

УДК 539.12.043

## РАСЧЕТ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫЙ ПОЛИИМИДНЫЙ КОМПОЗИТ

© 2021 г. В. И. Павленко<sup>а</sup>, Н. И. Черкашина<sup>а, \*, \*\*</sup>, А. В. Носков<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова, Белгород, 308012 Россия

<sup>б</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород, 308015 Россия

\*e-mail: cherkashina.ni@bstu.ru

\*\*e-mail: natalipv13@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2020 г.

После доработки 25.05.2020 г.

Принята к публикации 28.05.2020 г.

Изучено прохождение протонов в полимерном композите расчетным способом. Исследованы композиты на основе полиимида и оксида вольфрама. Представлены данные об их основных физико-механических свойствах в зависимости от содержания наполнителя: плотности, пределе прочности при растяжении, водопоглощении, диэлектрической проницаемости, коэффициенте линейного термического расширения. Введение предлагаемого наполнителя – оксида вольфрама – приводит к улучшению физико-механических характеристик итоговых композитов. Рассчитаны ионизационные потери протонов в рассматриваемом композите при различном содержании оксида вольфрама в широком диапазоне значений энергии от 0.5 до 5 МэВ. Установлено, что наполнитель играет решающую роль в оценке среднего пробега протонов. В рассматриваемых композитах средний пробег протонов мал во всем диапазоне значений энергии. Это указывает на возможность использования композита для защиты от протонного излучения в космическом пространстве.

**Ключевые слова:** космическое излучение, полимерный композит, радиационная защита, ионизационные потери, пробег протонов.

**DOI:** 10.31857/S1028096020110126

### ВВЕДЕНИЕ

Космическое излучение является одной из основных проблем при осуществлении межпланетного космического полета, особенно для пилотируемых миссий за пределами низкой околоземной орбиты. Оно может не только нанести вред здоровью космонавтов [1], но и повредить чувствительное радиоэлектронное оборудование космического аппарата [2]. Космическое излучение состоит из различных заряженных частиц, в том числе протонов, электронов и ионов тяжелых элементов с энергией и флуенсами в широком диапазоне, которые зависят от высоты полета, солнечного цикла и других факторов [3, 4].

Источники космического излучения – галактические космические лучи, солнечные лучи, частицы альbedo и радиационные пояса. Спектр галактического космического излучения на орбите Земли состоит приблизительно из 83% протонов, 13% альфа-частиц, 3% электронов и 1% ядер с  $Z > 2$ . Солнечные космические лучи состоят из протонов, атомов гелия и более тяжелых ионов. Прото-

ны радиационных поясов Земли вносят огромный вклад в космическое излучение, их учет особенно важен в случае миссий на низкой околоземной орбите с высотой около 450 км [5, 6].

Традиционно в качестве радиационно-защитного экрана использовали металлы и их сплавы [7–9]. В настоящее время активно ведутся разработки новых композитных материалов, которые не только обладают лучшими радиационно-защитными свойствами по сравнению с алюминием – материалом, который в настоящее время используется для создания большинства конструкций космических аппаратов, но и меньшей массой [10–15].

Эффективность потенциального экранирующего материала измеряется его способностью ослаблять интенсивность излучения при прохождении через материал. Однако при прохождении высокоэнергетических электронов и протонов космического излучения через тяжелые металлические материалы возникает вторичное излучение, включающее в себя заряженные частицы,

фотоны и нейтроны, которое наносит даже больший вред, чем первичное [16]. В [17, 18] указано, что для некоторых материалов (алюминия и более тяжелых элементов) при определенных толщинах вклад вторичных частиц в суммарную дозу эквивалента фактически превышает вклад первичных частиц. В таком случае использование легких материалов для радиационно-защитных экранов, например, полимерных, более эффективно.

Однако использование чистых полимеров в космосе ограничено в силу их низкой термостабильности, низкой устойчивости к атомарному кислороду и ряда других негативных факторов космического пространства [19–21]. Кроме того, воздействие радиации приводит к образованию новых химических связей, что обычно сопровождается необратимыми последствиями, которые проявляются в изменении внешнего вида, химических и физических состояний, а также механических, электрических и тепловых свойств [22, 23]. Введение неорганических наполнителей в полимеры позволяет создавать композиты с улучшенными термическими, физико-механическими и радиационно-защитными свойствами.

