

ПОТЕРИ ЭНЕРГИЙ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЙ ЖЕЛЕЗООКСИДНЫЙ КОМПОЗИТ

Р.Н. Ястребинский¹, Н.И. Черкашина¹, А.В. Ястребинская¹, А.В. Носков²

¹*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород, Россия;*

²*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия*

E-mail: yrndo@mail.ru

Приведены результаты математического моделирования взаимодействия электронного излучения с радиационно-защитным железомоксидным композиционным материалом на основе магнетитовой матрицы, цементного связующего и водного раствора кремнийорганического модификатора, наиболее эффективно используемого в биологической защите атомных реакторов. Проведены расчеты ионизационных, радиационных и суммарных потерь энергии электронов в композите. Показано, что наибольший вклад в радиационные и ионизационные потери дает железомоксидная составляющая композита. Исследована зависимость среднего пробега быстрых электронов в композите от их начальной кинетической энергии. Смоделированы и исследованы коэффициенты пропускания по числу частиц и энергии в композите в зависимости от угла падения к нормали композита и начальной энергии падающих электронов. Показаны высокие защитные свойства разработанного композита по отношению к потоку быстрых электронов в общем случае их падения под разными углами к нормали поверхности мишени.

ВВЕДЕНИЕ

Реакторное γ -излучение прежде, чем его энергия перейдет в тепло, конвертируется в электронное, но до последнего времени этот промежуточный процесс бомбардировки структуры железосодержащих композитов не рассматривался среди значимых факторов условий облучения, определяющих как радиационную стойкость, так и радиационную повреждаемость.

Закономерности прохождения быстрых электронов в тяжелых средах обусловлены многократными процессами упругих и неупругих взаимодействий, определяющих их глубину проникновения в защиту.

Упругое рассеяние наблюдается при таких столкновениях, при которых происходят лишь изменения направления движения сталкивающихся частиц, тогда как их общая энергия остается неизменной. Основную роль в рассеянии электронов играет упругое рассеяние на атомных ядрах, хотя электроны рассеиваются и на электронах атомных оболочек. Вследствие малой массы электронов они отклоняются на углы от 0 до 180 град, причем на малые углы электроны отклоняются с большей вероятностью.

Неупругое рассеяние электронов происходит в основном в результате их столкновения с орбитальными электронами. При столкновении электронов с электронами атомных оболочек часть энергии электронов передается связанному электрону атома. В зависимости от количества переданной энергии происходит возбуждение или ионизация атомов вещества. В том и другом случае воздействующий электрон теряет свою энергию. Большая часть вторичных электронов обладает незначительной кинетической энергией. Процесс

возбуждения сопровождается испусканием характеристического излучения. Процесс неупругого рассеяния сопровождается ионизацией.

Ионизационные потери электронов преобладают в области относительно небольших энергий. С ростом энергии электрона растут радиационные потери. Энергию, теряемую на ионизацию и возбуждение, можно считать локально поглощенной вблизи трека частицы в отличие от радиационных потерь энергии, обусловленных генерацией проникающего фотонного излучения.

Помимо потерь на ионизацию и возбуждение атомов вещества, электроны могут терять свою энергию на образование тормозного излучения. Проходя вблизи атомного ядра, под действием его электрического поля электроны испытывают торможение. Поэтому в соответствии с законом сохранения энергии они будут испускать электромагнитное (тормозное) излучение. В тормозное излучение может преобразоваться любая часть кинетической энергии электрона, вплоть до ее максимального значения. Поэтому энергетический спектр тормозного излучения непрерывный.

Максимальная энергия электронов (β -частиц) для большинства радионуклидов не превосходит 5 МэВ. Электронный пучок создает большие градиенты электрического поля, вызывающие электрические пробои по границам зерен, что также может привести к разупрочнению материала по границам фаз.

