

Научная статья  
УДК 621.039

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПОЗИТНЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Егор Дмитриевич Стругов<sup>1</sup>, Иван Андреевич Ширманов,  
Степан Михайлович Глухов, Олег Леонидович Ташлыков**

Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup>[strugov.zhora@mail.ru](mailto:strugov.zhora@mail.ru)

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследований экранирующих свойств композитных радиационно-защитных материалов для оценки возможности их использования в качестве радиационной защиты от гамма-излучения. Приведены значения линейного коэффициента ослабления для исследуемых образцов, рассчитанных с помощью NIST XCOM.

**Ключевые слова:** оптимизация радиационной защиты, линейный коэффициент ослабления, NIST XCOM

**Для цитирования:** Оптимизация состава композитных радиационно-защитных материалов / Е. Д. Стругов, И. А. Ширманов, С. М. Глухов, О. Л. Ташлыков // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения — 2021 = Energy and Resource Saving. Power Supply. Non-traditional and Renewable Energy Sources. Nuclear Energy. Danilov Readings — 2021 : сборник научных трудов. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2023. С. 544–551.

Original article

## OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF COMPOSITE RADIATION PROTECTIVE MATERIALS

**Egor D. Strugov<sup>1</sup>, Ivan A. Shirmanov, Stepan M. Glukhov, Oleg L. Tashlykov**

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup>[strugov.zhora@mail.ru](mailto:strugov.zhora@mail.ru)

---

© Стругов Е. Д., Ширманов И. А., Глухов С. М., Ташлыков О. Л., 2023

**Abstract.** The paper presents the results of studies of the shielding properties of composite radiation shielding materials to assess the possibility of their use as radiation shielding from gamma radiation. The values of the linear attenuation coefficient for the studied samples, calculated using the NIST XCOM, are given.

**Keywords:** optimization of radiation protection, linear attenuation coefficient, NIST XCOM

**For citation:** Strugov E. D., Shirmanov I. A., Glukhov S. M. and Tashlykov O. L. (2023). Optimizatsiya sostava kompozitnykh radiatsionno-zashchitnykh materialov [Optimization of the composition of composite radiation protective materials]. *Ehnergo- i resursosberezhenie. Ehnergoobespechenie. Netradicionnyye i vozobnovly-aemye istochniki ehnergii. Atomnaya ehnergetika. Danilovskie chteniya — 2021* [Energy and Resource Saving. Power Supply. Non-traditional and Renewable Energy Sources. Nuclear Energy. Danilov Readings — 2021]. Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2023. P. 544–551. (In Russ).

**Ш**ирокое применение ядерной энергии во многих областях промышленности, науке и медицине актуализирует исследования по поиску новых высокоэффективных и нетоксичных материалов радиационной защиты.

Защита от ионизирующего излучения для персонала объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) является актуальной проблемой, в то же время, стоимость защиты современных ядерно-технических установок может достигать 20–30 % стоимости сооружения.

Оптимизация состава радиационно-защитных материалов применительно к планируемым условиям облучения имеет значительный потенциал в реализации принципа оптимизации, т. к. экранирование источника ионизирующего излучения является одним из основных методов воздействия на радиационный параметр [1].

Для защиты от излучения применяют экраны, наполнителем которых являются материалы с большим атомным номером и высокой плотностью. В некоторых случаях для защиты используют барит как добавку в строительные материалы, а также полимеры, органические и неорганические материалы.

При определении защитных характеристик для всех материалов вычислялись коэффициенты массового ослабления с помощью базы данных NIST XCOM, которая позволяет получать значения сечений рассеяния для фотонов, фотоэлектрическое поглощение и образование пар, а также общие коэффициенты ослабления для любого элемента, соединения или смеси.

