
Технико-экономическое сравнение конструктивных решений радиационной защиты от рентгеновского излучения

*В.Д. Черкасов¹, Ю.В. Юркин², Д.Л. Сунцов², М.А. Корнеев²,
К.В. Щекутьев²*

¹ *Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева, Саранск*

² *Вятский государственный университет, Киров*

Аннотация: Рассматриваются наиболее распространённые материалы и способы их использования для защиты от ионизирующего излучения, используемого в медицинских целях. Представлено сравнение технико-экономических показателей по устройству защитного ограждения из описанных радиационно защитных материалов. Установлена эффективность применения самоклеящихся полимерных радиационно защитных материалов при защите от излучения с напряжением до 100кВ.

Ключевые слова: экранирование гамма-излучения, радиационная защита, этилен пропилен диеновый мономер, оксид металла, барит, полимерные композиты.

Введение

Развитие технологий требует появления новых материалов, обладающих специфическим сочетанием свойств подчас взаимоисключающих друг друга, таких как лёгкость и прочность, упругость и твердость. Материалами, способными сочетать в себе эти свойства, являются полимерные композиты. Полимерные композиты обладают большой областью применения: конструктивные [1], шумо- и вибропоглощающие [2], отделочные [3]. Активно идет разработка радиационнозащитных полимерных композиционных материалов. В работах [4 – 6] описаны примеры полимерных композиционных радиационнозащитных материалов, в которых за высокие эксплуатационные свойства отвечает полимерная матрица, а за ослабление ионизирующего излучения - наполнители. В качестве наполнителей обычно используются материалы с высоким зарядовым числом ядра атома: свинец, железо, титан, вольфрам и его оксиды. Ввиду высокой токсичности свинца материалы, имеющие его в своем составе, применяются все реже [7].

Применение радиационнозащитных материалов для создания защитных экранов, наряду с защитой расстоянием, а так же организационными мероприятиями является одним из основных видов защиты от ионизирующих излучений [8]. Наиболее распространенным видом излучений, встречающихся в медицине, является рентгеновское излучение. В большинстве аппаратов используются лучевые трубки с напряжением 100 кВ [9, 10]. На данный момент наиболее часто для созданий защитных преград в помещениях медицинских учреждений с радиационными источниками применяются облицовка стен свинцовыми листами, нанесение на стены баритовой штукатурки. Так же эффективно проявила себя панель рентгенозащитная Knauf Safeboard. В работе [11] описан эластичный самоклеящийся материал, наполнителем в котором является барит.

Данный материал может быть применен для облицовки стен помещений с радиационными источниками медицинского назначения. Предполагается, что данный материал может быть легко смонтирован и демонтирован. Наряду с легкостью монтажа, на выбор того или иного материала для защиты от излучения оказывают влияние стоимость работ по устройству защитного экрана и стоимость непосредственно самих материалов.

Постановка задачи

Цель работы - произвести сравнения технико-экономических показателей применения различных радиационнозащитных материалов для защиты от ионизирующего излучения 100 кВ и силе тока 5 мА. В качестве показателей для сравнения будут применены трудоемкость и стоимость работ, а также стоимость материалов.

Материалы и методы исследования

Материалы

В зависимости от материала, выбранного для создания радиационно-защитных преград, определяется способ его крепления к несущим и ограждающим конструкциям: стенам и перегородкам, колоннам, плитам покрытий и перекрытий.

Наиболее распространённым из листовых материалов является листовой свинец. Это объясняется высокими защитными характеристиками свинца. Свинцовые листы выпускают размерами 500×1000 мм и толщиной 1–4 мм. Свинцовые листы крепятся на каркас из металлических профилей и кронштейны для крепления гипсокартона или на деревянную обрешетку при помощи шурупов. А для возможности декоративной отделки поверх свинцового листа крепится лист гипсокартонный (рис.1а). Толщина свинцового листа определяется на основании расчета и зависит от энергии излучения. Стоимость одного свинцового листа размерами 500×1000 мм и толщиной 3 мм составляет 4000 руб.

К листовым материалам так же относится панель рентгенозащитная Safeboard, разработанная компанией Knauf. Выпускаются панели размерами 2400×625×12,5 мм. Линейный коэффициент ослабления составляет $2,336 \text{ см}^{-1}$. Крепятся панели к каркасу из металлических профилей и кронштейнов для крепления гипсокартона при помощи шурупов (рис. 1б). Панель Safeboard может не требовать дополнительной облицовки из листа гипсокартонного, как лист свинцовый, так как обладает гладкой внешней поверхностью. Стоимость одной панели составляет 3490 руб.

