

Ослабление фотонного и нейтронного излучения железо-магнетито-серпентинитовым радиационно-защитным композитом

Р. Н. Ястребинский, Г. Г. Бондаренко, В. И. Павленко

Рассчитаны коэффициенты ослабления фотонного и нейтронного пучков при прохождении через железо-магнетито-серпентинитовый цементный бетон (ЖМСЦБ), используемый для биологической защиты атомных реакторов. При энергиях гамма квантов в интервале от 0,2 до 11 МэВ основной вклад в ослабление пучка дает эффект Комптона, а при энергиях более 11 МэВ — эффект образования электронно-позитронных пар. При оценке воздействия быстрых нейтронов показано, что несмотря на низкую плотность водорода в исследуемом композите, вклад водорода в коэффициент ослабления потока нейтронов является весьма значительным. Такое сильное влияние водорода определяется его высокой концентрацией, а также тем обстоятельством, что при воздействии быстрых нейтронов большая кинетическая энергия передается легким ядрам, а не тяжелым.

Ключевые слова: магнетитовый концентрат, серпентин, бетон, фотонное излучение, нейтронное излучение, коэффициент ослабления излучения.

Введение

Для обеспечения безопасности эксплуатации атомных электростанций (АЭС) важное значение имеют модернизация и реконструкция энергоблоков. В настоящее время наиболее остро стоит проблема модернизации и реконструкции энергоблоков АЭС с реакторами РБМК (реактор большой мощности канальный), в частности Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС, где необходима замена железо-барий-серпентинитового цементного бетона плитного настила серии Сб.11. Аналогичные проблемы реконструкции энергоблоков и замены биологической защиты возникают и на АЭС с реакторами ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), где используется серпентинитовый бетон с наполнителем из чугуной дробы.

Основным недостатком тяжелых серпентинитовых бетонов, используемых для биологической защиты на АЭС с реакторами РБМК, а также в гермооболочке и элементах конструкции реакторов ВВЭР, является недостаточно высокая радиационная стойкость при повышенных температурах и мощности дозы более 2 Мрад/час (до 10 МГр), а также

относительно невысокие прочность (прочность на сжатие до 40 МПа), температура эксплуатации (до 280 °С) и повышенный уровень газовыделения за счет радиолитической связанной воды, содержание которой достигает 140 л на 1 м³ бетона [1–3].

Проблема повышения радиационно-защитных свойств биологической защиты на действующих АЭС в настоящее время очень важна. Для поддержания нормальных условий эксплуатации реакторов типа РБМК АЭС и ядерных энергетических установок (ЯЭУ) требуются бетоны с высокой поглощающей способностью гамма- и нейтронного излучения и возможностью длительной эксплуатации при температуре 300 °С. При этом использование серпентинитовых бетонов остается актуальным благодаря их способности хорошо сохранять в процессе эксплуатации химически связанную воду и обладать удовлетворительной радиационной стойкостью до интегральных значений флюенса $1,5 \cdot 10^{20}$ нейтрон/см² с энергией нейтронов до 1 МэВ [4].

Цель настоящей работы — расчет коэффициентов ослабления фотонного и нейтронного пучка при прохождении через железо-магнетито-серпентинитовый цементный бетон (ЖМСЦБ), исполь-

зумы для биологической защиты атомных реакторов.

Материалы и методика

ЖМСЦБ был получен на основе однородной пластифицированной смеси портландцемента, добавок с химически связанной водой (серпентин и др.), активированного железорудного наполнителя и железной дробы [5 – 7]. Разработанный авторами бетон имеет следующие характеристики:

— плотность бетона высушенного при 110°C — 4100 кг/м³,

— прочность при сжатии после 28 суток твердения — 45 – 55 МПа,

— прочность при изгибе — 5 – 7 МПа,

— количество химически связанной воды после термообработки при 300°C — 1,1 ± 0,1 масс.%,

— температура эксплуатации — до 300 °С.