В настоящей работе приведены результаты математического моделирования взаимодействия электронного излучения с радиационно-защитным железомоксидным композиционным материалом на основе магнетитовой матрицы, цементного связующего и водного раствора кремнийорганического модификатора, наиболее

эффективно используемого в биологической защите атомных реакторов [1, 2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились на материале, подвергнутом предварительной термообработке при температуре 280 °С, с плотностью 3800 кг/м³. Химический и элементный составы композиционного материала защиты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Химический состав радиационно-защитного композита

Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O
0,95	79,08	13,09	4,49	1,18	1,21

Таблица 2
Элементный состав радиационно-защитного композита

Fe	O	H	Si	Al	Ca
57,93	29,87	0,13	2,1	0,62	9,35

Расчет проводили по известным формулам ионизационных, радиационных и полных потерь, а также средних пробегов электронов в зависимости от их энергии. Зависимости коэффициентов пропускания по числу частиц и энергии от толщины разработанного композита для различных углов падения и начальных энергий электронов исследовали методами Монте-Карло.

УДЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Для определения ионизационных потерь энергии при прохождении электронов через исследуемый железооксидный композиционный материал использовали формулу для ионизационных потерь энергии электрона в веществе [3, 4]:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = K\psi \frac{Z}{A} \frac{1}{2\beta^2} \left[\ln\left(\frac{m_e c^2 E_k}{I^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right], \quad (1)$$

где $K = 4\pi r_e^2 m_e c^2 N_A = 0,307 \frac{\text{МэВ}}{\text{г/см}^2}$;

$m_e c^2 = 0,511 \text{ МэВ}$ – энергия покоя электрона;

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

электрона; $N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$; ψ – плотность

вещества; I – средний ионизационный потенциал

атома вещества среды; $\beta = \sqrt{1 - \frac{(m_e c^2)^2}{(m_e c^2 + E_k)^2}}$ –

приведенная энергия электрона с кинетической энергией E_k .

Исследуемый композиционный материал состоит из атомов разного вида, каждый из которых будет давать свой вклад в ионизационные потери энергии электронов. Воспользуемся композиционным законом Брэгга:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \sum_i \rho_i \left(-\frac{dE}{dx}\right)_i, \quad (2)$$

где ρ_i – вклад i -го элемента в сложном веществе в ионизационные потери электрона $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_i$.

Перепишем выражение (2) в более удобном для анализа виде:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho \frac{Z}{A} F(E_k, I), \quad (3)$$

$$F(E_k, I) = \frac{K}{2\beta^2} \left[\ln\left(\frac{m_e c^2 E_k}{I^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right]. \quad (4)$$

В этом случае вклад каждого вещества в суммарные ионизационные потери имеет вид:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^{Fe} = \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}}{A_{Fe}} F(E_k, I_{Fe}); \quad (5a)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^{Al} = \rho_{Al} \frac{Z_{Al}}{A_{Al}} F(E_k, I_{Al}); \quad (5б)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^{Ca} = \rho_{Ca} \frac{Z_{Ca}}{A_{Ca}} F(E_k, I_{Ca}); \quad (5в)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^{Si} = \rho_{Si} \frac{Z_{Si}}{A_{Si}} F(E_k, I_{Si}); \quad (5г)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^O = \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O); \quad (5д)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^H = \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H). \quad (5е)$$

Средние ионизационные потенциалы рассматриваемых атомов имеют следующие значения:

$$I_{Fe} \approx 7,87 \text{ эВ}; \quad I_{Ca} \approx 6,111 \text{ эВ};$$

$$I_{Al} \approx 5,984 \text{ эВ}; \quad I_{Si} \approx 8,149 \text{ эВ}; \quad I_O \approx 13,614 \text{ эВ}$$

$$\text{и } I_H \approx 13,595 \text{ эВ [5].}$$

Исходя из композиционного закона Брэгга (3), ионизационные потери энергии электронов в исследуемом композиционном материале запишем в виде

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}}{A_{Fe}} F(E_k, I_{Fe}) + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}}{A_{Al}} F(E_k, I_{Al}) + \rho_{Ca} \frac{Z_{Ca}}{A_{Ca}} F(E_k, I_{Ca}) + \rho_{Si} \frac{Z_{Si}}{A_{Si}} F(E_k, I_{Si}) + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F(E_k, I_O) + \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F(E_k, I_H). \quad (6)$$

Представленные на рис. 1 кривые, построенные по формулам (5) и (6), демонстрируют ионизационные потери полученного железооксидного композита (жирная кривая) и отдельный вклад каждого вещества композита в

ионизационные потери. Из этого рисунка следует, что наибольший вклад в ионизационные потери дают атомы железа, определяющие высокую плотность композита.