Для сравнения радиационно-защитных свойств материалов обычно используется линейный коэффициент ослабления, потому что существует простая по форме зависимость между кратностью ослабления излучения и толщиной защитного слоя [2]. Линейный коэффициент ослабления рассчитывался по формуле:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho,$$

где  $\mu_m$  — массовый коэффициент ослабления,  $\text{см}^2/\text{г}$ ;  $\rho$  — плотность исследуемого бетона,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

В работе рассмотрены свойства бетонов с баритовыми наполнителями и бетоны типовых марок, рассчитаны значения массовых коэффициентов ослабления, а также были получены расчетные значения плотности бетонов. Процентное содержание веществ, входящих в состав бетонов, представлено в табл. 1.

Расчетные значения, полученные с помощью NIST XCOM, сравнивались с экспериментальными данными работы [3], полученными при исследовании бетонов с аналогичным составом для энергий гамма-излучения 0,66 МэВ и 1,25 МэВ.

Таблица 1

Основные вещества, входящие в состав бетонов, % масс

Материалы	Образцы бетонов					
	1	2	3	4	5	6
Цемент	13,5	15,5	18,1	9,3	10,8	12,7
Вода	8,7	7,9	7,8	6,0	5,5	5,5
Мелкодисперсный наполнитель (песок)	30,3	29,8	28,9	0,0	0,0	0,0
Крупный наполнитель (щебень)	47,5	46,8	45,2	0,0	0,0	0,0
Концентрат баритовый (крупный)	0,0	0,0	0,0	33,5	33,1	32,4
Концентрат баритовый (мелкий)	0,0	0,0	0,0	51,1	50,6	49,4
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	2406	2464	2482	3414	3507	3452

На рис. 1 показаны значения линейных коэффициентов ослабления для типовых сортов бетона (1, 2, 3) и бетонов, в состав которых входит барит (4, 5, 6). Эти значения были рассчитаны при энергиях фотона 0,66 МэВ и 1,25 МэВ, для сравнения с данными [4].

Бетоны, имеющие барит в составе, имеют большие коэффициенты линейного ослабления, что характеризует их более эффективным материалом для защиты от гамма-излучения по сравнению со стандартными бетонами. Данные бетоны рассматривались в качестве защит-

ного строительного материала при действии на него гамма-излучения, с целью определения эффективности использования барита в составе бетона для защиты от гамма-излучения.

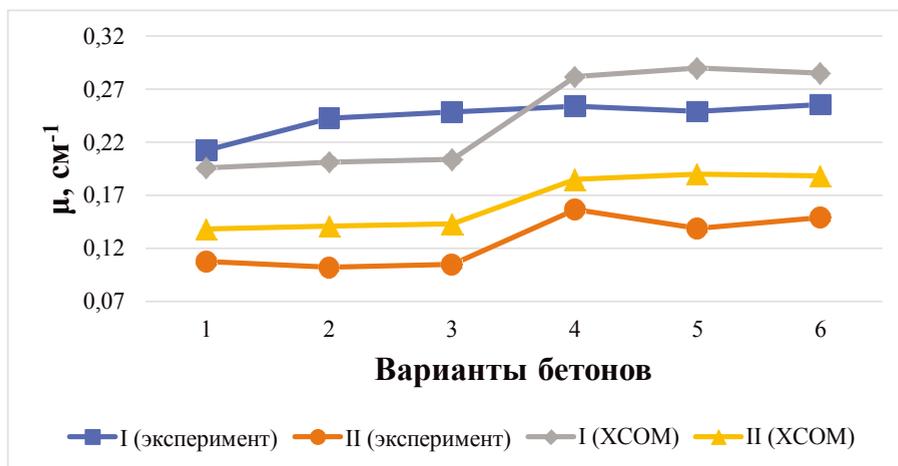


Рис. 1. Коэффициенты линейного ослабления для бетонов: I — для энергии фотонов 1,25 МэВ; II — для энергии фотонов 0,66 МэВ

Эффективность применения барита в составе бетона показала увеличение коэффициента линейного ослабления в среднем на 25 % для энергии 0,66 МэВ и на 29,8 % для энергии 1,25 МэВ соответственно.