Расчеты коэффициентов ослабления фотонного и нейтронного пучка проводили с учетом предварительной термообработки материала при температуре 300 °С и его плотности 4000 кг/м³. Для расчета использовали элементный состав композиционного материала защиты, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав ЖМСЦБ							
Содержание элементов, масс.%							
Fe	O	H	Si	Al	Ca	Mg	S
80,58	9,89	0,11	1,52	0,35	7,25	0,19	0,11

Благодаря использованию серпентина, наличие в цементном камне не менее 1 масс. % кристаллизационной воды обеспечивает высокие защитные свойства разработанного бетона по отношению к нейтронному излучению.

Результаты и их обсуждение

Расчет коэффициентов ослабления гамма-излучения материалом ЖМСЦБ проводили в диапазоне энергий гамма-квантов от 0,5 до 20 МэВ. При расчете учитывали следующие значения плотности основных компонентов состава $\rho_{Fe} = 7,874$ г/см³, $\rho_H = 0,0009$ г/см³, $\rho_O = 0,0014$ г/см³, $\rho_{Si} = 2,33$ г/см³, $\rho_{Ca} = 1,55$ г/см³, $\rho_{Al} = 2,6989$ г/см³. В рассматриваемом диапазоне энергии гамма-квантов ослабление пучка фотонов обусловлено явлениями фотоэффекта, эффекта Комптона и эффекта образования электронно-позитронных пар [8]. Для описания данных процессов использованы известные выражения,

описывающие сечения этих процессов в однородном материале [9].

Выражение, описывающее сечение процесса фотоэффекта на атоме, имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{фот}} = 4\pi r_e^2 \alpha^4 Z^5 G_f(E),$$

$$G_f(E) = \frac{(2+\epsilon)^{3/2}}{\epsilon^{7/2}} \left\{ \frac{4}{3} + (1+\epsilon) \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \times \right.$$

$$\left. \times \left[1 - \frac{1}{2(\epsilon+1)\sqrt{\epsilon(2+\epsilon)}} \ln \left(\frac{1+\epsilon+\sqrt{\epsilon(2+\epsilon)}}{1+\epsilon-\sqrt{\epsilon(2+\epsilon)}} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где $\epsilon = \frac{E}{m_e c^2}$, E — энергия гамма-квантов,

$m_e c^2 = 0,511$ МэВ — энергия покоя электрона,

$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2,8 \cdot 10^{-13}$ см — классический радиус

электрона, $\alpha = \frac{1}{137}$ — постоянная тонкой структуры,

Z — порядковый номер элемента. Состав исследуемого композита преимущественно определяется атомами Fe, Si, Al, Ca, H и O. Используя (1), запишем коэффициент ослабления потока гамма-квантов вследствие фотоэффекта:

$$\mu_f = 4\pi r_e^2 \alpha^4 N_a \left(\rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}^5}{A_{Fe}} + \rho_{Si} \frac{Z_{Si}^5}{A_{Si}} + \right.$$

$$\left. + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^5}{A_{Al}} + \rho_{Ca} \frac{Z_{Ca}^5}{A_{Ca}} + \rho_O \frac{Z_O^5}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^5}{A_H} \right) G_f(E). \quad (2)$$

Выражение, описывающее сечение процесса комптоновского рассеяния гамма-кванта на электроне следующее:

$$\sigma_K = 2\pi r_e^2 \left[\frac{1+\epsilon}{\epsilon^2} \left(\frac{2(1+\epsilon)}{1+2\epsilon} - \frac{\ln(1+2\epsilon)}{\epsilon} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{\ln(1+2\epsilon)}{2\epsilon} - \frac{1+3\epsilon}{(1+2\epsilon)^2} \right]. \quad (3)$$

Запишем коэффициент ослабления потока гамма-квантов, проходящих через исследуемый композитный материал на основе железо-магнетито-серпентинитовой матрицы:

$$\mu_K = N_a \left(\rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}}{A_{Fe}} + \rho_{Si} \frac{Z_{Si}}{A_{Si}} + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}}{A_{Al}} + \rho_{Ca} \frac{Z_{Ca}}{A_{Ca}} + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H}{A_H} \right) \sigma_K. \quad (4)$$

