

УДК 539.1.01...04

ОЦЕНКА ЗАЩИТНОГО ЭФФЕКТА И МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛИМЕРНЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИТАХ

Тарасов Д.Г.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород, e-mail: kafnx@mail.ru

В работе представлены результаты физико-математического моделирования воздействия пучка быстрых электронов на полимерный композит с использованием оригинальных программ, разработанных на базе известной библиотеки Geant4, а также проведена оценка защитного эффекта, обусловленного наличием объемного заряда. В качестве мишени использовался полимерный композит с разработанным ранее составом на основе фторопласта, наполненного модифицированным оксидом висмута. Определены теоретический эффективный пробег электронов с энергиями 1–5 МэВ, глубина максимальной концентрации накопленной дозы, коэффициенты отражения и поглощения. За счет полупроводниковых свойств наполнителя не удается достичь многократного снижения мощности дозы за заряженным образцом, а наличие большого количества атомов Bi приводит к уменьшению толщины максимального действия объемного заряда на пучок электронов до 0,55–0,60 R.

Ключевые слова: физико-математическое моделирование, пучок электронов, пробег, накопленная доза, объемный электрический заряд

APPRAISAL OF PROTECTIVE EFFECT AND MODEL OF DISTRIBUTION OF FAST ELECTRONS IN POLYMER RADIATION-PROTECTIVE COMPOSITES

Tarasov D.G.

Belgorod Shukhov State Technology University, Belgorod, e-mail: kafnx@mail.ru

The work presents the results of physical and mathematical modeling of the influence of fast electrons on the polymer composite using original programs elaborated on the base of well-known library Geant4, and the appraisal of protective effect caused by availability of volumetric charge was conduct also. Polymer composite used as a target with the composition elaborated before on the base of fluoroplastic and modified Bismuth oxide. Theoretical effective run of electrons with energy of 1–5 MeV, the depth of maximum concentration of accumulated dose, coefficients of reflection and absorption have defined. It is not succeeded to attain the repeated reduction of dose power for electric model because of semiconductor properties of filler, and the presence of large numbers of atoms Bi leads to decrease of thickness of maximum action of volumetric charge on electrons to 0,55–0,60 R.

Keywords: physical and mathematical modeling, electrons, run, accumulated dose, volumetric electrical charge

Под действием корпускулярных излучений в материалах и элементах космических аппаратов возникают различного рода обратимые и необратимые эффекты, приводящие к нарушению нормального функционирования их бортовых систем, за счет чего срок активной службы составляет ~7–10 лет [1]. Наибольшую опасность в спектре космического корпускулярного излучения в аппаратах с тонкостенной защитой представляют электроны с энергиями от 0,5 до 7 МэВ, а также протоны и альфа-частицы с энергиями от 1 до 30 МэВ [1–3].

Ранее нами проводились работы по созданию и изучению радиационно-защитных полимерных композитов (ПК) на основе полистирола и металлоолигомерного наполнителя [4, 5]. В данной статье представлены результаты испытаний композита на основе фторопластовой матрицы и модифицированного трехвалентного оксида висмута (МОВ) [6].

Цель исследования – провести и рассмотреть моделирование взаимодействия пучка быстрых электронов на полимерный композит (ПК) известного химического со-

става с применением программного комплекса, разработанного на базе известной библиотеки Geant4, определить теоретический эффективный пробег электронов различной энергии и глубину максимальной концентрации накопленной энергии внутри композитов, оценить коэффициенты отражения и поглощения. Провести теоретическую и экспериментальную оценку защитного эффекта, обусловленного наличием внедренного объемного заряда в композите.

Материалы и методы исследования

Элементарный состав и плотность исследуемого композита приведены в табл. 1.

Таблица 1
Элементарный состав и плотность разработанного полимерного композита

Содержание наполнителя, мас. %	Атомный состав, % мас.				Плотность ρ , г/см ³
	C	F	Bi	O	
60	9,608	30,392	53,820	6,180	4,420

Образцы ПК были изготовлены в форме дисков диаметром 30 мм и толщиной, которая выбиралась,

исходя из решения задачи определения защитных свойств ПК от пучков моноэнергетических электронов. Они устанавливались на пути электронного пучка, падающего по нормали на плоскую поверхность диска. За облучаемым образцом вплотную к его внешней поверхности закрепляли дозиметр, который был экранирован от попадания электронов, рассеянных в конструкции ускорителя. Чувствительным элементом дозиметра служил алмазный детектор, представляющий собой пластину площадью $0,25 \text{ см}^2$ и толщиной 300 мкм с напылением на плоской поверхности диска запирающим и инжектирующим контактами.

Математическое моделирование взаимодействия пучка электронов с дисками ПК проводилось с помощью метода Монте-Карло. Для этого использовался пакет оригинальных программ, разработанных на базе известной библиотеки «GEANT4».