С целью оптимизации состава радиационной защиты были исследованы некоторые природные материалы и отходы промышленного производства. Среди большого разнообразия материалов на рынке были выбраны следующие материалы (нумерация материалов совпадает с нумерацией в табл. 2 и на рисунке):

1. Аллювиальный гранатовый песок;
2. Дистен-силлиманитовый концентрат зернистый;
3. Ильменитовый концентрат (обесхромленный);
4. Рутиловый концентрат зернистый (типичный);
5. Циркониевый концентрат порошкообразный;
6. Доменный гранулированный молотый шлак;
7. Гранит (крошка)

Для сравнения и оценки эффективности исследуемых материалов рассматривалось ослабление гамма-излучения свинцом и оловом. Значения, полученные с помощью XCOM, сравнивались с рас-

четом по методике [3]. Расчет проводился для точечного источника. При расчете массового коэффициента ослабления в качестве источника излучения использовался  $^{60}\text{Co}$  (наиболее вероятным является каскадное испускание гамма-квантов с энергией 1,17 МэВ и 1,33 МэВ).

На рис. 2 представлены значения линейного коэффициента ослабления для исследуемых материалов. Линейные коэффициенты свинца и олова приведены для сравнения представленных характеристик.

Таблица 2

**Основной химический состав материалов, % масс.**

Материалы	Образцы материалов						
	1	2	3	4	5	6	7
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2380	1900	2200	2400	2700	2800	2700
SiO <sub>2</sub>	36	—	2	1,3	32	—	68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	58	3	0,4	1	10	12
FeO	30	—	—	—	—	0,5	0,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	0,8	—	1	0,09	—	0,5
TiO <sub>2</sub>	1	2	63	95	0,2	3	0,1
MnO	1	—	—	—	—	1,5	—
CaO	2	0,1	—	0,5	—	40	1,5
MgO	6	0,2	—	—	—	13	0,1
N <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	—	0,1	—	—	—	—	—
U + Th	—	220·10 <sup>-6</sup>	100·10 <sup>-6</sup>	70·10 <sup>-6</sup>	320·10 <sup>-6</sup>	—	—
ZrO <sub>2</sub>	—	0,8	—	0,8	—	—	—
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	0,4	0,2	—	—	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	—	0,07	0,12	—	—
SO <sub>3</sub>	—	—	—	0,05	—	—	—
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	—	0,4	—	—	—
ZrO <sub>2</sub> + HfO <sub>2</sub>	—	—	—	—	65	—	—
Na <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	0,5	—
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	1,5	—

Выявлено, что из исследуемых материалов наиболее эффективным для ослабления гамма-излучения является доменный гранулированный молотый шлак и циркониевый концентрат порошкообразный. Это объясняется наибольшим линейным коэффициентом ослабления. Данные материалы достаточно распространены на рынке и имеют невысокую стоимость, что характеризует их доступность в приме-

нении. Результаты показали, что применение природных материалов для защиты от гамма-излучения возможно и может быть реализовано в условиях, не требующих ограничения для толщины защиты.

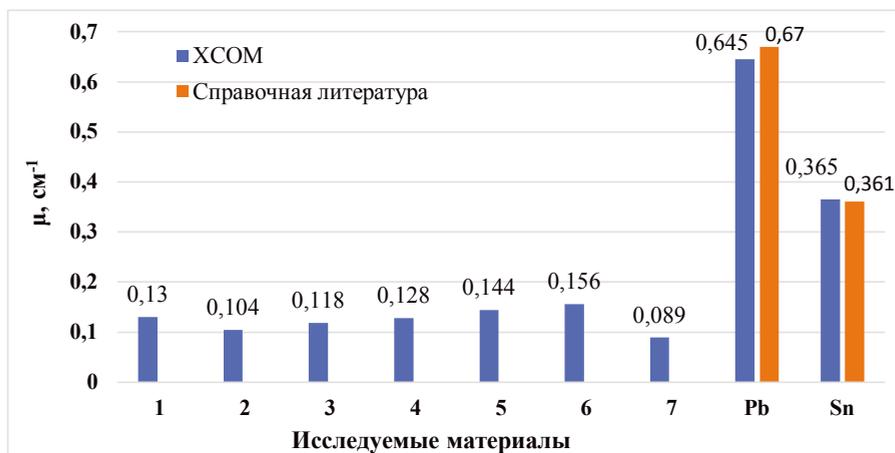


Рис. 2. Значения линейного коэффициента ослабления

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлова А. Ф., Ташлыков О. Л. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9, № 4. С. 393–401.

