

# ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Соколенко И. В., аспирант,  
Ястребинский Р. Н., канд. ф.-м. наук, доц.,  
Крайний А. А., аспирант  
Матюхин П. В., канд. техн. наук, доц.,  
Тарасов Д. Г., инж.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЫСОКОНАПОЛНЕННОМ ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТЕ\*

yrndo@mail.ru

С помощью физико-математического моделирования с использованием пакетов программ, основанных на имитационном методе Монте-Карло, рассчитаны коэффициенты поглощения и отражения электронного пучка ( $E_e=1-5$  МэВ), параметры распределения электронов в слоях, а также изменение средней энергии тормозного излучения от электронов с  $E=1-5$  МэВ.

**Ключевые слова:** полимерный композит, поглощенная доза, электроны, коэффициенты отражения, коэффициенты поглощения.

При функционировании космических аппаратов (КА) в радиационных поясах Земли, в частности на геостационарной орбите, материалы, расположенные на внешней поверхности, подвергаются воздействию потоков электронов и протонов с широким энергетическим спектром. Воздействие ионизирующего космического излучения на материалы КА оказывает негативное влияние на их функциональные свойства, особенно это касается полимерных материалов [1–3], тем самым уменьшая срок активного существования КА.

В данной работе представлено моделирование процессов воздействия электронного (1-5 МэВ) облучения на полимерный композит в условия космического пространства. Для моделирования прохождения электронного излучения через композиты были составлены пакеты программ на базе известной библиотеки «GEANT4» [4]. При реализации программ был использован имитационный метод Монте-Карло, который является наиболее подходящим методом для изучения процесса переноса излучения через вещество.

В «GEANT4» для каждой моделируемой частицы должны подключаться физические процессы, которые должны с ней происходить. Исходя из того, что основные потери электронов в веществе обусловлены возбуждением и ионизацией атомов среды в результате электромагнитного взаимодействия с электронами атомов (ионизационные потери) и генерацией тормозного электромагнитного излучения (радиационные потери), а также упругим рассеянием на яд-

рах атомов за счет кулоновского взаимодействия, подключаемыми физическими процессами были:

- тормозное излучение;
- множественное рассеяние;
- ионизация среды.

Элементарный состав композита, необходимый для моделирования, приведен в табл. 1 [5].

Таблица 1

Элементарный состав полимерного композита (ПК)

Содержание наполнителя, мас. %	Атомный состав, %мас.			
	C	F	Bi	O
60	9,608	30,392	53,820	6,180

При выборе наиболее приемлемых параметров облучения необходимо определить распределение поля поглощенных доз в плоскости поперечного сечения защитного экрана.

На рис. 1 представлены графические результаты распределения дозы  $D(R)$  по глубине ПК выбранного состава для электронного пучка с  $E=1-5$  МэВ, смоделированные с использованием пакета Geant4, число разыгрываемых частиц -  $10^3$ .

Наблюдается экстремальный характер распределения поглощенной дозы по толщине образца. Для пучка электронов с энергией 2-5 МэВ полоса максимума уширяется и охватывает более глубокие слои ПК. Данное явление характерно только при взаимодействии электронов с полимерным композитом, при взаимодействии протонного излучения с веществом экстремум

наблюдается в конце прохождения протонов через композит (пигБрегга) [6].