В качестве исходных данных были приняты следующие условия: геометрия мишени – цилиндр с диаметром 30 мм и толщиной 6 мм ; пучок сечением $20 \times 20 \text{ мм}$ с энергией $1\text{--}5 \text{ МэВ}$ падает на мишень по нормали к поверхности; флюенс пучка $1,2 \text{ эл./мм}^2$.

В расчетах учитывались следующие процессы взаимодействия пучка электронов с ПК: множественное рассеяние; ионизация среды; процесс, отвечаю-

щий за перемещение частиц в пространстве с учетом влияния магнитного поля.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены графические результаты распределения дозы $D(R)$ по глубине ПК для электронного пучка с $E = 1\text{--}5 \text{ МэВ}$, смоделированные с использованием пакета Geant4. Наблюдается экстремальный характер распределения поглощенной дозы по толщине образца. Для пучка электронов с энергией $2\text{--}5 \text{ МэВ}$ полоса максимума уширяется и охватывает более глубокие слои ПК. Появление выраженного 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. Спад на кривой распределения объясняется поглощением и рассеянием электронов.

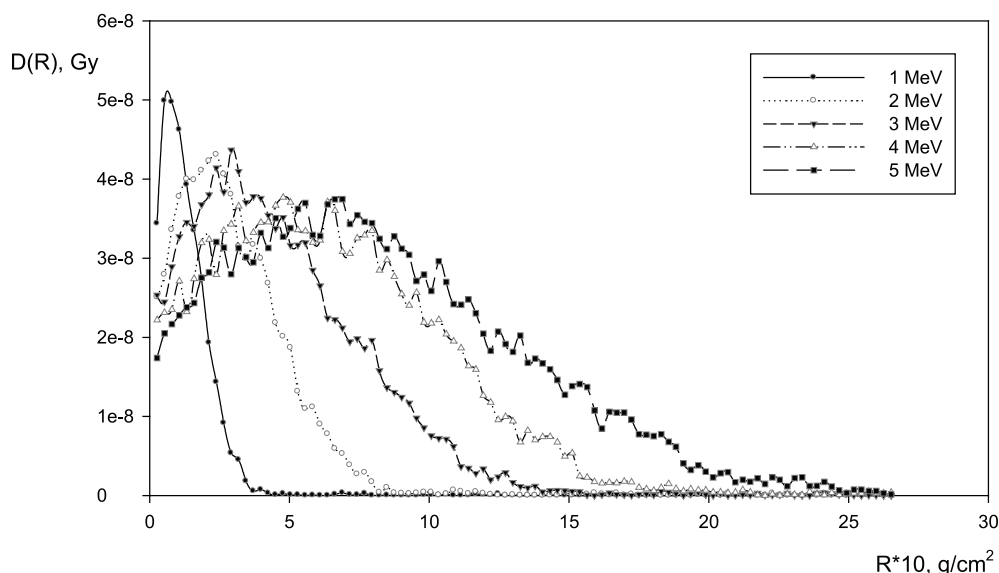


Рис. 1. Расчетное распределение поглощенной дозы $D(R)$ по глубине

По результатам расчетов (табл. 2), в достаточно широком энергетическом спектре, $71\text{--}88\%$ частиц приходится на поглощение в материале, причем с возрастанием энергии электронов эффект отражения уменьшается. Для электронов с $E > 3 \text{ МэВ}$ глубина концентрации максимальной дозы заметно увеличивается. При энергии 1 МэВ коэффициент отражения по энергии выше, чем по частицам, а для больших энергий это соотношение меняется в обратную сторону. Вероятно, это связано с преобладанием неупругого взаимодействия электронов с атомами вещества, а также частичной потерей энергии в поверхностных слоях и вы-

летом за пределы образца за счет обратного рассеяния.

Прохождение электронов через слой вещества в присутствии электрического поля рассчитано с использованием численного метода, описанного в работе [8]. На рис. 2 показаны зависимости отношения D/D_0 от напряженности электрического поля E_0 , где мощность дозы за образцом D отнесена к начальной мощности поглощенной дозы D_0 за слоем с относительной толщиной d/R (d – толщина образца, R – расчетный ионизационный пробег с заданной энергией). Влияние электрического поля начинает сказываться при толщине более $0,1 d/R$ и достигает своего

минимума при $d = 0,6R$. В отличие от [7] минимум кривой смещен в сторону малых толщин, а также достаточно широк, что связано

с увеличением влияния обратного рассеяния электронов за счет большого эффективного атомного радиуса V_i .

