

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СРЕДНЕГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ ЭНЕРГИЙ ДО 10 МэВ В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТЕ

*В.И. Павленко<sup>1</sup>, Н.И. Черкашина<sup>1</sup>, А.В. Носков<sup>2</sup>, Р.Н. Ястребинский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия;*

<sup>2</sup>*Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия*

*E-mail: natalipv13@mail.ru*

Представлены расчеты среднего линейного и массового пробегов электрона в полимерном композите. Исследуемый полимерный композит получен на основе ударопрочного полистирола (матрица) и кремнегеля метилполисилоксана (наполнитель). Содержание наполнителя в матрице варьируется от 0 до 60 мас.%. Расчет представлен для широкого диапазона энергии электронов 0...10 МэВ. Установлено, что наибольший средний линейный пробег электронов во всем диапазоне энергий у полистирола без наполнителя. Проанализированы коэффициенты пропускания электронов, падающих на исследуемый полимерный композиционный материал под некоторым углом к нормали его поверхности и прошедших слой вещества  $x$  по числу частиц и энергии. С увеличением угла падения значительно снижается коэффициент пропускания числа электронов на исследуемый полимерный композиционный материал. Показано, что максимальное число отраженных электронов движется в направлении, обратном направлению движения первичного электронного пучка, причем их число уменьшается до нуля по мере того, как угол падения электронов возрастает до 90°.

## ВВЕДЕНИЕ

Таблица 1

Известно, что одним из важнейших внешних факторов, который ухудшает функциональные свойства элементов и приборов космического аппарата, является корпускулярная радиация космического пространства, причем, частицы высоких энергий, проникающие за защитные корпуса космического аппарата, являются источником нарушения объемных свойств материалов и отказов бортового оборудования [1, 2].

Основными источниками радиационного воздействия в космосе являются: космические лучи (частицы высоких энергий); солнечное космическое излучение; солнечное рентгеновское излучение с длинами волн в интервале 1...10 нм; вакуумное УФ-излучение (энергия 6...125 эВ); радиационные пояса [3, 4]. Основной вклад в радиационные условия на геостационарной орбите дают электроны естественных радиационных поясов Земли и их тормозное излучение, а также потоки частиц солнечных и галактических космических лучей.

В настоящей работе приведены результаты физико-математического моделирования взаимодействия электронного излучения с разработанным полимерным композитом на основе полистирола и органосилоксанового наполнителя.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемый полимерный композит получен на основе ударопрочного полистирола (матрица) и кремнегеля метилполисилоксана (наполнитель). Содержание наполнителя в матрице варьировалось от 0 до 60 мас.%. Элементный химический состав рассматриваемых композитов и значения их плотности приведены в табл. 1.

Элементный химический состав композитов

Содержание наполнителя, мас. %	Содержание в композите, мас. %			
	Si	O	H	C
100	40	29,3	6,1	24,6
60	24	17,633	6,750	51,617
30	12	8,816	7,224	71,96
0	–	–	7,69	92,31

В табл. 2 показаны данные по физико-механическим характеристикам исследуемого композита, полученные ультразвуковым методом.

Таблица 2

Характеристики исследуемого композита, полученные ультразвуковым методом

Содержание наполнителя, мас. %	Параметр		
	Скорость звука, м/с	Модуль продольной упругости E, ГПа	Удельное акустическое сопротивление $Z \cdot 10^{-2}$ , (МПа·с)/м
100	1433,3	2,27	1,584
60	2038,6	4,85	2,379
30	2115,9	5,01	2,368
0	2197,6	5,10	2,321

## РАСЧЕТ СРЕДНЕГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТЕ

Пробег электронов в композите зависит от начальной кинетической энергии электронов и тормозной способности химических элементов, входящих в состав композита.

Из-за малой массы электроны при столкновении с атомными электронами и ядрами значительно

отклоняются от первоначальной траектории движения и движутся по извилистой траектории. При вхождении быстрого электрона в исследуемый композит в начале движения рассеяния на большие углы маловероятны. Однако с уменьшением энергии вероятность рассеяния на большие углы увеличивается. Средний угол отклонения от прямолинейного положения возрастает. Затем электрон теряет первоначальное направление, и его движение можно рассматривать как диффузию в веществе.