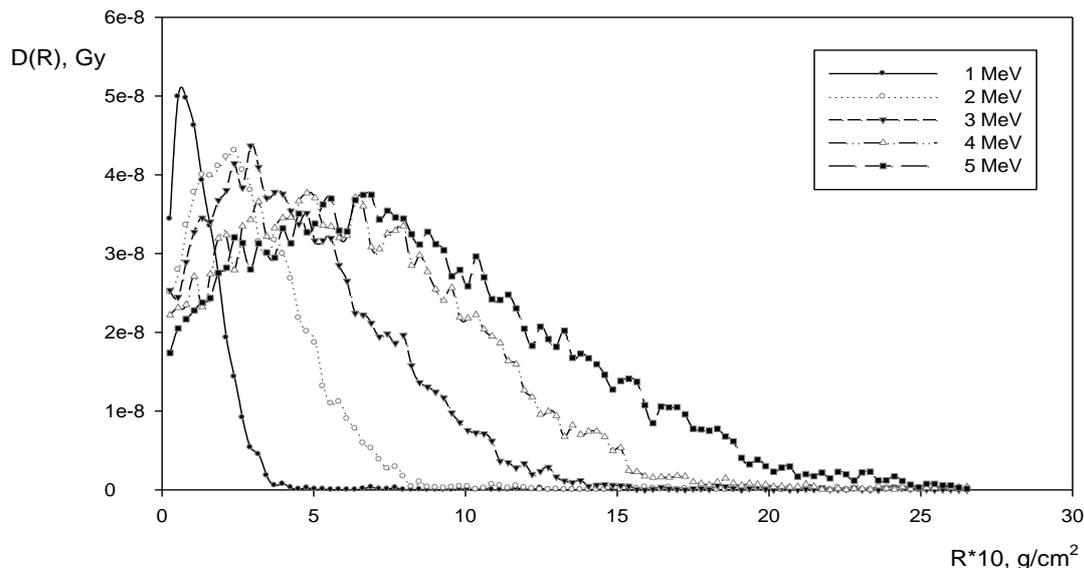


Рис. 1. Расчетное распределение поглощенной дозы D(R) по глубине

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.

Результаты расчетов (табл. 2) показали, что в достаточно широком энергетическом спектре 71-88% частиц приходится на поглощение в материале, причем с возрастанием энергии элект-

тронов эффект отражения уменьшается. Для электронов с E>3 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 электрона с атомами вещества, а также частичной потерей энергии в поверхностных слоях и вылетом за пределы образца за счет обратного рассеяния.

Таблица 2

**Расчетные параметры распределения электронов в слоях ПК**

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

Некоторое представление о распределении пучка электронов с энергией E= 1-5 МэВ и числом частиц - 500 в глубине материала ПК приведено на рис. 2 (черный цвет – электроны, серый цвет – тормозное излучение).

Как видно из рис. 2, при своем движении через вещество электроны сильно рассеиваются, их траектория становится настолько сложной, что напоминает процесс диффузии частиц в веществе. Глубина, на которую электроны проникают в материал, оказывается намного меньше, чем полный путь до торможения, определяемый ионизационными и отчасти радиационными потерями. С увеличением энергии электронного пучка заметным становится и интенсивное тор-

мозное излучение (увеличивается вклад радиационных потерь энергии), что может быть описано следующим соотношением [7]:

$$\frac{\left(\frac{dE}{dX}\right)_{рад.}}{\left(\frac{dE}{dX}\right)_{ион.}} \approx \frac{ZE}{800}, \tag{1}$$

где E – энергия электронов, МэВ; Z – атомный номер вещества.

На орбитах КА, где имеются высокие потоки энергичных электронов, поглощенная доза радиации внутри КА в основном определяется не электронами, а их излучением [9]. В связи с этим необходимо изучить изменение средней энергии и спектрального распределения тормоз-

ного рентгеновского излучения (рис. 3 и рис. 4), генерируемого в исследуемом ПК пучком электронов с энергиями 1-5 МэВ, число частиц  $10^5$ . Для повышения сравнимости результатов тол-

щина моделируемого образца выбиралась, исходя из эффективного пробега электронов, и составляла  $1,05R$  ( $R$  – эффективный пробег электронов).

