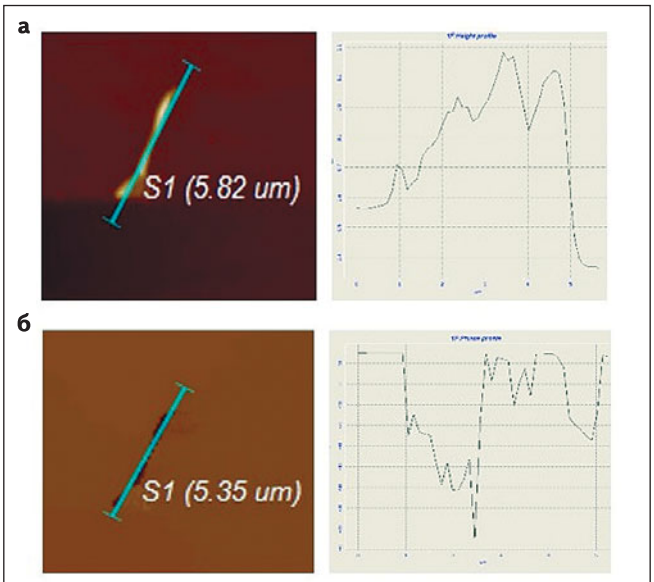

*а — конгломерат; б — частица с мелким наполнителем на периферии*

**Рис. 3.** ***Детальный анализ***




*а — топография, max высота — 1,396 мкм, перепад высот — 1,207 мкм; б — фазовый контраст, max фаза — 136°, min — (-52°); 1 — мелкий наполнитель*

**Рис. 4.** ***Фрагмент АСМ-скана вольфрамового образца с профилем сечения 30×30 мкм***




*а — топография; б — фаза*

**Рис. 5.** ***Протяженный агрегат***

### Результаты исследования и их обсуждение

Основной технологический процесс в изготовлении самоклеящихся радиационно-защитных материалов — это перемешивание. Перемешивание должно обеспечить равномерное распределение частиц наполнителя в матрице. Таким образом в процессе перемешивания формируется структура материала, которая определяет его свойства.

Структуру радиационно-защитного материала исследовали с помощью атомно-силовой микроскопии. Результаты исследований представлены на *рис. 2—5.*

Анализ полученных снимков показал, что материал содержит четыре фазы включений: а) светлые крупные частицы; б) мелкие белые включения; в) вытянутые черные агрегаты (мелкие частицы в мягкой

оболочке); г) крупные многофазные агрегаты — конгломераты. Из этого следует, что структура материала — это механическая смесь, представляющая собой конгломераты. Из-за того, что в материале образуются различные фазы, имеющие разные размеры, материал имеет высокие радиационно-защитные свойства и показатели стойкости к радиации.

Линейный коэффициент поглощения μ у баритового материала при энергии 59 кэВ равен 10,06 см$^{-1}$, при энергии 661 кэВ — 0,201 см$^{-1}$; у вольфрамового при энергии 59 кэВ μ = 22,2 см$^{-1}$, при энергии 661 кэВ μ = 0,76 см$^{-1}$. Значения линейного коэффициента поглощения после поглощенной дозы излучения 2,62 · 10$^7$ Гр (пороговое значение 10$^5$ Гр) приведены в *таблице.*

Как видно из *таблицы*, коэффициенты линейного поглощения практически не изменились. Из этого следует, что материал с хорошей структурой, полученной в процессе перемешивания, обладает высокой радиационной стойкостью.

***Значения линейных коэффициентов поглощения гамма-квантов после облучения***

| Образец | Толщина, см | Начальный поток квантов | Поток квантов, прошедших через образец | Линейный коэффициент поглощения $\mu$, см$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|
| *Гамма-кванты с энергией 59 кэВ* | | | | |
| Баритовый | 0,18 | 305 250±101 | 5 530±48 | 10,09 |
| Вольфрамовый | 0,15 | 305 250±101 | 9 408±51 | 23,2 |
| *Гамма-кванты с энергией 661 кэВ* | | | | |
| Баритовый | 0,18 | 13 444±39 | 11 760±74 | 0,195 |
| Вольфрамовый | 0,15 | 13 444±39 | 12 061±65 | 0,72 |

**Вывод**

В ходе исследования установлено, что структура радиационно-защитного материала — это механическая смесь, представляющая собой конгломераты. В структуре материала образуются различные фазы, имеющие разные размеры. Благодаря этому материал имеет высокие радиационно-защитные свойства и показатели стойкости к радиации.

