

Расчет ионизационных и радиационных энергетических потерь быстрых электронов в полистирольном композите

В. И. Павленко, Г. Г. Бондаренко, Н. И. Черкашина

Рассмотрено воздействие быстрых электронов энергий до 10 МэВ на полистирольные композиты с разным содержанием кремнийорганического наполнителя. Методом Монте – Карло проведены расчеты ионизационных и радиационных потерь быстрых электронов в рассматриваемом полистирольном композите. Рассчитаны изменения коэффициентов отражения, поглощения электронов энергии от 1 до 3 МэВ и глубина их проникновения в исследуемом полимерном композите с содержанием наполнителя 60 %. При больших энергиях коэффициент отражения практически равен нулю. Рассчитаны значения среднего линейного пробега электрона в рассматриваемом полистирольном композите в зависимости от его энергии (от 0 до 10 МэВ) при разном содержании наполнителя. Дана оценка радиационной стойкости исследуемых композитов.

Ключевые слова: электроны, ионизационные потери, радиационные потери, диэлектрики, полимеры.

Введение

В условиях космического полета наружные элементы летательных объектов подвергаются воздействию высокоэнергетических ионизирующих излучений, солнечных вспышек и радиационных поясов Земли, что, в конечном итоге, приводит к их разрушению. Особенно подвержены разрушению в космосе полимерные диэлектрические композиты, которые используют в качестве терморегулирующих покрытий. Поэтому в настоящее время проводят исследования по разработке материалов, которые должны обеспечивать требуемый уровень радиационной защиты в космосе при лучших габаритно-весовых характеристиках по сравнению с традиционно используемыми, а также обладать большим сроком активного существования.

Известно, что внутри магнитосферы основным фактором, оказывающим радиационное воздействие на терморегулирующие элементы космических аппаратов, являются электроны и протоны радиационных поясов Земли, энергии которых лежат в диапазоне $\sim 0,1 - 100$ МэВ [1]. В данной работе рассмотрено воздействие на материалы быстрых электронов энергий до 10 МэВ, так как они имеют

большую проникающую способность по сравнению с протонами и играют основную роль в процессах радиационной электризации.

Один из наиболее дешевых и простых методов исследования взаимодействия электронов с неоднородным объектом — математическое моделирование методом Монте-Карло, что позволяет дать первоначальную оценку радиационно-защитных свойств материала без дорогостоящих натуральных испытаний в космосе. Поэтому важной задачей является моделирование процессов взаимодействия заряженных частиц космической среды с материалами, включая перспективные полимерные диэлектрические композиты.

Цель работы — расчет ионизационных и радиационных энергетических потерь быстрых электронов энергий до 10 МэВ в полистирольном композите с учетом процессов ионизации и возникновения тормозного излучения.

Методика эксперимента

В работе исследовали химические составы полимерных композитов, полученных на основе полистирола и кремнийорганического наполнителя.

где $\varepsilon = E_k + m_e c^2$ — полная энергия электрона,

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

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

где $F(x) = F \left(\frac{2p(\varepsilon + p)}{m^2 c^4} \right) = \int_0^{\frac{2p(\varepsilon + p)}{m^2 c^4}} \frac{\ln(1+y)}{y} dy$, p — импульс электрона.

Так как исследуемый полимерный композит состоит из атомов разных химических элементов, то

необходимо учесть вклад каждого в радиационные потери быстрого электрона. Поэтому радиационные потери энергии на излучение определим с помощью выражения:

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{rad}^{(CH_3)_2Si_2O} = \left(\rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_{Si} \frac{Z_{Si}^2}{A_{Si}} + \rho_O \frac{Z_O^2}{A_O} + \rho_H \frac{Z_H^2}{A_H} \right) G(E_k). \quad (7)$$

Суммарные потери энергии в исследуемом полимерном композите определяются как сумма ионизационных и радиационных потерь энергии электрона в веществе.

Результаты и обсуждение

Прохождение электронов через слой вещества поля рассчитано с использованием численного метода, согласно которому путь электрона состоит из отрезков, определяемых расстоянием между двумя