Выражение, описывающее сечения процесса образование электронно-позитронных пар при энергиях гамма квантов в области их энергий $2m_e c^2 < E < 137m_e c^2 Z^{-1/3}$, имеет следующий вид:

$$\sigma_p = r_e^2 \alpha Z(Z+1) \left[\frac{28}{9} \ln(2\varepsilon) - \frac{218}{27} \right]. \quad (5)$$

Коэффициент ослабления потока гамма-квантов за счет эффекта образования электронно-позитронных пар в исследуемом композитном материале при рассматриваемых энергиях рассчитывается из выражения:

$$\begin{aligned} \mu_p = r_e^2 \alpha N_a \left[\frac{\rho_{Fe}}{A_{Fe}} Z_{Fe} (Z_{Fe} + 1) + \rho_{Si} \frac{\rho_{Si}}{A_{Si}} Z_{Si} (Z_{Si} + 1) + \frac{\rho_{Al}}{A_{Al}} Z_{Al} (Z_{Al} + 1) + \rho_{Ca} \frac{\rho_{Ca}}{A_{Ca}} Z_{Ca} (Z_{Ca} + 1) + \frac{\rho_O}{A_O} Z_O (Z_O + 1) + \rho_H \frac{\rho_H}{A_H} Z_H (Z_H + 1) \right] \left[\frac{28}{9} \ln(2\varepsilon) - \frac{218}{27} \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

Суммарный коэффициент ослабления гамма-квантов в композите определяется, как сумма коэффициентов ослабления от каждого процесса:

$$\mu = \mu_f + \sigma_K + \mu_p. \quad (7)$$

На рис. 1 представлены кривые, построенные по формулам (2), (4), (6) и (7), которые демонстрируют зависимость коэффициентов ослабления гамма квантов в композите в зависимости от их энергии. На этих рисунках показан вклад коэффициента ослабления каждого процесса в суммарный коэффициент ослабления в исследуемом композите. Видно, что при энергиях гамма квантов в интервале от 0,2 до 11 МэВ основной вклад в ослабление пучка дает эффект Комптона, а при энергиях более 11 МэВ — эффект образования электронно-позитронных пар.

Расчет коэффициентов ослабления плотности потока нейтронов в исследуемом композите ЖМСЦБ проводили для энергий нейтронов 0,1 – 5,0 МэВ. При таких энергиях, нейтроны называют быстрыми, и их вклад в полное сечение взаимодействия нейтронов с ядрами определяется процессами упругого потенциального рассеяния и неупругого рассеяния.