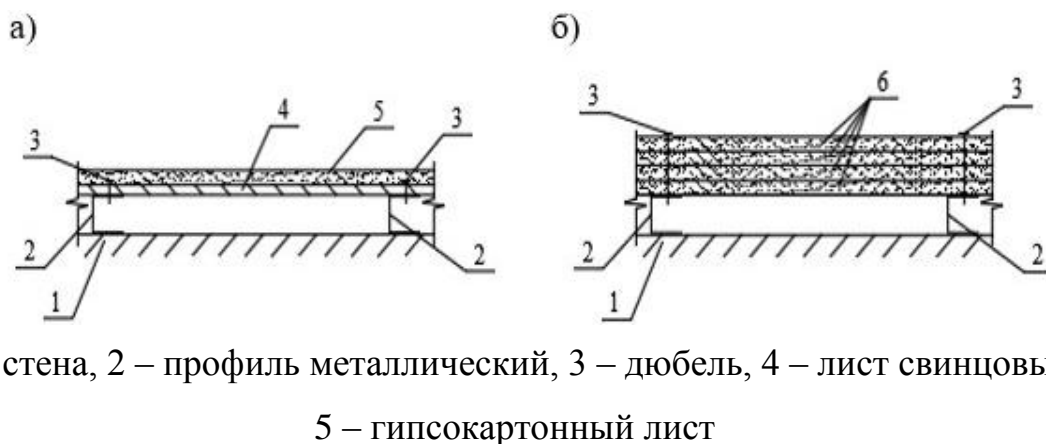
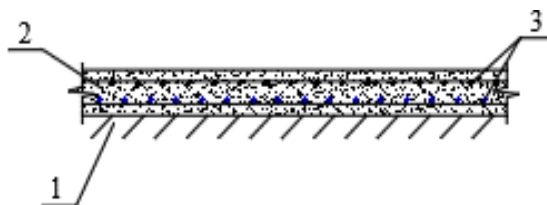


Рис. 1 – Устройство радиационной защиты при помощи свинца листового (а), при помощи панелей рентгенозащитных Safeboard (б)

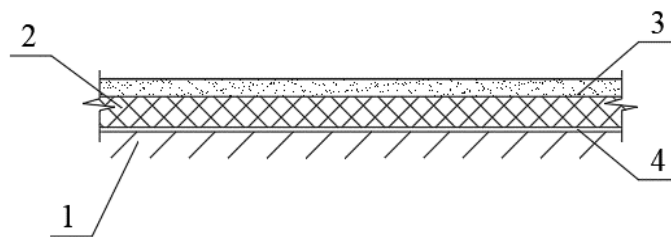
Традиционным средством защиты от ионизирующего излучения является создание защитных слоев из специальных растворов и бетонов. Наибольшее применение получило нанесение на поверхности конструкций баритовой штукатурки. Технология нанесения баритовой штукатурки схожа с нанесением обычных штукатурных составов, но при большой толщине штукатурки необходимо производить её армирование (рис.2). Баритовая штукатурка поставляется на строительную площадку фасованной в мешки массой 25 кг. Приготовление штукатурного раствора происходит непосредственно на месте работ. Примерный расход штукатурной смеси для создания защитного слоя площадью 1 м^2 толщиной 1 мм – 2,3 кг. Линейный коэффициент ослабления баритовой штукатурки равен $1,859 \text{ см}^{-1}$, а стоимость одного мешка сухой смеси около 860 руб.



1 – стена, 2 – штукатурка баритовая, 3 – сетка армирующая

Рис. 2 – Устройство радиационной защиты при помощи баритовой штукатурки

Баритовый материал ES20-I55-B52 является самоклеящимся. Его нанесение на несущие и ограждающие конструкции происходит прикатыванием лент к поверхности защищаемых конструкций (рис.3). После приклеивания защитного материала происходит приклеивание облицовочного слоя, выполняемого из листа гипсокартонного. Толщина защитного материала определяется на основании его линейного коэффициента ослабления, который равен $10,33 \text{ см}^{-1}$ и энергии излучения. Стоимость материала ES20-I55-B52 толщиной 10 мм составляет 4200 руб/м².