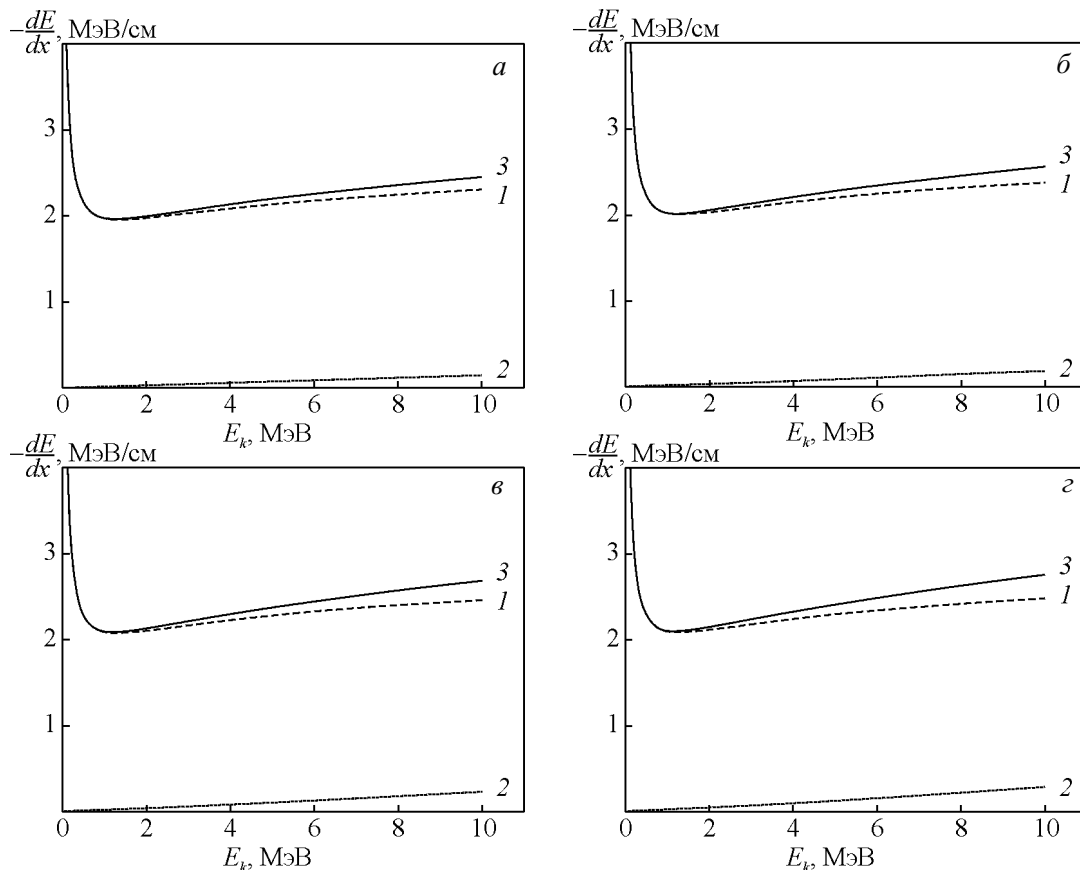


Рис. 1. Кривые зависимости: 1 — ионизационных $\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{col}$, 2 — радиационных $\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{rad}$, 3 — суммарных потерь энергии быстрых электронов от их начальной энергии в полистирольном композите, содержащем наполнитель, %: а — 0; б — 30; в — 60; з — 100.

последовательными актами упругого рассеяния при атомном столкновении. Вероятный процесс рассеяния электрона кулоновским полем ядра и атомных электронов вещества рассчитан по методу Монте – Карло.

На сегодняшний день метод Монте – Карло — один из самых эффективных способов моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с материалами сложного химического состава, так как позволяет с высокой точностью предсказывать траекторию частиц, потерю энергии на каждом шаге моделирования и проектировать толщину защитного материала без проведения трудоемких и дорогостоящих экспериментов в натуральных условиях [7].

На рис. 1а – з представлены кривые ионизационных $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}$ и радиационных $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}$ потерь энергии электрона, а также суммарные потери

электрона $\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}$ в исследуемых композитах (кривая 1) в зависимости от энергии. Из рис. 1 следует, что ионизационные потери являются доминирующими при относительно небольших энергиях электронов. С ростом энергии до 100 МэВ и атомного номера облучаемого вещества все больший вклад будут давать радиационные потери, которые линейно зависят от энергии электронов.

Наибольшими ионизационными и радиационными потерями энергии обладает электрон, проходящий через чистый кремнийорганический наполнитель, а наименьшими — через полистирол без наполнителя. Несмотря на разный химический состав исследуемых композитов, ионизационные и радиационные потери энергии электрона в материале в широком диапазоне энергий практически одинаковы для всех композитов с разным содержанием наполнителя (отклонение не более чем на 15 %).

Большой вклад в суммарные потери энергии электрона дают атомы кремния, а наименьший вклад — атомы водорода.

Коэффициенты отражения электронов разной энергии в исследуемом полимерном композите определяли по формулам:

— коэффициент отражения электронов по количеству частиц:

$$K_{отр}^{част} = \frac{N_{отр}}{N}, \quad (8)$$

где $N_{отр}$ — количество отраженных электронов; N — общее количество моделируемых электронов.