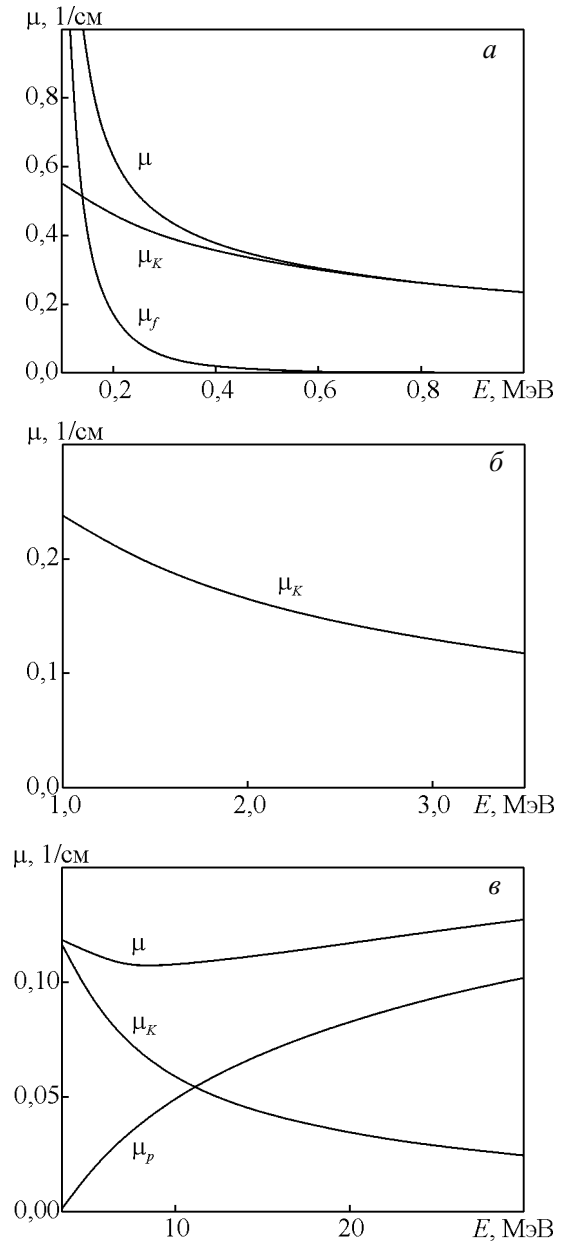


Рис. 1. Энергетические зависимости коэффициентов ослабления гамма-квантов в исследуемом композите в диапазоне: а – 0,1 – 1,0 МэВ (μ_f – коэффициент ослабления вследствие фото-эффекта, μ_K – коэффициент ослабления вследствие комптоновского рассеяния, μ – суммарный коэффициент ослабления); б – 1,0 – 3,5 МэВ (суммарный коэффициент ослабления μ в данном диапазоне совпадает с коэффициентом ослабления μ_K , обусловленный комптоновским рассеянием); в – 3,5 – 30 МэВ (μ_K – коэффициент ослабления за счет комптоновского рассеяния, μ_p – коэффициент ослабления, обусловленный образованием электронно-позитронных пар, μ – суммарный коэффициент ослабления).

Упругое потенциальное рассеяние возникает вследствие отражения падающей нейтронной волны на потенциальной яме, формирующейся за счет ядерного взаимодействия нейтрона с ядром. Сечение потенциального рассеяния для рассматриваемой энергетической области быстрых нейтронов примерно равно геометрическому сечению ядра $\sigma \approx \pi R^2$.

При неупругом рассеянии нейтронов часть их кинетической энергии передается ядру в виде энергии возбуждения. Необходимо отметить, что сечение неупругого рассеяния в рассматриваемой области энергий нейтронов становится заметным при $E \approx 1,5$ МэВ. Начиная с энергии $E \approx 3$ МэВ, у средних и тяжелых ядер сечение возрастает до значений порядка геометрического сечения ядра $\sigma \approx \pi R^2$ (примерно несколько барн).

Смоделирована зависимость коэффициента ослабления потока быстрых нейтронов проходящих через рассматриваемый композиционный материал, от глубины их прохождения. На рис. 2 представлены кривые, описывающие полные сечения взаимодействия нейтронов с атомами Fe, Si, Al, Ca, H и O при различных энергиях. Данные кривые построены с помощью аппроксимации экспериментальных данных [10]. Для исследуемого композита линейный коэффициент ослабления потока нейтронов имеет следующий вид:

$$\mu_n = N_a \left(\frac{\rho_{Fe}}{A_{Fe}} \sigma_{Fe} + \frac{\rho_{Si}}{A_{Si}} \sigma_{Si} + \frac{\rho_{Al}}{A_{Al}} \sigma_{Al} + \frac{\rho_O}{A_O} \sigma_O + \frac{\rho_H}{A_H} \sigma_H \right). \quad (8)$$

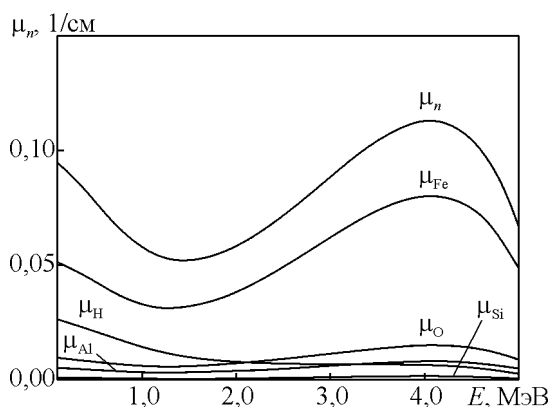


Рис. 2. Энергетическая зависимость суммарного коэффициента ослабления нейтронов μ_n в исследуемом композите в диапазоне 0,1 – 5,0 МэВ. Кривые μ_{Fe} , μ_H , μ_O , μ_{Al} , μ_{Si} демонстрируют вклад отдельных компонентов композита (Fe, H, O, Al, Si) в суммарный коэффициент ослабления.