2. Photon absorption capabilities of SiO<sub>2</sub>–Na<sub>2</sub>O–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–CaO–MgO glasses / M. W. Aladailah, O. L. Tashlykov, I. A. Shirmanov [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. 2022. Vol. 190. 109814. DOI:10.1016/j.radphyschem.2021.109814.

3. Tailor made barium borate doped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass system for radiological protection / O. L. Tashlykov, M. I. Sayyed, K. A. Mahmoud, Uddin Mayeen Khandaker, D. A. Bradley, S. G. Vlasova // Radiation Physics and Chemistry. 2021. Vol. 187. 109558. DOI:10.1016/j.radphyschem.2021.109558.

4. The shielding of  $\gamma$ -rays by concretes produced with barite / I. Akkurt, C. Basyigit, S. Kilincarslan, B. Mavi // Progress in Nuclear Energy. 2005. Vol. 46 (1). P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2004.09.015> (date of access: 01.12.2021).

## References

1. Mikhailova A. F., Tashlykov O. L. Ways to implement the optimization principle in radiological protection of personnel // Nuclear Physics and engineering. 2018. Vol. 9, No. 4. P. 393–401.
2. Photon absorption capabilities of SiO<sub>2</sub>–Na<sub>2</sub>O–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–CaO–MgO glasses / M. W. Aladailah, O. L. Tashlykov, I. A. Shirmanov [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. 2022. Vol. 190. 109814. DOI:10.1016/J.radphyschem.2021.109814.
3. Tailor made barium borate doped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass system for radiological protection / O. L. Tashlykov, M. I. Sayyed, K. A. Mahmoud, Uddin Mayeen Khandaker, D. A. Bradley, S. G. Vlasova // Radiation Physics and Chemistry. 2021. Vol. 187. 109558. DOI:10.1016/j.radphyschem.2021.109558.
4. The shielding of  $\gamma$ -rays by concretes produced with barite / I. Akkurt, C. Basyigit, S. Kilincarslan, B. Mavi // Progress in Nuclear Energy. 2005. Vol. 46 (1). P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2004.09.015> (date of access: 01.12.2021).

## Информация об авторах

**Егор Дмитриевич Стругов** — студент Уральского энергетического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), [strugov.zhora@mail.ru](mailto:strugov.zhora@mail.ru)

**Иван Андреевич Ширманов** — студент Уральского энергетического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), [topzar76123@gmail.com](mailto:topzar76123@gmail.com)

**Степан Михайлович Глухов** — студент Уральского энергетического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), [stepmihgl@mail.ru](mailto:stepmihgl@mail.ru)

**Олег Леонидович Ташлык** — кандидат технических наук, доцент кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), [otashlykov@list.ru](mailto:otashlykov@list.ru)

### Information about the authors

**Egor D. Strugov** — Student of the Ural Power Engineering Institute of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), [strugov.zhora@mail.ru](mailto:strugov.zhora@mail.ru)

**Ivan A. Shirmanov** — Student of the Ural Power Engineering Institute of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), [topzar76123@gmail.com](mailto:topzar76123@gmail.com)

**Stepan M. Glukhov** — Student of the Ural Power Engineering Institute of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), [stepmihgl@mail.ru](mailto:stepmihgl@mail.ru)

**Oleg L. Tashlykov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Nuclear Plants and Renewable Energy Sources of the Ural Power Engineering Institute of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), [otashlykov@list.ru](mailto:otashlykov@list.ru)