1 – стена, 2 – самоклеящийся материал, 3 – гипсокартонный лист,
4 – грунтовка

Рис. 3 – Устройство радиационной защиты при помощи баритовой штукатурки

Методы

Определение толщины свинцового листа

Определение толщины свинцовой защиты при энергии излучения 100 кВ возможно выполнить на основании [8]. Толщина свинцового листа рассчитывается по монограмме (рис. 4) на основании коэффициента k_1 , который рассчитывается по формуле:

$$k_1 = 2,5 \frac{D_T}{D_{T0}} m \frac{i}{R^2}, \quad (1)$$

где D_T – радиационный выход конкретной рентгеновской трубки, для которой определяется в задаче защита; D_{T0} – радиационный выход некоторой стандартной рентгеновской трубки; m – отношение проектной предельно допустимой мощности эквивалентной дозы для помещений по-

стоянного пребывания персонала категории А при 36 ч рабочей неделе к проектной мощности эквивалентной дозы для данной конкретной задачи при t ч работы в неделю в тех же единицах; i – сила тока в рентгеновской трубке, мА; R – расстояние от анода трубки до рабочего места, м.

При $D_T = D_{T0}$ и 18-часовой рабочей неделе формула (1) примет вид:

$$k_1 = 2,5 \frac{i}{2R^2}, \quad (2)$$

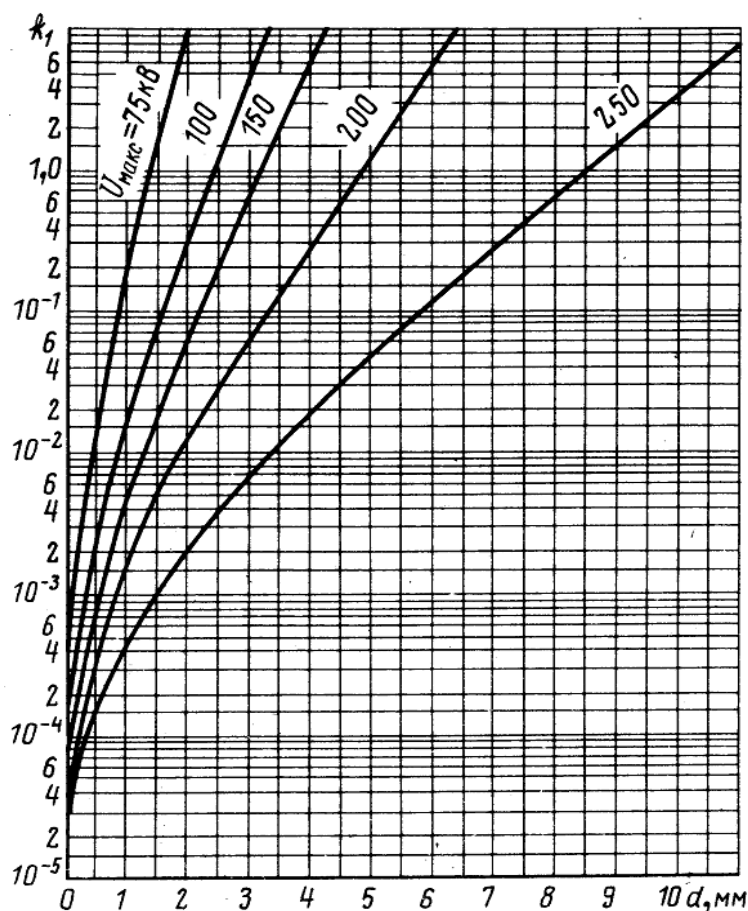


Рис. 4 – Номограмма для расчета защиты из свинца (d) от рентгеновского излучения при различных значениях максимального напряжения на рентгеновской трубке ($U_{\text{макс}}$)

Определение толщины бессвинцовых материалов

После определения толщины свинцового листа, необходимого для защиты от излучения заданной энергии, зная линейный коэффициент ослабле-

ния каждого материала, возможно определить толщину других материалов. Толщина бесвинцового материала определяется по формуле:

$$x_{\text{обр}} = \frac{\mu_{\text{Pb}} x_{\text{Pb}}}{\mu_{\text{обр}}}, \quad (3)$$

где x_{Pb} – толщина свинцового листа, см; μ_{Pb} – линейный коэффициент свинца, см⁻¹; $\mu_{\text{обр}}$ – линейный коэффициент материала, см⁻¹.