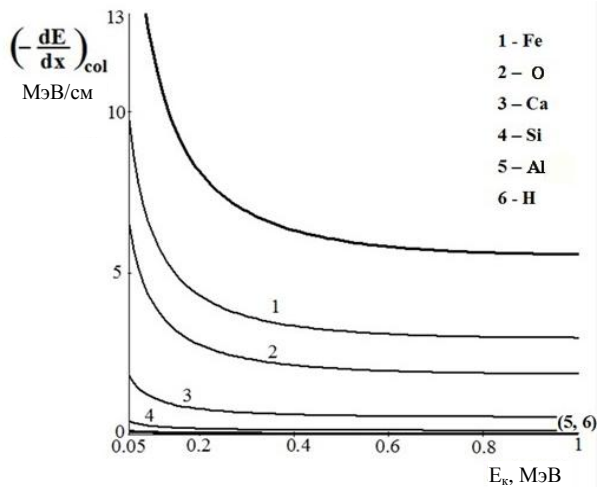


Рис. 1. Удельные ионизационные потери быстрых электронов в железоксидном композите

Рассмотрим радиационные потери энергии при прохождении электронов через исследуемый железоксидный композиционный материал. Воспользуемся формулой для радиационных потерь энергии электрона в веществе [6]:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \rho \frac{Z^2}{A} G(E_k), \quad (7)$$

где

$$G(E_k) = \frac{K\alpha}{4\pi m} \left[\frac{12\varepsilon^2 + 4m_e^2 \ln\left(\frac{\varepsilon + p}{m_e}\right) - (8\varepsilon + 6p)m^2 \left(\ln\left(\frac{\varepsilon + p}{m_e}\right)\right)^2 - \frac{4}{3} + \frac{2m^2}{\varepsilon p} D\left(\frac{2p(\varepsilon + p)}{m^2}\right) \right], \quad (8)$$

$D(x) = \int_0^x \frac{\ln(1+y)}{y} dy$; $\varepsilon = E_k + m_e c^2$ – полная энергия электрона; p – импульс электрона.

Так как исследуемый железоксидный композит состоит из множества веществ, то вклад каждого элемента в радиационные потери быстрого электрона будет иметь вид:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}^{Fe} = \rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}^2}{A_{Fe}} G(E_k); \quad (9a)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}^{Al} = \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^2}{A_{Al}} G(E_k); \quad (9б)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}^{Ca} = \rho_{Ca} \frac{Z_{Ca}^2}{A_{Ca}} G(E_k); \quad (9в)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}^{Si} = \rho_{Si} \frac{Z_{Si}^2}{A_{Si}} G(E_k); \quad (9г)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}^O = \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} G(E_k); \quad (9д)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}^H = \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} G(E_k). \quad (9e)$$

Суммарные потери энергии на излучение определим с помощью выражения

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\rho_{Fe} \frac{Z_{Fe}^2}{A_{Fe}} + \rho_{Al} \frac{Z_{Al}^2}{A_{Al}} + \rho_{Ca} \frac{Z_{Ca}^2}{A_{Ca}} + \rho_{Si} \frac{Z_{Si}^2}{A_{Si}} + \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} \right) G(E_k). \quad (10)$$

На рис. 2 приведены кривые, построенные по формулам (9) и (10) и показывающие потери на излучения быстрого электрона в железоксидном композите (жирная кривая) и отдельный вклад каждого вещества композита в эти потери. Из рисунка следует, что больший вклад в радиационные потери дает железистая составляющая, при этом потери энергии значительно меньше по сравнению с ионизационными потерями для рассматриваемых энергий электронов.