В настоящей работе рассмотрено воздействие протонного излучения как одного из наиболее опасного в космическом излучении на полимерные высоконаполненные композиты на основе полиимида и оксида вольфрама(VI). Выбор в качестве полимерной матрицы термопластичного полиимида обусловлен его свойствами, необходимыми для использования в космическом пространстве: высокими физико-механическими свойствами при низких и повышенных температурах; хорошими антифрикционными свойствами, сохраняющимися при низких и высоких температурах; высокой износостойкостью и другими свойствами [24, 25]. Устойчивость к протонному излучению в работе оценивали расчетными методами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве полимерной матрицы использовали термопластичный полиимид в виде прессовочного порошка марки ПИ-ПР-20 (производитель АО «Институт пластмасс им. Г.С. Петрова»). Дисперсность частиц полиимида составляла не более 500 мкм, массовая доля летучих веществ – не более 1%. В качестве наполнителя для полиимидных композитов использовали оксид вольфрама(VI). Плотность наполнителя 7.4 г/см<sup>3</sup>, дисперсность частиц не более 2 мкм.

Синтез композитов осуществляли методом прямого прессования при температуре 380–400°С и удельном давлении 500 кгс/см<sup>2</sup>. Готовый композит представлял собой диск диаметром 30 мм и толщиной 3–4 мм. Содержание оксида вольфра-

ма варьировалось от 10 до 80 масс. %. Прессование композитов проводили с использованием автоматического гидравлического пресса Vaneox–40t automatic. Плотность полученных композитов определяли методом гидростатического взвешивания. Предел прочности при растяжении определяли на универсальной механической испытательной машине UTS-10.

Величину термического расширения характеризовали температурным коэффициентом линейного расширения  $\alpha$ . Коэффициенты линейного расширения всех образцов измеряли при температуре от 20 до 250°С. Среднее значение  $\alpha$  в интервале температур  $\Delta T$  определяли по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l} \frac{1}{\Delta T}, \quad (1)$$

где  $\Delta l$  – изменение длины образца в интервале температур  $\Delta T$ ,  $l$  – начальный размер образца. Диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  вычисляли исходя из экспериментального значения электроемкости по формуле:

$$\epsilon = \frac{C d}{S \epsilon_0}, \quad (2)$$

где  $C$  – электроемкость,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  Ф/м,  $S$  – площадь электрода (пластины конденсатора). Электроемкость определяли с помощью мультиметра Digital DT9205A с использованием плоского конденсатора.

Для определения водопоглощения готовых композитов образцы погружали в воду. Через 24 ч образцы вынимали из воды, удаляли влагу с их поверхности мягкой влажной тканью и немедленно взвешивали. Водопоглощение вычисляли по формуле:

$$W = [(m_2 - m_1)/m_1] \times 100\%, \quad (3)$$

где  $m_1$  – масса образца в сухом состоянии [г];  $m_2$  – масса образца через 24 ч насыщения водой [г]. Для расчета прохождения протонов с энергией от 0.5 до 5 МэВ в разработанных высоконаполненных композитах использовали их атомарный химический состав (табл. 1).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 представлены основные физико-механические свойства полученных высоконаполненных полиимидных композитов с оксидом вольфрама(VI). Анализ данных показывает, что введение предлагаемого наполнителя –  $WO_3$  – приводит к улучшению физико-механических характеристик итоговых композитов. Плотность чистого образца полиимида 1.43 г/см<sup>3</sup>, а при введении 80 масс. %  $WO_3$  плотность возрастает в три раза до значения 4.35 г/см<sup>3</sup>. Предел прочности