— коэффициент отражения электронов по энергии:

$$K_{отр}^{эн} = \frac{\sum_{i=0}^{E_{max}} E_i N_i}{N E_{max}}, \quad (9)$$

где E_i — энергия отраженного электрона; N_i — количество электронов E_i энергии; E_{max} — максимальная энергия отраженных электронов;

Коэффициенты поглощения электронов разной энергии в исследуемом полимерном композите определяли по формулам:

— коэффициент поглощения электронов по количеству частиц:

$$K_{погл}^{част} = 1 - K_{отр}^{част}, \quad (10)$$

— коэффициент поглощения электронов по энергии:

$$K_{погл}^{эн} = 1 - K_{отр}^{эн}. \quad (11)$$

В табл. 2 представлены результаты математических расчетов изменения коэффициентов отражения, поглощения электронов разной энергии и глубина их проникновения в исследуемом полимерном композите с содержанием наполнителя 60 %. Коэффициенты отражения и поглощения электронов рассчитаны для энергий от 1 до 3 МэВ. При больших энергиях коэффициент отражения практически равен нулю.

Таблица 2

Расчетные параметры распределения электронов в полистирольном композите с 60 % содержанием наполнителя

Энергия электронов, МэВ	Глубина концентрации максимальной дозы, мм	Коэффициенты			
		Отражения		Поглощения	
		$K_{отр}^{эн}$	$K_{отр}^{част}$	$K_{погл}^{эн}$	$K_{погл}^{част}$
1	1,5	0,023	0,035	0,977	0,965
2	4,6	0,011	0,013	0,989	0,987
3	6,3	0,005	0,008	0,995	0,992

Анализ данных табл. 2 свидетельствует, что коэффициент поглощения электронов в полистирольном композите значительно больше, чем коэффициент отражения для электронов рассматриваемой энергии. С увеличением начальной энергии электронов значительно уменьшается эффект их отражения и возрастает эффект поглощения в композиционном материале.

В табл. 3 представлены данные по рассчитанному среднему линейному пробегу электрона в рассмат-

Таблица 3

Значения среднего линейного пробега электрона в рассматриваемом полистирольном композите в зависимости от его энергии (до 10 МэВ) при разном содержании наполнителя

Начальная кинетическая энергия электрона, МэВ	Средний линейный пробег электрона, см при содержание наполнителя, масс. %			
	0	30	60	100
2	1	0,95	0,9	0,8
4	1,9	1,8	1,75	1,7
6	2,8	2,7	2,6	2,55
8	3,7	3,5	3,4	3,3
10	4,55	4,4	4,2	4,1

риваемом полистирольном композите в зависимости от его начальной кинетической энергии. В табл. 3 охвачен широкий диапазон энергии электрона от 2 до 10 МэВ; измерения проведены с интервалом в 2 МэВ. Наибольший средний линейный пробег электронов наблюдается в материале, который не содержит наполнителя, то есть в чистом полистироле. Однако значения достаточно близки друг к другу, что свидетельствует о том, что средний линейный пробег электрона в широком диапазоне энергий практически одинаков для всех композитов с разным содержанием наполнителя (отклонение не более чем на 5 %).

Выводы

Ионизационные и радиационные потери энергии электрона в материалах с разным содержанием наполнителя в широком диапазоне энергий практически одинаковы для всех композитов (отклонение не более чем на 15 %).

Большой вклад в суммарные потери энергии электрона дают атомы кремния, а наименьший вклад — атомы водорода.

В исследуемом композите средний путь пробега электрона достаточно мал в широком диапазоне начальных энергий электрона (от 0 до 10 МэВ), что говорит о перспективе его использования для защиты от воздействия электронов в космическом пространстве.

Благодаря высокой радиационной стойкости разработанных композитов данные материалы могут найти применение в космическом материаловедении в качестве терморегулирующих покрытий. Использование тяжелых металлов в данном случае нежелательно из-за возникновения интенсивного тормозного излучения, усиливающегося при увеличении энергии падающих электронов, поэтому облегченные полимерные композиты могут стать альтернативной заменой существующим материалам.

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

Литература

1. Модель космоса, т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Под ред. Л.С.Новикова. М.: Изд-во “Книжный дом Университет”, 2007, 1144 с.
2. Павленко В.И., Новиков Л.С., Бондаренко Г.Г., Черник В.Н., Гайдар А.И., Черкашина Н.И., Едаменко О.Д. Экспериментальное и физико-математическое моделирование воздействия набегающего потока атомарного кислорода на высоконаполненные полимерные композиты. Перспективные материалы, 2012, № 4, с. 92 – 98.
3. Павленко В.И., Заболотный В.Т., Черкашина Н.И., Едаменко О.Д. Влияние вакуумного ультрафиолета на поверхностные свойства высоконаполненных композитов. Физика и химия обработки материалов, 2013, № 2, с. 19 – 24.
4. Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Черкашина Н.И., Едаменко О.Д. Влияние вакуумного ультрафиолета на микро- и наноструктуру поверхности модифицированных полистирольных композитов. Перспективные материалы, 2013, № 3, с. 14 – 19.
5. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: Учеб. для вузов. В 2 кн. Кн. 1. Физика элементарных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1993, 408 с.
6. Stormand H., Israel H.I. Photon cross section from 1 keV to 100 MeV for elements Z = 1 to Z =100. Nucl. Data Tables, 1970, A7, 565 p.
7. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике. СПб.: Невский Диалект, Бинном. Лаборатория знаний, 2009, 192 с.