Используя сечения взаимодействия нейтрона с атомами разработанного композиционного материала, по формуле (8) были построены кривые, описывающие зависимость коэффициента ослабления проходящего через композит потока нейтронов от глубины прохождения (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что, несмотря на низкую плотность водорода в исследуемом композите, вклад в коэффициент ослабления потока нейтронов водорода весьма значителен. Такое сильное влияние водорода определяется его высокой концентрацией, а также тем обстоятельством, что большая кинетическая энергия передается легким ядрам, а не тяжелым.

Выводы

Представлены расчеты коэффициентов ослабления фотонного и нейтронного пучка при прохождении через железо-магнетито-серпентинитовый цементный бетон (ЖМСЦБ), используемый для биологической защиты атомных реакторов. При энергиях гамма-квантов в интервале от 0,2 до 11 МэВ основной вклад в ослабление пучка дает эффект Комптона, а при энергиях более 11 МэВ — эффект образования электронно-позитронных пар.

При оценке воздействия быстрых нейтронов показано, что, несмотря на низкую плотность водорода в исследуемом композите, вклад в коэффициент ослабления потока нейтронов водорода весьма значителен. Такое сильное влияние водорода определяется его высокой концентрацией, а также тем обстоятельством, что в данном случае большая кинетическая энергия передается легким ядрам, а не тяжелым.

Исследования выполнены при поддержке Государственного задания Министерства образования и науки РФ.

Литература

- Новиков В.М., Слесарев И.С., Алексеев П.Н. Атомные реакторы повышенной безопасности. Анализ концептуальных разработок. М.: Энергоатомиздат, 1993, 261 с.
- Егоров Ю.А., Машкович В.П. Радиационная безопасность и защита АЭС. М.: Атомиздат, 1982, 231 с.
- Поспелов В.П., Миренков А.Ф., Покровский С.Г. Бетоны радиационной защиты атомных электростанций. М: ООО “Август-Борг”, 2006, 652 с.
- Гольдштейн Г. Основы защиты реакторов. М.: Госатомиздат, 1991, 219 с.

5. Матюхин П. В., Павленко В. И., Ястребинский Р. Н. Композиционный материал, стойкий к воздействию высокоэнергетических излучений. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2012, № 2, с. 25 – 27.
6. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В., Четвериков Н.А. Композиционный материал для защиты от гамма-излучения. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2011, № 3, с. 17 – 20.
7. Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Павленко З.В. Использование модифицированного железорудного сырья для получения конструкционной биологической защиты атомных реакторов. Успехи современного естествознания, 2015, № 9, ч. 3, с. 507 – 510.
8. Бондаренко Г.Г. Радиационная физика, структура и прочность твердых тел. М.: Лаборатория знаний, 2016, 467 с.
9. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1981, 623 с.
10. Пшеничный Г.А. Взаимодействие излучений с веществом и моделирование задач ядерной геофизики. М.: Энергоиздат, 1982, 252 с.
- of radiation protection of nuclear power plants]. М: ООО “Август-Борг”, 2006. 652 s.
4. Gol'dshtejn G. Osnovy zashhity reaktorov [Bases of protection of reactors]. М.: Gosatomizdat, 1991, 219 p.
5. Matjuhin P. V., Pavlenko V. I., Jastrebinskij R. N. Kompozicionnyj material, stojkij k vozdeystviyu vysokoenergeticheskikh izluchenij [Composition material resistant to impact of high-energy emissions]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*, 2012, № 2, pp. 25-27.
6. Jastrebinskij R. N., Pavlenko V. I., Matjuhin P. V., Chetverikov N. A. Kompozicionnyj material dlya zashhity ot gamma-izlucheniya [Composite material for protection against gamma radiation]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*, 2011, no. 3, pp. 17 – 20.
7. Matjuhin P.V., Jastrebinskaja A.V., Pavlenko Z.V. Ispol'zovanie modifitsirovannogo zhelezorudnogo syr'ja dlya polucheniya konstrukcionnoj biologicheskoy zashchity atomnyh reaktorov [Use of the modified iron ore raw materials for receiving constructional biological protection of nuclear reactors]. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya — Advances in Current Natural Sciences*, 2015, no. 9, ch.3, pp. 507 – 510.
8. Bondarenko G.G. *Radiatsionnaya fizika, struktura i prochnost tverdykh tel*. Moscow: Laboratoriya znaniy, 2016, 467 s. [Radiation physics, structure and strength of solids]. Moscow: Laboratory of knowledges, 2016, 467 p.
9. Ahiezer A.I., Beresteckij V.B. *Kvantovaya elektrodinamika* [Quantum electrodynamics]. М.: Nauka, 1981, 623 p.
10. Pshenichnyj G.A. *Vzaimodejstvie izluchenij s veshchestvom i modelirovanie zadach yadernoj geofiziki*. [Interaction of radiations with substance and modeling of problems of nuclear geophysics] М.: Energoizdat, 1982, 252 p.