**Таблица 1.** Химический состав разработанных высоконаполненных композитов

Содержание WO <sub>3</sub> , масс. %	Содержание элемента, ат. %				
	C	N	O	H	W
0	68.11	7.57	21.62	2.70	–
10	61.30	6.81	21.53	2.43	7.93
20	54.49	6.05	21.44	2.16	15.86
30	47.68	5.30	21.33	1.89	23.80
40	40.86	4.55	21.25	1.62	31.72
50	34.06	3.78	21.15	1.35	39.66
60	27.24	3.03	21.06	1.08	47.59
70	20.43	2.27	20.96	0.82	55.52
80	13.62	1.51	20.87	0.54	63.46

при растяжении композитов вначале существенно растет до значения 157 МПа при содержании наполнителя 60 масс. %, а затем значительно снижается до 63 МПа. Это свидетельствует о том, что при введении более 60 масс. % WO<sub>3</sub> возникает недостаток связующего полиимида для скрепления в единый композит. Поэтому целесообразно использовать композиты с содержанием предлагаемого наполнителя не более 60 масс. %. Такой параметр, как водопоглощение, при введении значительно снижается с увеличением вводимого WO<sub>3</sub>. При максимальном содержании WO<sub>3</sub> (80 масс. %) водопоглощение 0.11%, тогда как образец чистого полиимида поглощает влагу сильнее (водопоглощение 0.30%). Коэффициенты линейного расширения всех образцов измеряли при температуре от 20 до 250°C. Коэффициенты всех исследуемых композитов малы (табл. 2).

Исходя из данных табл. 2 можно утверждать, что разработанные композиты на основе полиимида и оксида вольфрама (VI) обладают высокими физико-механическими характеристиками и могут найти применение в области космического материаловедения. Для оценки возможности использования разработанных материалов в космической отрасли необходимо изучить устойчи-

вость данных материалов к различным видам ионизирующего излучения, присутствующим в космическом пространстве. Далее представлены результаты оценки радиационно-защитных свойств композитов по отношению к протонному излучению методом математического моделирования. Данный способ позволяет сделать первоначальный прогноз об устойчивости материалов к воздействию протонов без использования дорогостоящих экспериментов по облучению материалов в условиях космоса или протонных ускорителей.

Воспользуемся формулой Бете–Блоха для линейной тормозной способности [МэВ/см]. В случае малой кинетической энергии протонов

$(E_k \ll M_p c^2 \left( \frac{M_p c^2}{2m_e c^2} - 1 \right))$  она принимает вид:

$$\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\text{col}} = K \rho \frac{z^2 Z}{2A} \frac{1}{\beta^2} \times \left[ 2 \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} \right) - 2\beta^2 - U - \delta \right], \quad (4)$$

где  $U$  – поправка на учет связи электронов на  $K$ - и  $L$ -оболочках,  $\delta$  учитывает эффект поляризации среды (эффект плотности). В рассматриваемой задаче  $U$  и  $\delta$  не существенны. В формуле приняты

обозначения:  $\beta = \sqrt{1 - \frac{(M_p c^2)^2}{(M_p c^2 + E_k)^2}}$  – фактор

Лоренца протона с кинетической энергией  $E_k$ ,

$K = 4\pi r_e^2 m_e c^2 N_A = 0.307 \text{ МэВ} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$ ,  $m_e c^2 = 0.511 \text{ МэВ}$  – энергия покоя электрона,  $M_p c^2 = 938.3 \text{ МэВ}$  – энергия покоя протона,  $Z$  – заряд частицы в единицах заряда позитрона (для прото-

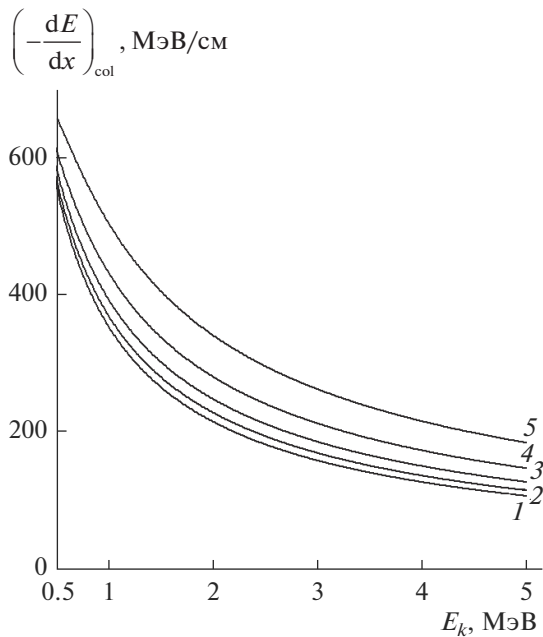
на  $Z = 1$ ),  $r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.8 \times 10^{-13} \text{ см}$  – классический