References

1. Novikov L.S. *Model kosmosa, t. 2, Vozdejstvie kosmicheskoj sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov* [Model of space, vol. 2, Effect of space environment on materials and equipment of spacecraft]. 8th edition, Moscow, University Book House Publ., 2007, 1144 p.
2. Pavlenko V.I., Novikov L.S., Bondarenko G.G., Chernik V.N., Gaidar A.I., Cherkashina N.I., Edamenko O.D. *Jeksperimental'noe i fiziko-matematicheskoe modelirovanie vozdejstvija nabegajushhego potoka atomarnogo kisloroda na vysokonapolnennye polimernye kompozity* [Experimental and physicomathematical simulation of the effect of an incident flow of atomic oxygen on highly filled polymer composites]. *Perspektivnye materialy — Advanced Materials (in Rus)*, 2012, no. 4, pp. 92 – 98.
3. Pavlenko V.I., Zabolotny V.T., Cherkashina N.I., Edamenko O.D. *Vlijanie vakuumnogo ul'trafioleta na poverhnostnye svojstva vysokonapolnennykh kompozitov* [Effect of vacuum ultraviolet on the surface properties of

- highly filled composites]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment (in Rus)*, 2013, no 2, pp. 19 – 24.
4. Pavlenko V.I., Bondarenko G.G., Cherkashina N.I., Edamenko O.D. Vliyanie vakuumnogo ul'trafiioleta na mikro- i nanostrukturu poverhnosti modifitsirovannykh polistirolnykh kompozitov [Effect of vacuum ultraviolet on micro- and nanostructure of surface-modified polystyrene composites]. *Perspektivnye materialy — Advanced Materials (in Rus)*, 2013, no. 3, pp. 14 – 19.
 5. Mukhin K.N. *Ekspierimental'naja yadernaja fizika. Kn. 1. Fizika elementarnykh chastits* [Experimental nuclear physics. Vol. 1. Physics of elementary particles], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1993, 408 p.
 6. Stormand H., Israel H.I. Photon cross section from 1 keV to 100 MeV for elements Z = 1 to Z = 100. Nuclear data tables, 1970, A7, p. 565.
 7. Ermakov S.M. *Metod Monte-Karlo v vychislitel'noj matematike* [Monte-Carlo computational mathematics]. St-Petersburg, Binom Publ., 2009, 192 p.

Статья поступила в редакцию 25.03.2015 г.

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

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

Черкашина Наталья Игоревна — Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, Костюкова ул., 46), кандидат технических наук. Специалист в области космического материаловедения. E-mail: natalipv13@mail.ru.

Calculation of ionization and radiation losses of fast electrons in polystyrene composite

V. I. Pavlenko, G. G. Bondarenko, N. I. Cherkashina

The impact of fast electrons with energies up to 10 MeV on a polystyrene composites with different content of silicone filler has been considered. The calculations of both ionization and radiation losses of fast electrons in the polystyrene composite were performed by Monte Carlo method. Formulae for calculation of total energy loss of electrons in the composite are presented. It has been presented the results of mathematical calculations for changes of the different parameters, such as coefficients of both electron reflection and electron absorption for various energies and depth of their penetration into the investigated polymer composite with 60 % filler content. The coefficients of both reflection and absorption of electrons were calculated for energies from 1 to 3 MeV. At high energies, the reflection coefficient of electrons was equal practically to zero. The values of the average linear range for electrons in the polystyrene composite with different filler contents as the functions of its energies from 0 to 10 MeV has been calculated. It has been appreciated radiation resistance of the explored composites.

Keywords: electrons, ionization losses, radiation losses, dielectrics, polymers.

Pavlenko Vyacheslav — Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukov str., Belgorod 308012, Russia), DrSci (Eng), professor, director of the Institute of building materials and technosphere security. Specialist in radiation and space materials. E-mail: kafnx@intbel.ru.

Bondarenko Gennady — National Research University Higher School of Economics, (20 Myasnitskaya str, Moscow, 101000, Russia), DrSci (phys-math), professor, Head of laboratory Radiation solid-state physics. Specialist in radiation solid-state physics and space materials science. E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.

Cherkashina Natalia — Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov(46 Kostyukov str., Belgorod 308012, Russia), Ph.D. Specialist in the field of space materials. E-mail: natalipv13@mail.ru.