Определение стоимости работ

Для определения сметной стоимости устройства радиационнозащитных преград применялся базисно-индексный метод. Сметная стоимость включает стоимость работ, стоимость материалов, затраты на оплату труда. Данный метод позволяет определить не только общие затраты на устройство преград, но так же подсчитать трудозатраты, возникающие при выполнении работ. Определение стоимости работ по монтажу радиационно защитного материала производилось с применением ФЕР. Определение стоимости производится на устройство 10 м² радиационнозащитной преграды. Стоимость определена в ценах на декабрь 2019 года.

Результаты и их обсуждение

Согласно [12], минимальное расстояние от источника ионизирующего излучения до преграды, за которой находится сотрудник медучреждения, проводящий исследование, должно быть не менее 2 м. Учитывая силу тока лучевой трубки, равную 5 мА, по формуле (2) определяем значение коэффициента k_1 :

$$k_1 = 2,5 \frac{5}{2 \cdot 2^2} = 1,563$$

Значению коэффициента $k_1 = 1,563$ по номограмме соответствует толщина свинцового листа 0,26 см. Принимаем толщину листа 3 мм.

Используя значение свинцовых эквивалентов приведенных производителями материалов, по формуле (3) определяем требуемые толщины баритовой штукатурки, панели Safeboard и материала ES20-I55-B52. Расчетные значения толщин радиационнозащитных материалов и толщины готовых покрытий для облицовки стен приведены в таблице №1.

Таблица №1

Расчетные и принятые значения толщин радиационнозащитных покрытий.

| Материал | Напряжение | | Линейный коэффициент ослабления, см ⁻¹ | k_1 | Расчётная толщина, см | Принятая толщина материала в конструкции, см |
|---|------------|------------|---|------------|-----------------------|--|
| | кВ | МэВ | | | | |
| Свинцовый лист | 100 | 0,062 5 | 40,282 | 1,562 5 | 0,26 | 0,3 |
| Баритовая штукатурка | 100 | 0,062 5 | 1,8592 | | 5,63 | 6 |
| Панель рентгенозащитная Knauf Safeboard | 100 | 0,062 5 | 2,3364 | | 4,48 | 5,0 |
| ES20-I55-B52 | 100 | 0,062 5 | 10,33 | | 1,01 | 1 |

На основании принятой толщины радиационнозащитного материала в конструкции определена стоимость работ и по устройству защитной преграды, и стоимость используемых материалов (рис.5).

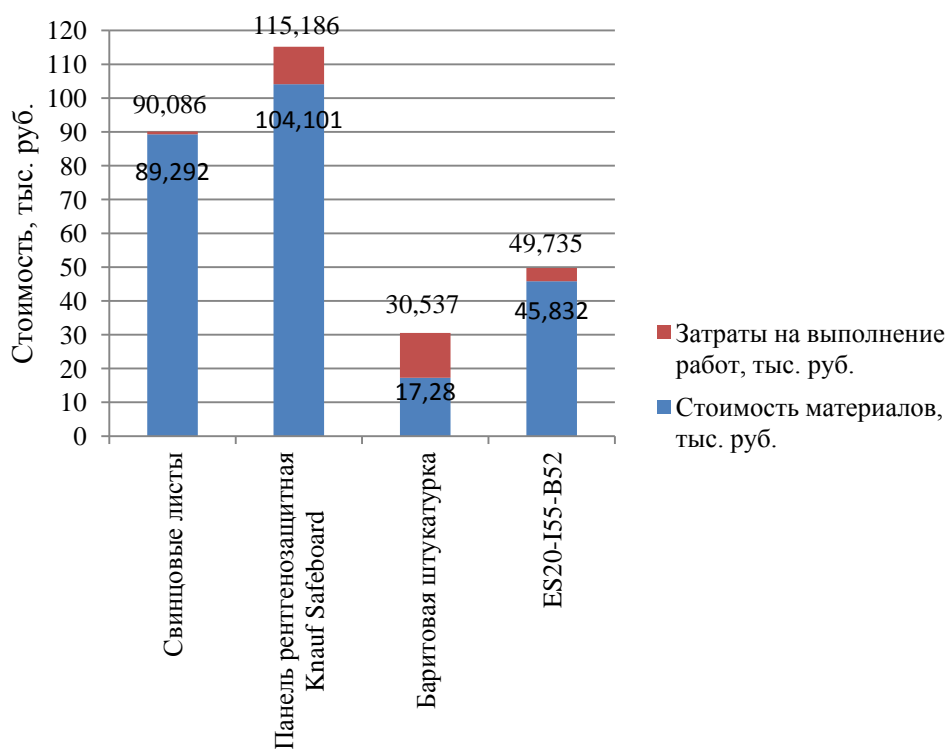


Рис. 5 – Стоимость строительно-монтажных работ и материалов, использованных при выполнении защитной преграды

На рисунке 6 представлено сравнение трудозатрат при устройстве защитных преград.