радиус электрона,  $N_A = 6 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ ,  $\rho$  – плотность вещества,  $I$  – средний ионизационный потенциал атома вещества среды.

Исследуемый композиционный материал состоит из атомов разного сорта, каждый из кото-

**Таблица 2.** Физико-механические свойства исследуемых полиимидных композитов с оксидом вольфрама(VI)

Параметр	Содержание WO <sub>3</sub> , масс. %								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1.43	1.61	1.77	1.99	2.23	2.57	3.05	3.46	4.35
Предел прочности при растяжении, МПа	77	89	103	119	132	145	157	121	63
Диэлектрическая проницаемость при 1 кГц	3.5	5.7	7.8	9.8	11.6	13.5	15.1	17.2	19.2
Водопоглощение за 24 ч, %	0.30	0.27	0.24	0.21	0.19	0.16	0.14	0.13	0.12
Коэффициент линейного расширения от 20 до 250°C, $\times 10^{-6}$	4	4	3	3	3	3	2	2	2



**Рис. 1.** Кривые зависимости ионизационных потерь композитов от начальной энергии протонов при различном содержании  $WO_3$ : 0 (1); 20 (2); 40 (3); 60 (4); 80 масс. % (5).

рых будет давать свой вклад в ионизационные потери энергии электронов. Воспользуемся композиционным законом Брэгга:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \sum_i \rho_i \left(-\frac{dE}{dx}\right)_i, \quad (5)$$

где  $\rho_i$  и  $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_i$  – плотность и вклад  $i$ -го элемента в сложном веществе в ионизационные потери протона.

Перепишем выражение (5) в более удобном для анализа виде:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = \rho \frac{Z}{A} F_p(E_k, I), \quad (6)$$

$$F_p(E_k, I) = \frac{K}{\beta^2} \left[ 2 \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]. \quad (7)$$

В этом случае вклад каждого вещества в суммарные ионизационные потери имеет вид:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^C = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F_p(E_k, I_C), \quad (8a)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^N = \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F_p(E_k, I_N), \quad (8б)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^O = \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F_p(E_k, I_O), \quad (8в)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^H = \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F_p(E_k, I_H), \quad (8г)$$

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}^W = \rho_W \frac{Z_W}{A_W} F_p(E_k, I_W), \quad (8д)$$

Средние ионизационные потенциалы рассматриваемых атомов имеют следующие значения:  $I_C \approx 78$ ,  $I_N \approx 82$ ,  $I_O \approx 95$ ,  $I_H \approx 19.2$ ,  $I_W \approx 727$  эВ.

Исходя из композиционного закона Брэгга (5) ионизационные потери энергии протонов в исследуемом композиционном материале запишем в виде:

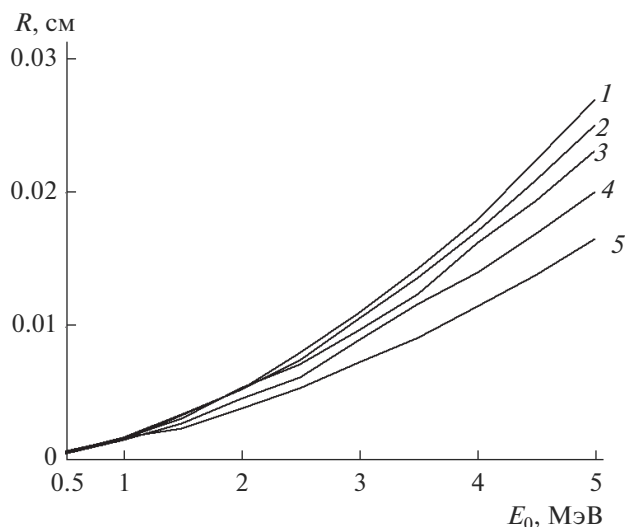
$$\begin{aligned} \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} &= \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F_p(E_k, I_C) + \\ &+ \rho_N \frac{Z_N}{A_N} F_p(E_k, I_N) + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} F_p(E_k, I_O) + \\ &+ \rho_H \frac{Z_H}{A_H} F_p(E_k, I_H) + \rho_W \frac{Z_W}{A_W} F_p(E_k, I_W). \end{aligned} \quad (9)$$