Поэтому для электронов вводится понятие «средний линейный пробег», который определяется как минимальная толщина слоя вещества, в котором задерживаются все электроны, измеряемая в направлении исходящей скорости пучка и соответствующей полному поглощению электронов. Средний линейный пробег рассчитывали с учетом тормозной способности электрона  $\left(-\frac{dE}{dx}\right)$  по формуле

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE_k}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)} . \quad (1)$$

На рис. 1 и 2 представлены кривые зависимости среднего линейного пробега электрона в рассматриваемом композите в зависимости от его энергии. На рис. 1 энергия электрона изменяется от 0 до 1 МэВ, измерения проведены с интервалом в 0,2 МэВ. На рис. 2 охвачен более широкий диапазон энергий – до 10 МэВ, а измерения проведены с интервалом в 2 МэВ. Из этих рисунков видно, что наибольший средний линейный пробег во всем диапазоне энергий у полистирола без наполнителя. Однако кривые находятся достаточно близко 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%).

Средний массовый пробег в композите находили как произведение среднего линейного пробега на плотность соответствующего композита:

$$R_m(E_0) = R(E_0) \cdot \rho . \quad (2)$$

Значения среднего массового пробега электрона в исследуемом композите приведены в табл. 3. Начальная кинетическая энергия электрона варьировалась до 10 МэВ. Наибольший массовый пробег электрона наблюдается в композите без содержания наполнителя, наименьший – в чистом наполнителе.

Видно, что в полученном композите средний путь электрона достаточно мал в широком диапазоне начальных энергий электрона, что говорит о перспективе его использования для защиты от воздействия электронов в космическом пространстве.

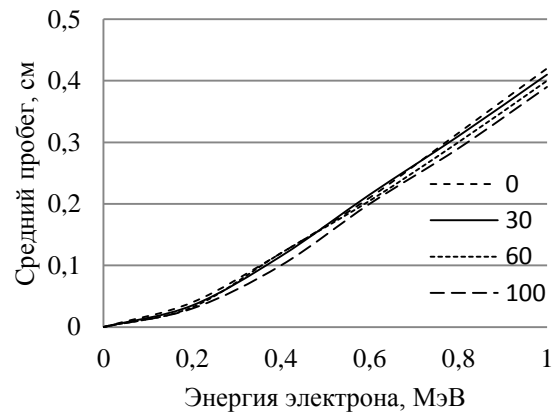


Рис. 1. Кривые зависимости среднего линейного пробега электрона в рассматриваемом композите в зависимости от его энергии (от 0 до 1 МэВ) при содержании наполнителя 0, 30, 60 и 100 %

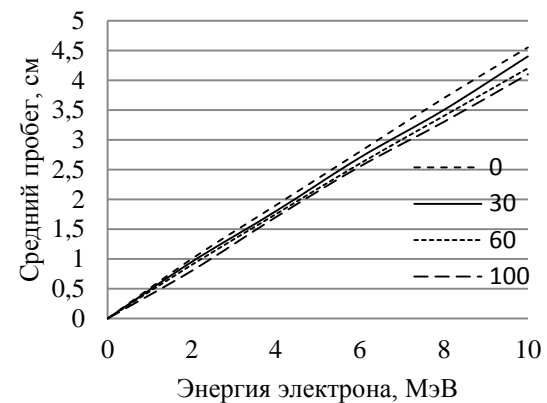


Рис. 2. Кривые зависимости среднего линейного пробега электрона в рассматриваемом композите в зависимости от его энергии (от 0 до 10 МэВ) при содержании наполнителя 0; 30; 60 и 100%

Таблица 3

Значения среднего массового пробега электрона в исследуемом композите в зависимости от начальной кинетической энергии электрона и содержания наполнителя

Энергия электрона, МэВ	Средний массовый пробег в композите, г/см <sup>2</sup>			
	Содержание наполнителя, мас. %			
	0	30	60	100
0	0	0	0	0
2	1,19	1,101	0,994	0,845
4	2,261	2,086	1,933	1,795
6	3,332	3,129	2,873	2,693
8	4,403	4,056	3,757	3,485
10	5,414	5,099	4,641	4,329

### КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРОПУСКАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

В космическом пространстве электроны движутся не в одном направлении, а в различных. Соответственно для одного и того же элемента космического корабля электроны будут проходить под разными углами, часто меняя свою траекторию падения. Поэтому были исследованы коэффициенты пропускания электронов разработанным

полимерным композитом при различном угле падения излучения.

Коэффициенты пропускания электронов, падающих на исследуемый полимерный композиционный материал под некоторым углом к нормали его поверхности и прошедших слой вещества  $x$ , находятся по формулам [5–7]:

– по числу частиц

$$T_N(x) = \frac{N(x)}{N_0}, \quad (3)$$

– по энергии

$$T_{E_k}(x) = \frac{E(x)}{N_0 E_0}, \quad (4)$$

$N_0$  и  $E_0$  – число падающих электронов и их кинетическая энергия. В работе статистическим методом Монте-Карло смоделирован процесс пропускания электронов через разработанный полимерный композит.