Таблица 2

Расчетные параметры распределения электронов в слоях полимерного композита

Энергия электронов, МэВ	Эффективный пробег электронов, мм	Глубина концентрации максимальной дозы, мм	Коэффициенты			
			отражения		поглощения	
			по энергии	по частицам	по энергии	по частицам
1	1,20	0,24	0,312	0,287	0,688	0,713
2	2,76	0,54	0,171	0,225	0,829	0,775
3	3,54	0,66	0,119	0,193	0,881	0,807
4	4,92	1,08	0,066	0,129	0,934	0,871
5	5,86	1,56	0,056	0,119	0,944	0,881

С увеличением напряженности электрического поля (E) на внутренней стороне поверхности образца ПК защитный эффект заряженного диэлектрика выражается сильнее. Согласно [7] подобный эффект связан как с сокращением пробега электронов, так и со спадом коэффициента прохождения электрона в веществе, вызванным торможением и отклонением частиц в тормозящем электрическом поле в поверхностных слоях диэлектрика.

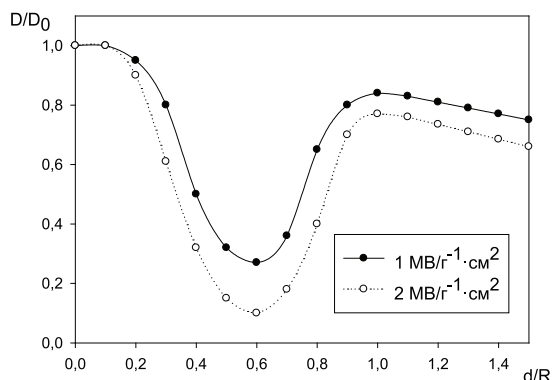


Рис. 2. Зависимость поглощенной дозы пучка быстрых электронов ($E = 2$ МэВ) от толщины слоя и напряженности поля ($\text{МВ}/\text{г} \cdot \text{см}^2$)

При непрерывном облучении ПК пучком быстрых электронов с $E = 2$ МэВ наблюдался постепенный спад мощности дозы до достижения некоторого минимального значения. За образцом толщиной $0,2R$ (рис. 3, кривая 1) мощность дозы снижается на несколько процентов и практически не изменяется уже через 100 с с начала облучения. Экспериментально подтверждено наибольшее снижение дозы, обусловленное накопленным объемным зарядом, при толщине ПК $0,5-0,6d/R$ (рис. 3, кривая 3), которое достигает 40% от первоначальной величины. В [7] говорится о снижении дозы до нескольких десятых долей, за образцом

заряжающихся стекол. В экспериментах с разработанным ПК наблюдается слабый минимум, что возможно связано с полупроводниковыми свойствами наполнителя. За счет него происходит перераспределение объемного заряда по объему образца и снижение напряженности поля, что и приводит к столь малому защитному эффекту.

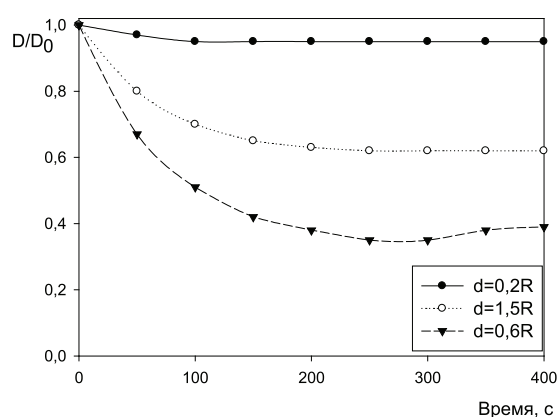


Рис. 3. Кинетика изменения мощности дозы электронного излучения ($E = 2$ МэВ) на внешней поверхности композита разной толщины

При облучении образцов, толщина которых превышала ионизационный пробег электронов ($1,5R$), измерялась мощность дозы тормозного излучения. В результате было получено снижение мощности дозы на 38%.

Доза тормозного излучения за образцом ПК снижается из-за уменьшения выхода генерации тормозного излучения в первых слоях диэлектрика, поглотивших электроны и дающих наибольший вклад в поглощенную дозу D . Следовательно, снижение D в более глубоких слоях ПК будет тем сильнее, чем быстрее уменьшается энергия электрона в поверхностных облучаемых слоях. Защитная роль глубоких слоев ПК

состоит в подавлении тормозного излучения за счет высокой концентрации атомов висмута (54%) и плотности ПК (4420 кг/м³).

Заклучение

По результатам проведенных расчетов, 71–88% частиц приходится на поглощение в материале, и с увеличением энергии падающих электронов альбеда уменьшается. При энергиях выше 1 МэВ возрастают процессы неупругого взаимодействия электронов с атомами вещества, за счет чего альбеда по энергии становится меньше, чем по частицам. Также наблюдается экстремальный характер накопления дозы по глубине, и с увеличением энергии электронов полуса максимума уширяется.

