

УДК 539.1.01...04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА GEANT4

Черкашина Н. И.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия (308012, Белгород, ул. Костюкова, 46), e-mail: kafx@mail.ru

Представлены результаты физико-математического моделирования воздействия пучка быстрых электронов с энергиями от 1 до 2 МэВ на высоконаполненные полимерные композиты (ПК) с применением программного комплекса Geant4 с использованием метода Монте-Карло. В качестве мишени для расчета использован ПК на основе ударопрочного полистирола (УПС) и органо-силоксанового наполнителя ксерогеля-метилполисилоксана (КМПС). Содержание наполнителя в композите составляло 60 %. Исходные данные для моделирования: геометрия мишени – цилиндр с радиусом 15 мм и толщиной 10 мм; пучок сечением 20×20 мм с энергией 1.2 МэВ падает на мишень по нормали к поверхности; флюенс пучка 1,2 эл./мм². Эффективный пробег электронов в ПК составил для 1 МэВ – 3,9 мм, для 1,5 МэВ – 6,2 мм, для 2 МэВ – 8,7 мм. Глубина концентрации максимальной накопленной энергии в композите для электронов с энергией в 1 МэВ составляет 1,5 мм, с 1,5 МэВ – 2,7 мм, а с 2 МэВ – 4,6 мм. Благодаря высокой радиационной стойкости разработанных композитов данные материалы могут найти применение в космическом материаловедении в качестве терморегулирующих покрытий.

Ключевые слова: физико-математическое моделирование, электроны, ударопрочный полистирол, ксерогель метилполисилоксана.

MODELING THE IMPACT OF COSMIC RADIATION ON POLYMER COMPOSITES USING THE SOFTWARE SECTOR GEANT4

Cherkashina N. I.

Belgorod Shukhov State Technology University, Belgorod, Russia (308012, Belgorod, street Kostukova, 46), e-mail: kafx@mail.ru

The results of physical-mathematical modeling of the impact of a beam of fast electrons with energies between 1 and 2 MeV in the highly filled polymer composites (PC) with the application software package with Geant4 Monte Carlo method. The target used for the calculation of the PC-based high-impact polystyrene (HIPS) and organo-siloxane xerogel-filler metilpolisiloksana (ILAC). Content of filler in the composite was 60%. Input data for modeling: geometry of the target - a cylinder with a radius of 15 mm and 10 mm thick, the beam cross section 20 × 20 mm with an energy of 1.2 MeV incident on the target normal to the surface of the beam fluence of 1,2 el./mm². Effektivny electron range in the PC up to 1 MeV – 3,9 mm to 1.5 MeV – 6,2 mm to 2 MeV – 8,7 mm. depth of maximum concentration of the stored energy in the composite for the electrons with energy of 1 MeV is 1,5 mm and 1,5 MeV – 2,7 mm, with 2 MeV – 4,6 mm. Due to the high radiation resistance of the developed composites of these materials may find applications in materials science in space as a thermal control coatings.

Key words: physical and mathematical modeling, electrons, high-impact polystyrene, xerogel metilpolisiloksana.

Введение

В космической среде существует множество факторов, оказывающих негативное воздействие на космические аппараты (КА). Одним из наиболее опасных факторов являются электроны радиационных поясов Земли с энергией от 0,1 до 5 МэВ [1]. Их воздействие может привести к возникновению различных обратимых и необратимых эффектов в материалах и элементах оборудования космического аппарата, а в конечном итоге – к их повреждению. Поэтому важной задачей является разработка альтернативных материалов для

терморегулирующих покрытий КА, в том числе и моделирование процессов взаимодействия заряженных частиц – электронов космической среды с материалами.

В последнее время для моделирования взаимодействия ионизирующих излучений со сложными объектами все чаще применяется разработанный в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) для решения различных задач физики высоких энергий пакет компьютерных программ Geant4, основанный на методе Монте-Карло [5].

В данной работе представлены результаты физико-математического моделирования воздействия пучка быстрых электронов различных энергий на полимерные композиты с применением программного комплекса, разработанного автором на базе библиотеки Geant4.