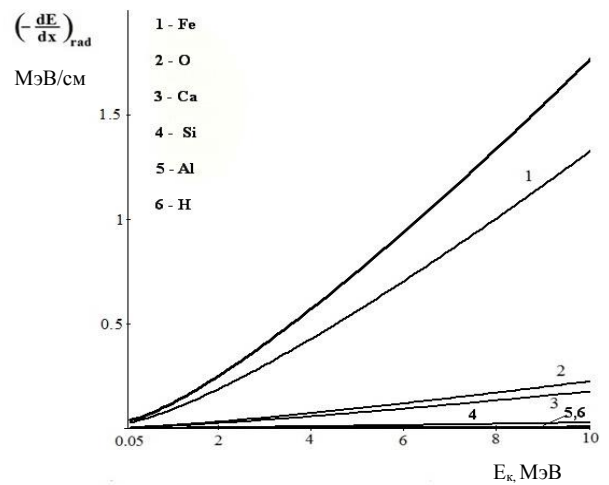


Рис. 2. Удельные радиационные потери быстрых электронов в железоксидном композите

Суммарные потери энергии в исследуемом композите показаны на рис. 3.

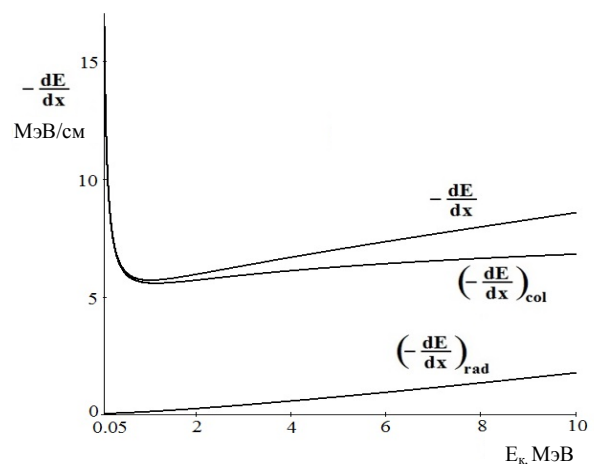


Рис. 3. Зависимость суммарных удельных потерь энергии быстрых электронов в исследуемом железоксидном композите от кинетической энергии электронов

Расчет проводился по формуле:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}, \quad (11)$$

Из рисунка следует, что для рассматриваемых энергий электронов потери в основном определяются ионизацией атомов.

ПРОХОЖДЕНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Так как потери энергии электрона в композите приводят к его торможению, найдем средний пробег, определяющий среднюю длину пути, который прошла бы частица в процессе замедления в неограниченной и однородной среде при условии, что она непрерывно теряет энергию вдоль всего пути в соответствии с тормозной способностью $\left(-\frac{dE}{dx}\right)$. Истинные пробеги являются случайными и распределены возле среднего пробега. Средний пробег рассчитывается по формуле:

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE_k}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)} \quad (12)$$

На рис. 4 и 5 представлены кривые, демонстрирующие зависимость среднего пробега электрона в композите в зависимости от его начальной кинетической энергии.

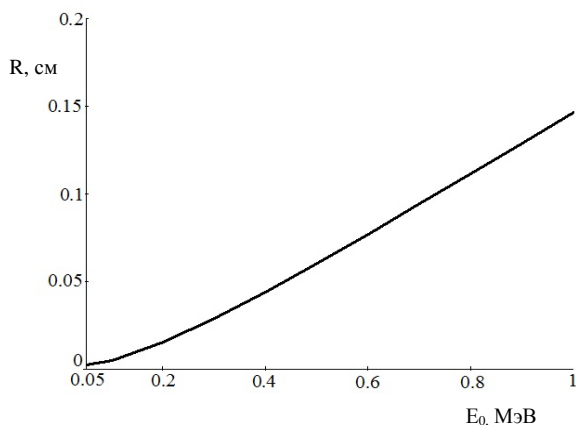


Рис. 4. Зависимость среднего пробега электрона в железоксидном композите от его начальной кинетической энергии (для энергий 0,05...1 МэВ)