*СПИСОК ИСТОЧНИКОВ*


1. *Римшин В. И., Калайдо А. В., Семенова М. Н.* [и др.]. Радиационные риски на предприятиях текстильной промышленности // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 4(406). С. 185–191.
2. *Римшин В. И., Калайдо А. В., Семенова М. Н., Борщ В. А.* Строительные технологии обеспечения радонобезопасности зданий // Строительные материалы. 2023. № 6. С. 33–38.
3. *Черкасов В. Д., Пильщиков В. О., Авдонин В. В., Юркин Ю. В.* Самоклеящиеся радиационно-защитные покрытия // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 4(41). С. 20–26.
4. *Павленко В. И., Ястребинский Р. Н.* Полимерные радиационно-защитные композиты. Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. 219 с.
5. *Бормотов А. Н., Прошин А. П., Баженов Ю. М.* [и др.]. Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации. М. : Палеотип, 2006. 272 с.
6. *Павленко В. И., Соколенко И. В., Носков А. В.* Композиционный материал нового типа для комплексной радиационной защиты // Химия и химические технологии. 2015. Вып. 6. Т. 58. С. 66–69.
7. *Павленко В. И., Бондаренко Г. Г., Черкашина Н. И.* Разработка нейтронно-защитных полимерных композитов на основе тонкомолотого гидрида титана // Перспективные материалы. 2016. № 7. С. 16-21.
8. *Микаева С. А., Микаева А. С., Бойчук М. И.* Защитное покрытие для источников излучения // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 7. С. 34–36.
9. *Калайдо А. В., Римшин В. И., Семенова М. Н., Быков Г. С.* Анализ зарубежного опыта обеспечения радоновой безопасности эксплуатируемых зданий (на примере США) // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. № 4(10). С. 54–58.
10. *Римшин В. И., Калайдо А. В., Семенова М. Н.* Технология проектирования радонобезопасных зданий // Вестник Луганского государственного педагогического университета. Серия 5. Гуманитарные науки. Технические науки. 2022. № 4(92). С. 88–93.
11. *Алфимова Н. И., Периев С. Ю., Федоренко А. В.* [и др.] Современные тенденции развития радиационно-защитного материаловедения // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 4. С. 20–22.
12. *Azreen N. M., Raizal S. M.* et al. Radiation shielding of ultra-high-perfomance concrete with silica sand, amang and lead glass [Защита от радиации из сверхвысококачественного бетона с кварцевым песком, керамзитом и свинцовым стеклом] // Construction and Building Materials. 2018. Vol.172. Pp. 370–377.
13. *AbuAlroos N. J., Amin N. A. B., Zainon R.* Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: a review [Обзор традиционных и новых не содержащих свинца радиационно-экранирующих материалов для радиационной защиты в ядерной медицине]. Radiation Physics and Chemistry. 2019. Vol. 165. Pp. 1–7.
14. *Abouhaswa A. S., Sayyed M. I.* et al. Evaluation of

optical and gamma ray shielding features for tungsten-based bismuth borate glasses [Оценка характеристик оптической защиты и защиты от гамма-излучения стекол из бората висмута на основе вольфрама] // Optical Materials. 2020. Vol. 106. Pp. 1–13.

*R E F E R E N C E S*

1. Rimshin V. I., Kalajdo A. V., Semenova M. N. et al. Radiation risks at textile industry enterprises. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*, 2023, no. 4(406), pp. 185–191. (In Russ.).
2. Rimshin V. I., Kalajdo A. V., Semenova M. N., Borshch V. A. Construction technologies for ensuring radon safety of buildings. *Stroitel'nye materialy*, 2023, no. 6, pp. 33–38. (In Russ.).
3. Cherkasov V. D., Pil'shchikov V. O., Avdonin V. V., Yurkin Yu. V. Self-adhesive radiation protective coatings. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*, 2019, no. 4 (41), pp. 20–26. (In Russ.).
4. Pavlenko V. I., Yastrebinskij R. N. *Polimernye radiacionno-zashchitnye kompozity* [Polymer radiation-protective composites ]. Belgorod, BGTU im. V. G. Shuhova Publ., 2009. 219 p. (In Russ.).
5. Bormotov A. N., Proshin A. P., Bazhenov Yu. M. et al. *Polimernye kompozicionnye materialy dlya zashchity ot radiacii* [Polymer composite materials for protection from radiation]. Moscow, Paleotip Publ., 2006. 272 p. (In Russ.).
6. Pavlenko V. I., Sokolenko I. V., Noskov A. V. Composite material of a new type for complex radiation protection. *Himiya i himicheskie tekhnologii*, 2015, vol. 6, iss. 58, pp. 66–69. (In Russ.).
7. Pavlenko V. I., Bondarenko G. G., CHerkashina N. I. Development of neutron-protective polymer composites based on finely ground titanium hydride. *Perspektivnye materialy*, 2016, no. 7, pp. 16–21. (In Russ.).
8. Mikaeva S. A., Mikaeva A. S., Bojchuk M. I. Protective coating for radiation sources. *Avtomatizaciya. Sovremennye tekhnologii*, 2016, no. 7, pp. 34–36. (In Russ.).
9. Kalajdo A. V., Rimshin V. I., Semenova M. N., Bykov G. S. Analysis of foreign experience in ensuring radon safety of operated buildings (on the example of the USA). *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 4(10), pp. 54–58. (In Russ.).
10. Rimshin V. I., Kalajdo A. V., Semenova M. N. Technology of designing radon-safe buildings. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Seriya 5. Gumanitarnye nauki. Tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 4(92), pp. 88–93. (In Russ.).
11. Alfimova N. I., Periev S. Yu., Fedorenko A. V. et al. Modern trends in the development of radiation-protective materials science. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*, 2017, no. 4, pp. 20–22. (In Russ.).
12. Azreen N. M., Raizal S. M. et al. Radiation shielding of ultra-high-perfomance concrete with silica sand, amang and lead glass. *Construction and Building Materials*, 2018, vol.172, pp. 370–377.
13. AbuAlroos N. J., Amin N. A. B., 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, pp. 1–7.
14. Abouhaswa A. S., Sayyed M. I. et al. Evaluation of optical and gamma ray shielding features for tungsten-based bismuth borate glasses. *Optical Materials*, 2020, vol. 106, pp. 1–13.