Цель исследования

Изучить возможность применения программного комплекса, разработанного на базе известной библиотеки Geant4, к задачам радиационно-технологического моделирования. Рассмотреть моделирование взаимодействия пучка быстрых электронов на полимерные композиты (ПК) известного химического состава, определить теоретический эффективный пробег электронов различной энергии и глубину максимальной концентрации накопленной энергии внутри композитов.

Материал и методы исследования

В качестве мишени для расчета был предложен ПК на основе ударопрочного полистирола (УПС) и органо-силоксанового наполнителя ксерогеля-метилполисилоксана (КМПС). Элементный состав ПК с 60 % содержанием КМПС представлен в табл. 1. Ранее было исследовано и установлено, что данный состав является оптимальным для использования его в космических условиях [6].

Таблица 1. Элементный состав ПК

Содержание КМПС, % масс.	Содержание в композите, % масс.			
	Si	O	H	C
60	24	17,633	6,750	51,617

Математическое моделирование взаимодействия пучка электронов с ПК проводили с использованием метода Монте-Карло. Для этого автором был разработан специализированный пакет программ на базе известной библиотеки Geant4.

В качестве исходных данных были приняты следующие условия: геометрия мишени – цилиндр с радиусом 15 мм и толщиной 10 мм; пучок сечением 20×20 мм с энергией 1..2 МэВ

падает на мишень по нормали к поверхности; флюенс пучка $1,2 \text{ эл./мм}^2$. Схема взаимного расположения пучка электронов и мишени из ПК представлена на рис. 1.

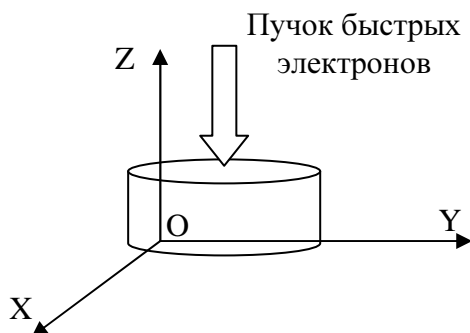


Рис. 1. Схема взаимной ориентации пучка электронов и мишени из ПК

Учитывались следующие процессы взаимодействия пучка электронов с ПК:

- тормозное излучение;
- множественное рассеяние;
- ионизация среды;
- процесс, отвечающий за перемещение частиц в пространстве с учетом влияния магнитного поля.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 показаны результаты моделирования прохождения пучка из 500 электронов с энергиями 1, 1,5 и 2 МэВ через ПК толщиной 10 мм (красный цвет – электроны; зеленый цвет – тормозное излучение). На рис. 2 видно, что при своем движении через композит электроны сильно рассеиваются, их траектория становится настолько сложной, что напоминает процесс диффузии частиц в веществе.

Абсолютная глубина проникновения электронов оказывается намного меньше, чем их пробег внутри композита. Эффективный пробег электронов в ПК составил для 1 МэВ – 3,9 мм, для 1,5 МэВ – 6,2 мм, для 2 МэВ – 8,7 мм. В сравнении с защитными материалами из тяжелых металлов (свинец, висмут) эффективный пробег в ПК в несколько раз больше [7], но вместе с тем значительно уменьшается интенсивность тормозного излучения, что является преимуществом по сравнению с терморегулирующими покрытиями из тяжелых металлов [2].

а)

б)

в)