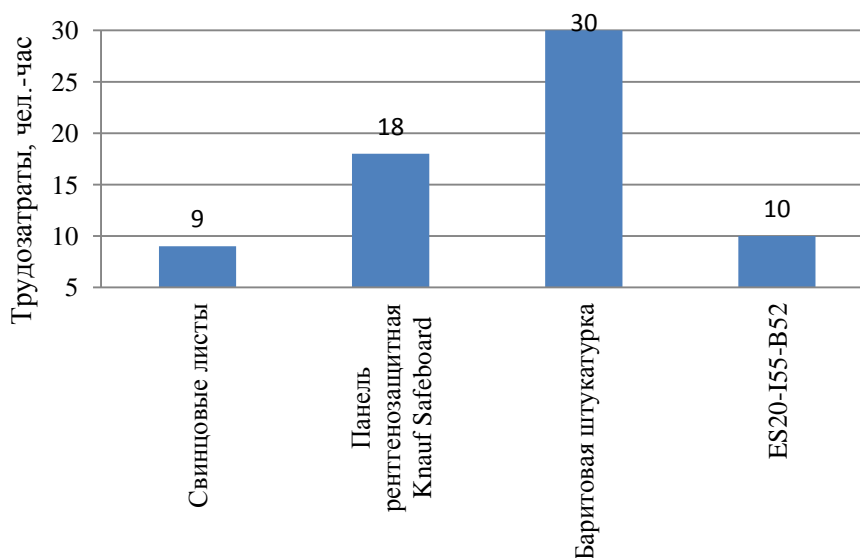


Рис. 6 – Трудозатраты на изготовление защитной преграды

На основании рисунка 5 возможен вывод о самом экономичном варианте радиационной защиты – применении баритовой штукатурки. Но применение баритовой штукатурки кроме низкой стоимости обладает рядом негативных качеств: высокая трудоёмкость (рис. 6), большая толщина покрытия, что влечет к снижению полезной площади объема помещений. Применение для крепления свинцовых листов и радиационнозащитных панелей так же приводит к уменьшению полезной площади. Кроме того, они требуют больших затрат. Трудоёмкость работ для крепления радиационно защитных панелей выше за счет большего числа слоев. Применение самоклеящегося материала ES20-I55-B52 позволяет снизить финансовые затраты на устройство радиационно защитной преграды. При этом самоклеящийся материал уступает лишь свинцовому листу. Связано это с необходимостью плотной без пустот прикатки листа к поверхности конструкций, а так же в креплении облицовочного слоя. При этом применение материала ES20-I55-B52 позволяет добиться меньшей толщины защитного покрытия по сравнению с другими рассмотренными материалами.

Заключение

Исследованы способы крепления радиационнозащитных материалов к несущим и ограждающим конструкциям при создании радиационно защитных преград и определены стоимости производства для данного вида работ. Так, самым дешёвым методом защиты от ионизирующего излучения является баритовая штукатурка. Применение материала ES20-I55-B52 для создания радиационно защитной преграды требует затрат в размере 49,74 тыс. руб., что больше, чем у баритовой штукатурки, но меньше других современных аналогов. При этом применение материала ES20-I55-B52 существенно не сокращает полезный объём помещений, по сравнению с другими материалами и обладает достаточно низкой трудоёмкостью при устройстве – 10 чел-часов,

против 30 человеко-часов у штукатурки, самого распространённого материала для защиты.

На основании вышеизложенного делаем вывод не только о возможности применения самоклеящегося полимерного радиационнозащитного материала (ES20-I45-B52) для защиты от радиации в кабинетах лучевой терапии и диагностики, но и о его технико-экономических преимуществах перед конкурентами: стоимость и трудоёмкость.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках работ по теме по теме: «Прикладные научные исследования, направленные на создание съёмных эластичных самоклеящихся радиационно-защитных покрытий, обеспечивающих экологически безопасное обращение с радиационно-активными отходами». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57418X0187.

Литература

1. Польской П.П., Маилян Д.Р. Прочность и деформативность усиленных композитными материалами балок при различных варьируемых факторах // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1676.

2. Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Авдонин В.В. Исследование тангенса угла механических потерь и прочности вибропоглощающих материалов на основе этиленвинилацетата, модифицированных каучуками // Инженерный вестник Дона, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6136.

3. Ушаков В.А., Семочкин А.Ю., Невзоров Д.И., Семочкин Ю.А. Древесно-полимерные композиты - эффективные отделочные строительные материалы // Промышленное и гражданское строительство, 2014, № 8, С. 82-85.

4. Nambiar Shruti, Yeow John T. W. Polymer-Composite Materials for Radiation Protection // ACS Applied Materials & Interfaces. 2012. Vol. 4. pp. 5717-5726.

5. 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.

6. R. Daniel, McAlister Ph.D. Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials // (USA: University Lane Lisle). 2018. Rev. 6.1.

7. Poltabtim Worawat, Wimolmala Ekachai, Saenboonruang Kiadtisak Properties of lead-free gamma-ray shielding materials from metal oxide/EPDM rubber composites // Radiation Physics and Chemistry. – 153. – 2018. – pp. 1–9.

8. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.

9. Adeli R, Shirmardi S.P, Amiri J, Singh V.P, Medhat M.E. Simulation and comparison of radiology X-ray spectra by MCNP and GEANT4 codes. J Paramed Sci Autumn. 2015; 6(4): 2008–4978.

10. Fahey Frederic H., Goodkind Alison, Treves S. Ted, Grant Frederick D. Nuclear Medicine and Radiation Protection // Journal of Radiology Nursing. 2016. Vol. 35. Iss. 1. pp. 1-11.

11. Cherkasov Vasiliy, Yurkin Yuriy, Avdonin Valeriy, Suntsov Dmitriy Self-adhesion x-ray shielding composite material of EPDM rubber with barite: mechanical properties // Materiale Plastice. 2020. №1. URL: researchgate.net/publication/328352326_Development_of_leadfree_gamma_shielding_materials_based_on_EPDM_rubbermetal_oxide_composites

12. СанПиН 2.6.1.1192-03. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований: санитарные правила и нормы: утв. главным государст-

венным санитарным врачом Российской Федерации 14.02.2003: взамен Сан-ПиН 2.6.1.802-99 / Минздрав России. - 2003.

References

1. Polskoy P.P., Mailyan D.R. Inzenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1676.
2. Volotskoy A.N., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V. Inzenernyj vestnik Dona, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6136.
3. Ushkov V. A., Semochkin A. Yu., Nevzorov D. I., Semochkin Yu. A. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. 2014, № 8, pp. 82–85.
4. Nambiar Shruti, Yeow John T. W. ACS Applied Materials & Interfaces. 2012. Vol. 4. pp. 5717-5726.
5. Pavlenko, V. I., Bondarenko G. G., Cherkashina N. I. Perspektivnye materialy. 2016. № 7. pp. 16–21.
6. R. Daniel, McAlister Ph.D. USA: University Lane Lisle. 2018. Rev. 6.1.
7. Poltabtim Worawat, Wimolmala Ekachai, Saenboonruang Kiadtisak Radiation Physics and Chemistry. 153. 2018. pp. 1–9.
8. Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy. Spravochnik. [Protection against ionizing radiation: A Handbook]. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatmoizdat, 1995. 496 p.: il.
9. Adeli R, Shirmardi S.P, Amiri J, Singh V.P, Medhat M.E. J Paramed Sci Autumn. 2015; 6(4): 2008. 4978.
10. Fahey Frederic H., Goodkind Alison, Treves S. Ted, Grant Frederick D. Journal of Radiology Nursing. 2016. Vol. 35. Iss. 1. pp. 1-11.
11. Chexasov Vasiliy, Yurkin Yuriy, Avdonin Valeriy, Suntsov Dmitriy Materiale Plastice. 2020. №1. URL: researchgate.net/publication/328352326_Development_of_leadfree_gamma_shielding_materials_based_on_EPDM_rubbermetal_oxide_composites



12. SanPiN 2.6.1.1192-03. Sanitarnye pravila i normy: utv. glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom Rossiyskoy Federatsii [Hygienic requirements for the design and operation of X-ray rooms, apparatuses and the conduct of X-ray examinations: sanitary rules and norms: approved by the chief state sanitary doctor of the Russian Federation]. 14.02.2003: vzamen SanPiN 2.6.1.802-99. Minzdrav Rossii. 2003.