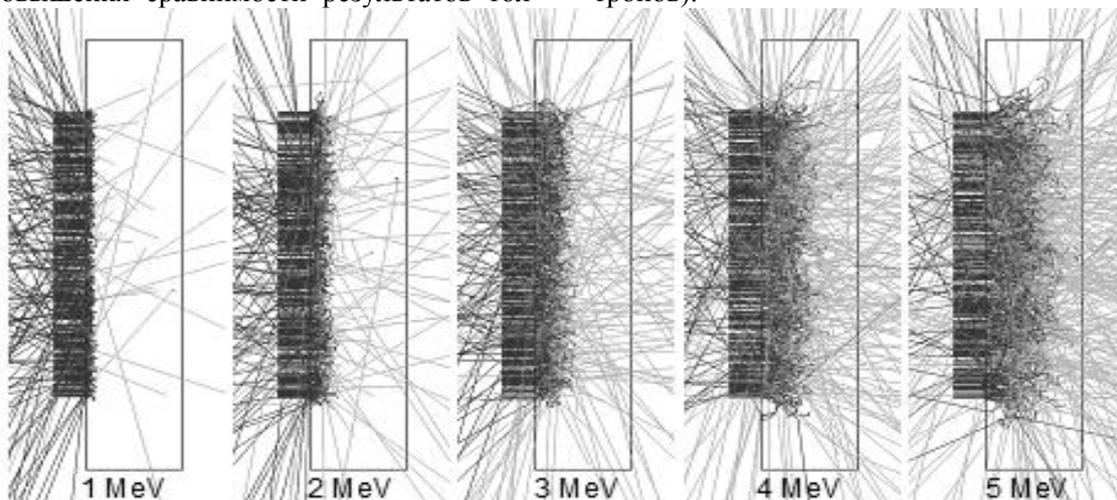


Рис. 2. Расчетное распределение электронов в композите

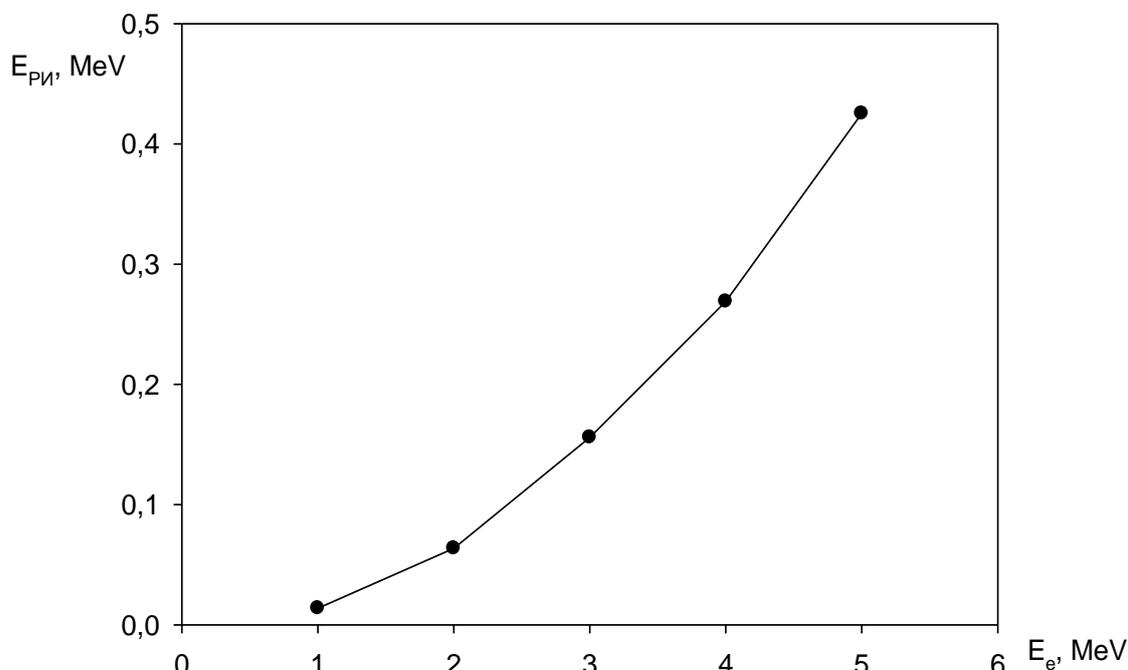


Рис. 3. Изменение средней энергии тормозного излучения  $E_{\text{ри}}$  от электронов с  $E=1-5$  МэВ

Зависимость средней энергии тормозного рентгеновского излучения от энергии падающих электронов носит параболический характер. Известно, что полная излучаемая на единице пути энергия пропорциональна энергии падающего электрона, поэтому имеющиеся на представленной зависимости отклонения от линейности (рис. 3) можно отнести к изменению углового распределения тормозного излучения, т.е. излучению фотонов по направлению движения падающих электронов с увеличением их энергии. В данной модели детектор регистрировал только фотоны, вышедшие за образец с необлучаемой стороны.