Так как средний линейный пробег электрона в рассматриваемом композите при различном содержании наполнителя практически не отличается, то можно сделать вывод, что при данном химическом составе наполнителя его содержание не влияет на взаимодействие электронного излучения с композитом. Поэтому коэффициенты пропускания электронов разработанным полимерным композитом при различном угле падения излучения можно рассмотреть на примере чистого полистирола без наполнителя.

На рис. 3 приведена схема эксперимента по моделированию коэффициентов пропускания электронов через исследуемый полимерный композиционный материал ( $\varphi$  – угол между нормалью поверхности композита и электронным излучением,  $x$  – толщина слоя исследуемого композита).

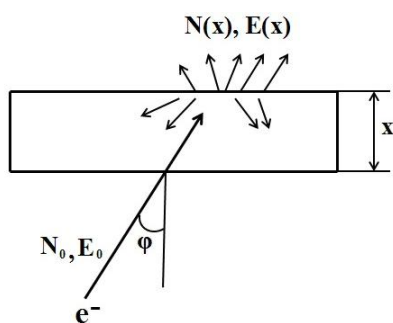


Рис. 3. Схема эксперимента по моделированию коэффициентов пропускания электронов через исследуемый полимерный композиционный материал

На рис. 3 изображена кривая зависимости коэффициента пропускания числа электронов при разных углах падения ( $0$ ,  $45$  и  $80^\circ$ ) от толщины исследуемого материала – чистого полистирола. Начальная энергия электронов фиксирована и составляет  $1$  МэВ.

Анализ кривых на рис. 3 показывает, что с увеличением угла падения значительно снижается

коэффициент пропускания числа электронов на исследуемый полимерный композиционный материал.

Эта закономерность объясняется тем, что с уменьшением угла  $\varphi$  уменьшается размер области взаимодействия, так как тенденция электронов к рассеянию в направлении движения заставляет их распространяться ближе к поверхности, и вероятность процесса отражения увеличивается.

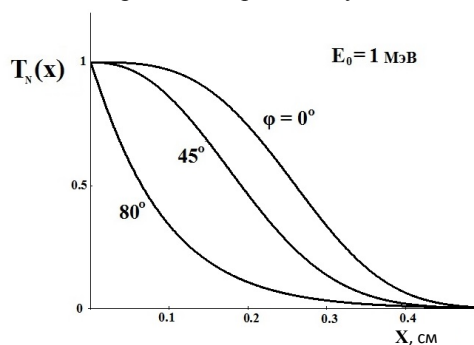


Рис. 4. Коэффициент пропускания числа электронов при разных углах падения в зависимости от толщины композита ( $E=1$  МэВ)

Угловое распределение отраженных электронов сильно зависит от угла наклона композита. При нормальном падении пучка электронов угловое распределение отраженных электронов близко к косинусоидальному (закон Ламберта).

Из рис. 4 видно, что максимальное число отраженных электронов движется в направлении, обратном направлению движения первичного электронного пучка, причем их число уменьшается до нуля по мере того, как  $\varphi$  возрастает до  $90^\circ$ .

Коэффициенты пропускания электронов, падающих на исследуемый полимерный композиционный материал под некоторым углом к нормали его поверхности и прошедших слой вещества  $x$  по энергии, значительно ниже коэффициентов по числу частиц (при прочих равных условиях). Например, на рис. 5 показаны кривые коэффициентов пропускания электронов по числу частиц ( $T_N(x)$ ) и энергии ( $T_{E_k}(x)$ ) через чистый полистирол без наполнителя при энергии электрона  $5$  МэВ и перпендикулярно падающем пучке электронов.

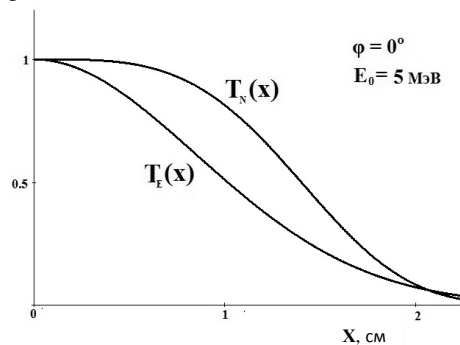


Рис. 5. Сравнения коэффициентов пропускания по числу частиц и энергии для чистого полистирола

Кривая коэффициента пропускания по энергии значительно ниже кривой коэффициентов пропускания электронов по числу частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ среднего линейного пробега электронов в полистирольном композите показал, что наибольший средний линейный пробег во всем диапазоне энергий у полистирола без наполнителя. Однако построенные кривые зависимости среднего линейного пробега электрона в рассматриваемом композите в зависимости от его энергии (от 0 до 10 МэВ) при различном содержании наполнителя находятся достаточно близко друг к другу. Это 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%).