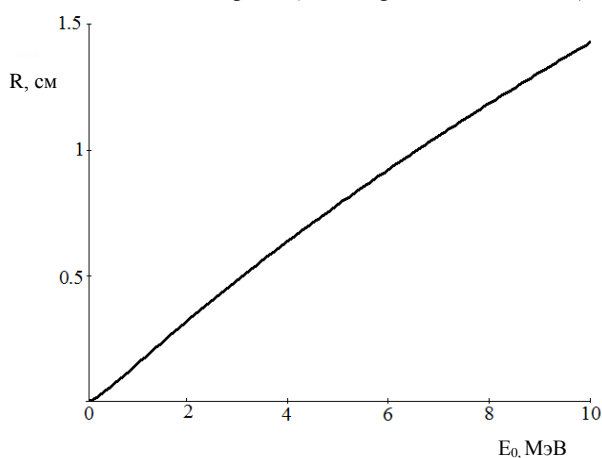


Рис. 5. То же, что и на рис. 4 для энергии электронов от 0 до 10 МэВ

Кривые (см. рис. 4, 5) построены в разных энергетических диапазонах по формуле (12) с учетом (11), (7), (3). Видно, что в полученном

компоните средний путь электрона достаточно мал в широком диапазоне начальных энергий электрона, что говорит о перспективе его использования для защиты от воздействия промежуточных электронов при реакторной защите.

Исследованы коэффициенты пропускания электронов, разработанного железоксидным композитом. Рассмотрим коэффициенты пропускания по числу частиц и по энергии электронов, падающих на исследуемый железоксидный композиционный материал под некоторым углом ϕ к нормали его поверхности и прошедших слой вещества x (рис. 6).

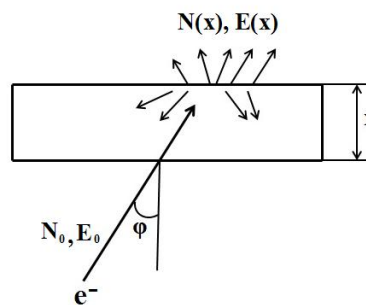


Рис. 6. Геометрия процесса прохождения быстрых электронов через железоксидный композит

Коэффициенты пропускания электронов, падающих на исследуемый железоксидный композит под некоторым углом к нормали его поверхности и прошедших слой вещества x , находятся по формулам [6]:

– по числу частиц

$$T_N(x) = \frac{N(x)}{N_0}, \quad (13a)$$

– по энергии

$$T_{E_k}(x) = \frac{E(x)}{N_0 E_0}, \quad (13b)$$

где N_0 и E_0 – число падающих электронов и их кинетическая энергия; $N(x)$ и $E(x)$ – соответственно число и суммарная энергия электронов, прошедших слой толщиной x .

Проведено моделирование статистическим методом Монте-Карло процессов пропускания электронов через разработанный железоксидный композит. На рис. 7–11 графически приведены результаты моделирования зависимости коэффициентов пропускания по числу частиц и энергии от толщины разработанного композита для углов и начальных энергий, показанных на рисунках.

Анализ кривых (см. рис. 7) показывает, что с увеличением угла падения значительно снижается коэффициент пропускания числа электронов на исследуемый композиционный материал. Эта закономерность объясняется тем, что с уменьшением угла ϕ уменьшается размер области взаимодействия, так как тенденция электронов к рассеянию в направлении движения заставляет их распространяться ближе к поверхности, и вероятность процесса отражения увеличивается.

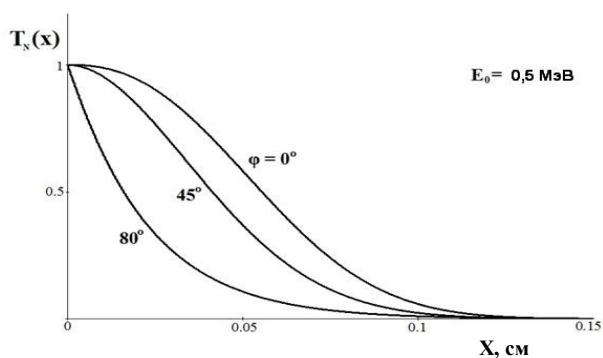


Рис. 7. Коэффициент пропускания числа электронов при разных углах падения. Начальная энергия электронов 0,5 МэВ