Как показало моделирование, с ростом энергии падающих электронов растет интенсивность тормозного излучения (рис. 4), причем энергия максимальной интенсивности изменяется незначительно, и это изменение в приближении имеет линейную зависимость. Характер кривых при различных энергиях электронов сохраняется.

Необходимо отметить, что при моделировании не учитывалось объемное заряджение ПК, за счет которого будет экранироваться часть налетающих электронов, и уменьшаться выход тормозного рентгеновского излучения [9].

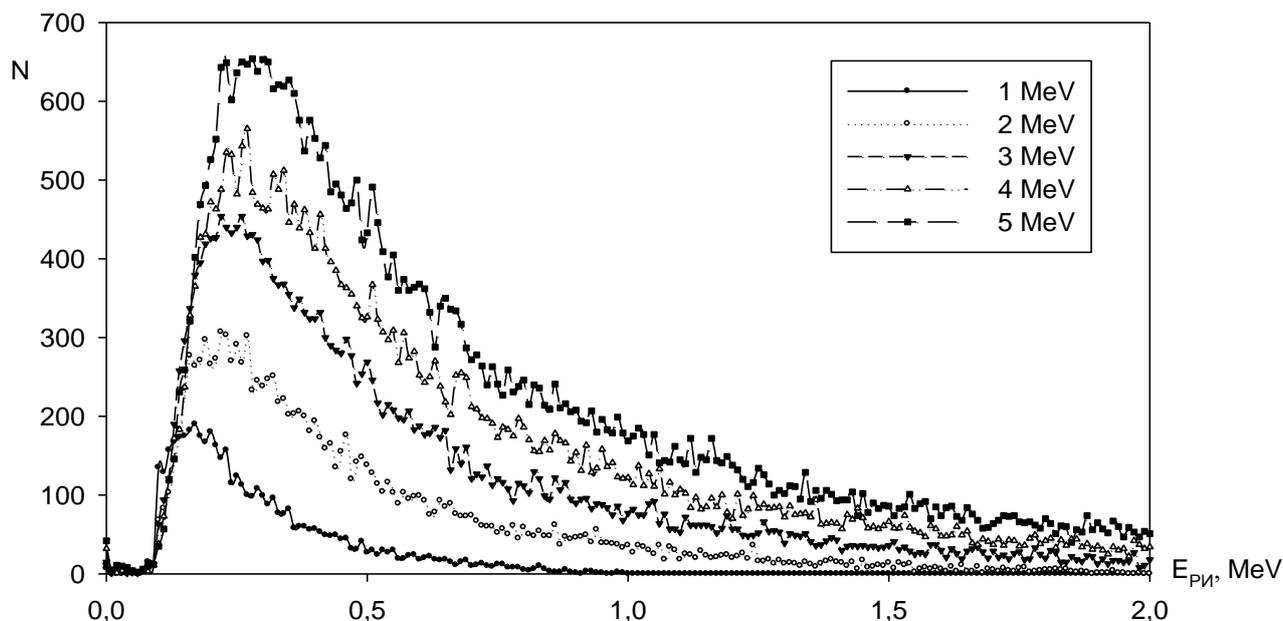


Рис. 4. Спектральное распределение тормозного излучения от электронов

*\*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.132.21.1577, № 14.В37.21.0415.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Черкашина Н.И. Моделирование воздействия космического излучения на полимерные композиты с применением программного комплекса GEANT4 // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3; URL: <http://www.science-education.ru/103-6223>.

5. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Черкашина Н.И. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы // Вестник Белгородского государственного технологического уни-

верситета им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 113–116.

6. Павленко В.И., Акишин А.И., Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Тарасов Д.Г., Черкашина Н.И. Явления электризации диэлектрического полимерного композита под действием потока высокоэнергетических протонов // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. т. 12, № 4(3). С. 677 – 681.

7. Черняев А.П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / А.П. Черняев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 152 с.

8. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчета // Вопросы электромеханики. 2011. Т.120. С. 37–44.

9. Цетлин В.В., Павлушкина Т.К., Редько В.И. Снижение мощности дозы электронного излучения за слоями заряжающихся диэлектриков // Атомная Энергия. 1993. Т. 74, вып. 2. С. 163–165.