Изменение угла падения электронов сильно влияет на коэффициент пропускания электронов через исследуемый композит и по энергии, и по числу частиц. Коэффициенты пропускания по энергии ( $T_E(x)$ ) значительно ниже коэффициентов пропускания электронов по числу частиц ( $T_N(x)$ ).

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

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Модель космоса*. В 2-х томах. Т. 2. *Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов* / Под ред. проф. Л.С. Новикова. М.: «Книжный дом», Университет (КДУ), 2007, 1142 с.
2. М.М. Михайлов. Светимость космических аппаратов. Спектры отражения внешних поверхностей // *Физика и химия обработки материалов*. 2008, №3, с. 33-42.
3. А.И. Акишин, Э.А. Витошкин, Л.И. Иванов и др. Объемный разряд в диэлектрических материалах космических аппаратов при облучении электронами и протонами // *Перспективные материалы*. 2009, №3, с. 12-16.
4. М.Д. Нусинов. *Влияние космического вакуума на материалы и устройства научной аппаратуры*. М.: «Машиностроение», 1987, 48 с.
5. М.А. Батурицкий. *Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом*: Учебное пособие. Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2005, 118 с.
6. Ф.Ф. Гаврилов. *Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом*. Екатеринбург: Урал. политехн. ин-т им. С.М. Кирова, 1986, 87 с.
7. А.П. Черняев. *Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом*. М.: «Физматлит», 2004, 152 с.

*Статья поступила в редакцию 15.05.2015 г.*

## ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК СЕРЕДНЬОГО ПРОБІГУ ЕЛЕКТРОНІВ ЕНЕРГІЙ ДО 10 MeV У ПОЛІМЕРНОМУ КОМПОЗИТІ

*V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, A.V. Noskov, R.N. Yastrebinskiy*

Представлено розрахунки середнього лінійного та масового пробігів електрона в полімерному композиті. Досліджуваний полімерний композит отримано на основі ударостійкого полістиролу (матриця) і кремнегеля метилполісилоксана (наповнювач). Вміст наповнювача в матриці варіюється від 0 до 60 мас.%. Розрахунок представлений для широкого діапазону енергії електронів 0...10 MeV. Встановлено, що найбільший середній лінійний пробіг електронів у всьому діапазоні енергій в полістиролу без наповнювача. Проаналізовано коефіцієнти пропускання падаючих електронів на досліджуваний полімерний композиційний матеріал під деяким кутом до нормалі його поверхні і тих, що пройшли шар речовини  $x$  за числом частинок і енергії. Із збільшенням кута падіння значно знижується коефіцієнт пропускання числа електронів на досліджуваний полімерний композиційний матеріал. Показано, що максимальне число відбитих електронів рухається в напрямку, який протилежний напрямку руху первинного електронного пучка, причому їх число зменшується до нуля в міру того, як кут падіння електронів зростає до 90°.

## THEORETICAL CALCULATION OF THE AVERAGE MILEAGE OF ELECTRONS OF ENERGIES UP TO 10 MeV IN POLYMER COMPOSITE

*V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, A.V. Noskov, R.N. Yastrebinski*

The paper presents the calculation of the average linear and mass run of an electron in the polymer composite. The investigated polymer composite obtained on the basis of high-impact polystyrene (matrix) of silica gel and methylpolysiloxanes (filler). The filler content in the matrix ranges from 0 to 60 mas.% by weight. The calculation is presented for a wide range of electron energy from 0 to 10 MeV. Found that the highest average linear range of electrons in the energy range of polystyrene without filler. Analyzed the transmittance of electrons incident on the investigated polymer composite material at some angle to the normal of the surface and past the layer of substance  $x$  by the number of particles and energy. With increasing angle of incidence is greatly reduced transmittance of the number of electrons in the investigated polymer composite material. It is shown that the maximum number of reflected electrons moving in the direction opposite to the direction of movement of the primary electron beam, and the number decreases to zero as the angle of incidence of the electrons increases to 90°.