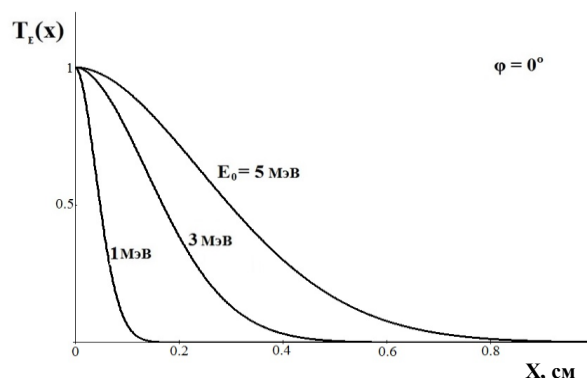


Рис. 10. Энергетический коэффициент пропускания при нормальном падении на композит для разных начальных энергий электрона

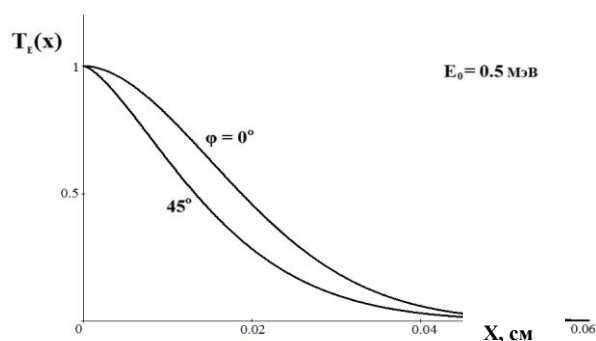


Рис. 8. Коэффициент пропускания по энергии электронов при разных углах падения. Начальная энергия электронов 0,5 МэВ

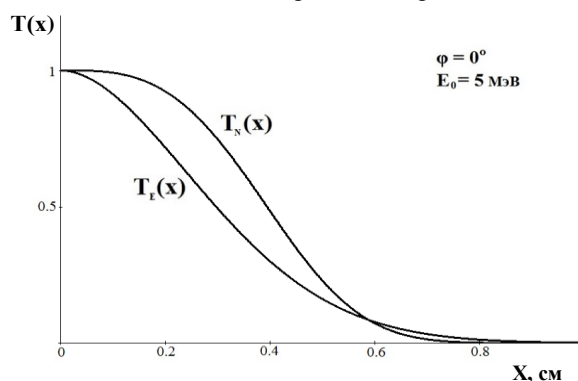


Рис. 11. Сравнения коэффициентов пропускания по числу частиц и энергии для параметров, представленных на рисунке

Представленная на рис. 8 кривая коэффициента пропускания по энергии ($T_E(x)$) значительно ниже кривой коэффициентов пропускания электронов по числу частиц ($T_N(x)$) (см. рис. 7). При этом с увеличением энергии электронов коэффициент пропускания электронов увеличивается (см. рис. 9). Аналогичная ситуация наблюдается для коэффициентов пропускания по энергии электронов для разных начальных энергий электронов (см. рис. 10). Сравнение коэффициентов пропускания по числу и энергии электронов через железооксидный композит в перпендикулярно падающем пучке показано на рис. 11.

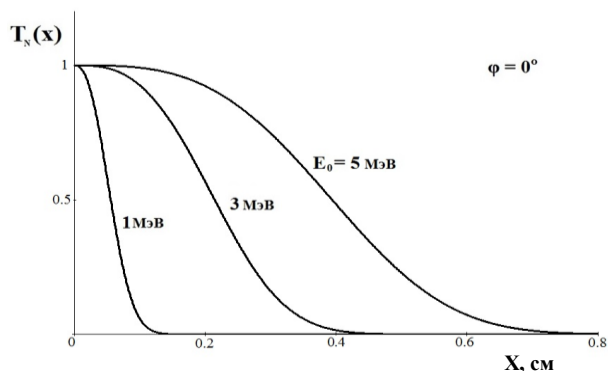


Рис. 9. Коэффициент пропускания числа электронов при нормальном падении на композит для разных начальных энергий электрона