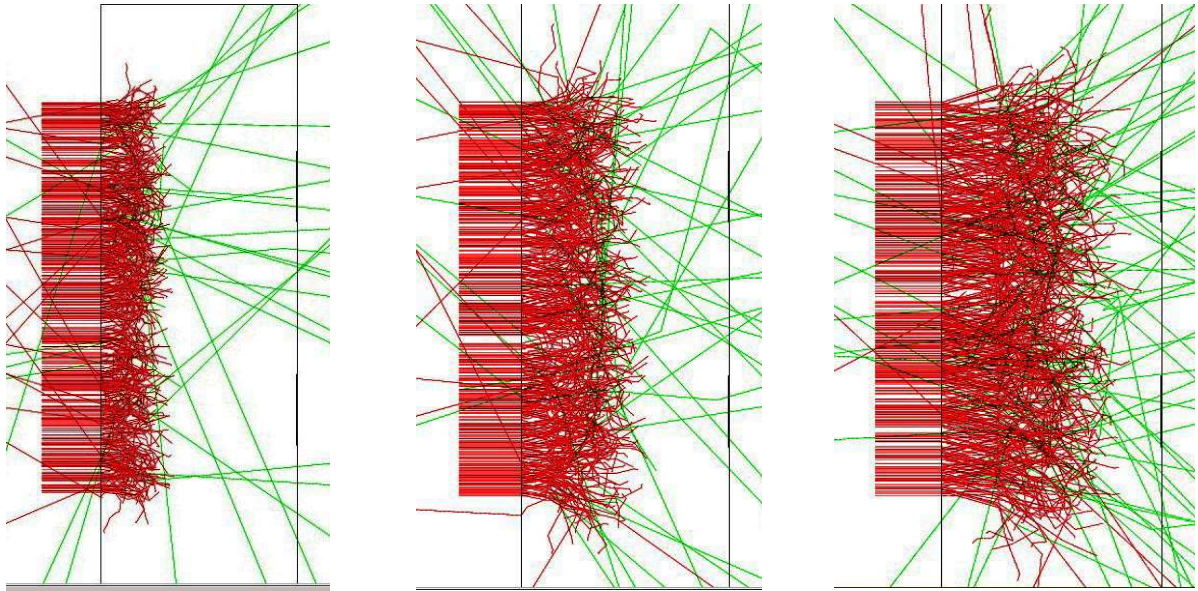


Рис. 2. Моделирование прохождения моноэнергетического пучка электронов через ПК с энергией а – 1 МэВ; б – 1,5 МэВ; в – 2 МэВ

При создании материалов, эксплуатируемых в космических условиях, часто требуется знать с большой точностью пространственное распределение поглощенной дозы в элементах конструкции КА. В данной работе рассмотрено влияние энергии падающего пучка электронов на распределение поглощенной дозы внутри композита.

Для характеристики поглощенной энергии частиц, в том числе и электронов, в среде используется тормозная способность [4]:

$$S(E) = n_0 \sum_n (\varepsilon_n - \varepsilon_0) \cdot \sigma_n, \quad (1)$$

где σ_n – эффективное сечение процесса возбуждения частицей энергетического состояния в среде с энергией ε_n ; ε_0 – энергия основного состояния; n_0 – число атомов в единице объема вещества.

Скорость поглощения энергии в единице массы, т.е. скорость накопления дозы $D(x)$ в точке x определяется как:

$$D(x) = \frac{1}{\rho} \cdot \sum \int d\Omega dE \cdot f(x, E, \Omega) \cdot S(E), \quad (2)$$

где ρ – плотность вещества; $f(x, E, \Omega)$ – функция распределения частиц (в данном случае электронов). Интегрирование здесь проводится по энергии E и телесному углу Ω .

Поскольку функция распределения $f(x, E, \Omega)$ является линейной функцией источников частиц [4], выражение для расчета скорости накопления дозы излучения в точке x можно записать в виде:

$$D(x) = \sum \int dl \int d\Omega dE \cdot R(x, E, \Omega) \cdot \varepsilon(x, E, \Omega), \quad (3)$$

где $\varepsilon(x, E, \Omega)$ – функция распределения падающих частиц (электронов) на защитный материал.

В данной модели учитывалась только накопленная энергия поглощенных электронов и не учитывалось тормозное гамма-излучение. По оси Z композит разбивался на 100 отрезков равной длины (по 0,1 мм). Если частица теряла энергию при прохождении через вещество, то энергию, потерянную частицей на каждом шаге моделирования, записывали в ячейку с номером, соответствующим координате Z данной частицы. Таким способом обрабатывались данные по всем выпущенным частицам. На рис. 3 представлено графическое распределение накопленной энергии электронов по глубине образца, смоделированное с использованием пакета Geant4.