Оценка защитного эффекта в полимерном композите от воздействия пучка быстрых электронов обусловлена накоплением объемного электрического заряда в композите, а мощность накопленной дозы на внешней поверхности композита зависит от его относительной толщины (по отношению к расчетному ионизационному пробегу (R) электронов с заданной энергией). Электрическое поле объемного заряда, нарастающее во времени при электронном облучении полимерного композита, резко снижает мощность поглощенной дозы за образцом, включая тормозное излучение.

За счет полупроводниковых свойств наполнителя не удается достичь многократного снижения мощности дозы за заряженным образцом, а наличие большого количества атомов Вi приводит к уменьшению толщины максимального действия объемного заряда на пучок электронов до 0,55–0,60R.

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. – С. 209.
2. Арбузов В.И. Основы радиационного оптического материаловедения: учебное пособие. – СПб.: СПбГУИТМО, 2008. – С. 284
3. Модель космоса. – Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов; под ред. Л.С. Новикова. – 8-е изд. – М.: Изд-во «Книжный дом Университет», 2007. – 1144 с.
4. Воздействие высокоэнергетических пучков быстрых электронов на полимерные радиационно-защитные композиты / В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, О.Д. Едаменко, Д.Г. Тарасов // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). – 2010. – №1. – С. 129–134.
5. Высокодисперсные органосилоксановые наполнители полимерных матриц / В.И. Павленко, А.В. Ястребинская, З.В. Павленко, Р.Н. Ястребинский // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2010. – № 2. – С. 99–103.

6. Синтез радиационно-защитного наполнителя на основе модифицированного оксида висмута / Д.Г. Тарасов, П.В. Матюхин, Ю.М. Бондаренко и др. // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы III Всероссийской научно-инновационной молодежной конференции. – Тамбов, 31 октября – 2 ноября 2011.

7. Цетлин В.В. Взаимодействие электронов со стеклообразными диэлектриками применительно к проблеме радиационной защиты космических аппаратов: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – М., 1998. – 49 с.

8. Цетлин В.В., Шуршаков В.А., Метлицкая З.Ю. Прохождение быстрых электронов в веществе в присутствии внутреннего электрического поля. Деп. рук. №985-В90, ВИНТИ. –1990.

References

1. Akishin A.I. *Kosmicheskoe materialovedenie. Metodicheskoe i uchebnoe posobie* (Space Materials. Methodology and study guide). Moscow: RINP MSU, 2007. p. 209.
2. Arbuzov V.I. *Osnovy radiacionnogo opticheskogo materialovedeniya. Uchebnoe posobie* (Fundamentals of optical radiation materials science. Study guide). St. Petersburg: SPb-GUITMO, 2008. p. 284.
3. *Model' kosmosa, 8-e izdanie, t.2: Vozdejstvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov* (Model of the cosmos, 8th edition, vol.2: The impact of space environment on materials and equipment of spacecraft). Edited by: L.S. Novikov, Moscow Publishing House of the «University Book House», 2007. 1144 p.
4. Pavlenko V.I., Jastrebinskiy R.N., Edamenko O.D., Tarasov D.G. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2010. no. 1. pp. 129–134.
5. Pavlenko V.I., Jastrebinskaya A.V., Pavlenko Z.V., Jastrebinskiy R.N. *News of higher educational institutions. North-Caucasian region. Series: Engineering*. 2010. no. 2. pp. 99–103.
6. Tarasov D.G., Matjuhin P.V., Bondarenko Y.M., Strekozova M.P. *Materialy III Vserossiyskoj nauchno-innovacionnoj molodezhnoj konferencii «Sovremennye tverdogfaznye tehnologii: teorija, praktika i innovacionnyj menedzhment»* (Proceedings of the III All-Russian Youth Innovation Conference «Modern solid-state technology: theory, practice and innovation management»), Tambov, October 31 – November 2, 2011.
7. Cetlin V.V. *Vzaimodejstvie jelektronov so stekloobraznyimi dijelektrikami primenitel'no k probleme radiacionnoj zavity kosmicheskikh apparatov* (The interaction of electrons with a glassy dielectrics applied to the problem of radiation protection of space vehicles): Abstract. thesis. Doctor. Technical. Sciences. Moscow, 1998. 49 p.
8. Cetlin V.V., Shurshakov V.A., Metlickaya Z.Y. *Prohozhdenie bystrykh jelektronov v vewestve v prisutstvii vnutrennego jelektricheskogo polja* (Passage of fast electrons in matter, in the presence of internal electric field). Dep. manuscript. №985–В90, VINITI. 1990.

Рецензенты:

Саботченко С.Е., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий Белгородского института повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов, г. Белгород;

Красильников В.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий НИУ «Белгородский государственный университет», г. Белгород.

Работа поступила в редакцию 05.06.2012.