References

1. Novikov V.M., Slesarev I.S., Alekseev P.N. Atomnye reaktory povyshennoj bezopasnosti. Analiz konceptual'nyh razrabotok [Nuclear reactors with increased safeness]. Moscow, Energoatomizdat, 1993, 261 p.
2. Egorov Ju.A., Mashkovich V.P. Radiacionnaja bezopasnost' i zashhita AES [Radiation safety and protection of the NPP]. Moscow, Atomizdat, 1982, 231 p.
3. Pospelov V.P., Mirenkov A.F., Pokrovskij S.G. Betonnyj radiacionnoj zashhity atomnyh elektrostancij [Concrete

Статья поступила в редакцию 1.03.2016 г.

Ястребинский Роман Николаевич — Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), кандидат физико-математических наук, профессор, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: yrndo@mail.ru.

Бондаренко Геннадий Германович — Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (г. Москва, 101000, ул. Мясницкая, 20), доктор физико-математических наук, ординарный профессор НИУ ВШЭ, заведующий лабораторией, специалист в области радиационной физики твердого тела, космического материаловедения. E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.

Павленко Вячеслав Иванович — Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), доктор технических наук, профессор, директор Института строительного материаловедения и техносферной безопасности, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: kafnx@intbel.ru.

Weakening of photon and neutron radiation by iron-magnetite-serpentine radiation-protective composite

R. N. Yastrebinskii, G. G. Bondarenko, V. I. Pavlenko

In this paper the calculations for coefficients of weakening of both photon and neutron beams when the ones pass through the iron-magnetite-serpentine cement concrete (IMSCC) have been presented. IMSCC is using for biological protection of nuclear reactors. At the energies of photons in the range from 0.2 to 11 MeV the main contribution to weakening of beam gives Compton's effect. But at the photon energies more than 11 MeV the main contribution to weakening of beam gives effect of electron-positron couples formation. At an assessment of influence of fast neutrons, it has been shown that, despite the low density of hydrogen in the studied composite, a contribution of hydrogen to coefficient of weakening of a neutron stream was very important. It is connected with both a high concentration of hydrogen and the fact that at neutron irradiation the higher kinetic energy is transferred to light atomic nuclei than heavy ones.

Keywords: magnetite concentrate, serpentine, concrete, photon irradiation, neutron irradiation, radiation attenuation coefficient

Yastrebinskii Roman — *V.G. Shoukhov Belgorod State Technological University, (46 Kostyukov str., Belgorod, 308112, Russia), Ph.D, professor, specialist in the field of radiation and space materials science. E-mail: yrndo@mail.ru.*

Bondarenko Gennady — *National Research University Higher School of Economics (20, Myasnitskaya Str., Moscow, 101000, Russia), Dr.Sci. (Phys-Math), ordinary professor of NRU HSE, head of laboratory "Radiation solid-state physics". Specialist in radiation solid-state physics and space materials science. E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.*

Pavlenko Vyacheslav — *V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46 Kostyukov str., Belgorod, 308112, Russia), DrSci (Eng), professor, director of the Institute of building materials and technosphere security, specialist in radiation and space materials science. E-mail: kafnx@intbel.ru.*