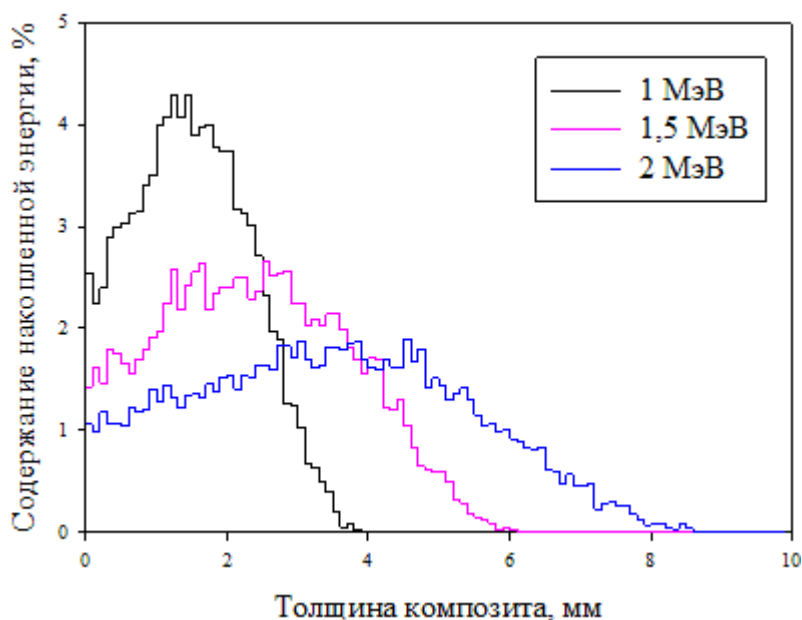


Рис. 3. Распределение переданной частицами энергии по глубине образца

Наблюдается экстремальный характер распределения поглощенной энергии по толщине образца (рис. 3). Для пучка электронов с энергией 2 МэВ полоса максимума уширяется и охватывает более глубинные слои ПК, по сравнению с энергией электронов 1 МэВ. Появление максимума связано с развитием процесса ионизации в массе композита, вызываемого падающими электронами и повышением плотности ионизации среды за счет обратного рассеяния вторичных электронов на больших глубинах. Это приводит к росту поглощенной дозы излучения. Спад на кривой распределения объясняется поглощением и рассеянием электронов. Из рис. 3 следует, что глубина концентрации максимальной накопленной энергии в композите для электронов с энергией в 1 МэВ составляет 1,5 мм, с 1,5 МэВ – 2,7 мм, а с 2 МэВ – 4,6 мм.

Заключение

На сегодняшний день метод Монте-Карло является одним 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 [3].

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 при частичной поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы ГК № 14.740.11.0054.

Список литературы

1. Акишин А. И. Космическое материаловедение: Методическое и учебное пособие. – М: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.
2. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А. А. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчета // Вопросы электромеханики. – Т. 120. – 2011. – С. 37–44.
3. Братченко М. И., Дюльдя С. В. Применение программного комплекса Geant4 к задачам радиационно-технологического моделирования // Вопросы атомной науки и техники. – 2001. – №4. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (80). – С.117-120.
4. Модель космоса. – 8-е изд. – Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. Л. С. Новикова. – М.: Книжный дом Университет, 2007. – 1144 с.
5. Официальный сайт программы Geant4. – URL: <http://geant4.cern.ch/> (дата обращения 23.04.2012).
6. Павленко В. И., Едаменко О. Д., Ястребинский Р. Н. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2011. – №3. – С. 113-116.

7. Павленко В. И., Ястребинский Р. Н., Едаменко О. Д. Воздействие высокоэнергетических пучков быстрых электронов на полимерные радиационно-защитные композиты // Вопросы атомной науки и техники. – 2010. – №1. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (95). – С. 129-134.

Рецензенты:

Савотченко Сергей Евгеньевич, д.ф-м.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий «Белгородского института повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов», г. Белгород.

Красильников Владимир Владимирович, д.ф-м.н., профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий НИУ «Белгородского государственного университета», г. Белгород.