Таким образом, проведенные исследования указывают на высокие радиационно-защитные свойства композита по отношению к потоку быстрых электронов в общем случае их падения под разными углами к нормали поверхности мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование процессов прохождения быстрых электронов через разработанный радиационно-защитный железооксидный композиционный материал на основе магнетитовой матрицы и цементного связующего. Проведены расчеты ионизационных, радиационных и суммарных потерь энергии электронов в композите. Показано, что наибольший вклад в радиационные и ионизационные потери дает железооксидная составляющая композита. Исследована зависимость среднего пробега быстрых электронов в композите от их начальной кинетической энергии. Смоделированы и исследованы коэффициенты пропускания по числу частиц и энергии в композите в зависимости от угла падения к нормали композита и начальной энергии падающих электронов. Показаны высокие защитные свойства разработанного композита по отношению к потоку быстрых электронов в общем случае их падения под разными углами к нормали поверхности мишени.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности №11.2034.2014/К.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П.В. Матюхин, В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский. Перспективы создания современных высококонструкционных радиационно-защитных металлокомпозиатов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011, №2, с. 27-29.

2. В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, П.В. Матюхин. Композиционный материал, стойкий к воздействию высокоэнергетических излучений // *Вестник Белгородского государственного*

технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012, №2, с. 22-24.

3. С. Moller // *Ann. De Phys.* 1932, v. 14, p. 531.

4. Н.А. Bethe // *Handbuch der Physik*. Berlin, 1933, Bd. 24, p. 273.

5. В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. *Краткий химический справочник*. Л.: «Химия», 1991, 432 с.

6. А.И. Ахиезер, В.Б. Берестецкий. *Квантовая электродинамика*. М.: «Наука», 1981, 428 с.

Статья поступила в редакцию 25.03.2016 г.

ВТРАТИ ЕНЕРГІЙ ШВИДКИХ ЕЛЕКТРОНІВ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ ЧЕРЕЗ РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИЙ ЗАЛІЗОКСИДНИЙ КОМПЗИТ

Р.Н. Ястребинський, Н.І. Черкашина, А.В. Ястребинська, А.В. Носков

Наведено результати математичного моделювання взаємодії електронного випромінювання із радіаційно-захисним залізооксидним композиційним матеріалом на основі магнетитової матриці, цементного пов'язуючого і водного розчину кремнійорганічного модифікатора, що найбільш ефективно використовується в біологічному захисті атомних реакторів. Проведено розрахунки іонізаційних, радіаційних і сумарних витрат енергії електронів у композиті. Показано, що найбільший внесок у радіаційні та іонізаційні втрати дає залізооксидна складова композиту. Досліджено залежність середнього пробігу швидких електронів у композиті від їх початкової кінетичної енергії. Змодельовано і досліджено коефіцієнти пропускання за числом частинок і енергії в композиті в залежності від кута падіння до нормалі композиту і початкової енергії падаючих електронів. Показано високі захисні властивості розробленого композиту по відношенню до потоку швидких електронів у загальному випадку їх падіння під різними кутами до нормалі поверхні мішені.

ENERGY LOSSES OF FAST ELECTRONS WHEN PASSING THROUGH THE RADIATION-PROTECTIVE IRON-OXIDE COMPOSITE

R.N. Yastrebinski, N.I. Cherkashina, A.V. Yastrebinskaya, A.V. Noskov

This work presents the results of the mathematical modeling of the interaction of electronic radiation with radiation-protective iron-oxide composite material made on the basis of a magnetite matrix, cement binding and water solution of the organic-silicon modifier which is most effectively used in biological protection of nuclear reactors. The calculations of ionization, radiation and total losses of energy of electrons in a composite were carried out. It is shown that the iron-oxide component of a composite contributes mostly to the radiation and ionization losses. The average run of the fast electrons in a composite versus their initial kinetic energy is investigated. The electron transmittance of the composite relative to the number of particles and their energy versus both the angle of incidence to the normal of the composite surface and the initial energy of the electron incidence are simulated and investigated. High protective properties are shown of the developed composite relative to a fast electron stream in the common case of different angles of their incidence normal to the target surface is revealed.