На рис. 1 представлены кривые, построенные по формулам (7) и (9). Они демонстрируют ионизационные потери полученного в работе полимерного композита при разном содержании  $WO_3$  в композите. Анализ рисунка показал, что при увеличении содержания  $WO_3$  ионизационные потери возрастают при одинаковой начальной энергии протонов. Наименьшими ионизационными потерями характеризуется образец без наполнителя, а наибольшими – композит с содержанием наполнителя 80 масс. %.

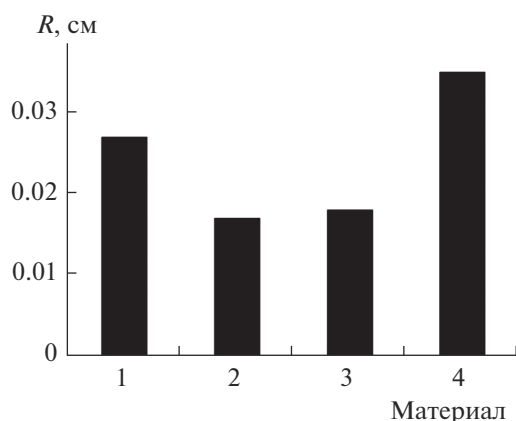
Одной из радиационно-защитных характеристик является средний пробег протонов в материале. Средний пробег рассчитывается по формуле:

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE_k}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col}}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлены кривые, демонстрирующие зависимость среднего пробега электрона в композите от его начальной кинетической энергии, при разном содержании  $WO_3$  в композите. Анализ рисунка показал, что при большей концентрации наполнителя средний пробег уменьшается (при одинаковой энергии протонов). То есть наполнитель играет решающую роль в оценке среднего пробега протонов. Данные рис. 2 показывают, что в рассматриваемых композитах средний пробег протонов мал в широком диапазоне значений начальной энергии (1–5 МэВ). Это указывает на возможность использования композита для защиты от протонного излучения в космическом пространстве. Для сравнения на рис. 3 представлены данные о средних пробегах протонов с энергией 5 МэВ в композите с содержанием  $WO_3$  80 масс. %, алюминии и полимерах [26].



**Рис. 2.** Кривые зависимости среднего пробега протонов в композитах от их начальной энергии при различном содержании  $WO_3$ : 0 (1); 20 (2); 40 (3); 60 (4); 80 масс. % (5).



**Рис. 3.** Средний пробег протонов с энергией 2 МэВ в различных материалах: 1 – полиимиде; 2 – композите (80 масс. %  $WO_3$ ); 3 – алюминии; 4 – полистироле.

Средний эффективный пробег протонов в исследуемом композите близок к пробегу в алюминии. Прогрессивное увеличение содержания наполнителя приводит к снижению пробега протонов в полимерах без наполнителя практически в два раза больше, чем в рассматриваемом композите.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлено, что введение предлагаемого наполнителя –  $WO_3$  – приводит к улучшению физико-механических характеристик итоговых композитов. Плотность чистого образца полиимида  $1.43 \text{ г/см}^3$ , а при введении 80 масс. %  $WO_3$  плотность возрастает в три раза до  $4.35 \text{ г/см}^3$ . Линейные коэффициенты термического расши-

рения всех исследуемых композитов малы и не превышают значения  $2 \times 10^{-6}$ . Показано, что целесообразно использовать композиты с содержанием наполнителя не более 60 масс. %, так как при большей его концентрации снижаются прочностные характеристики.

Представлены расчетные данные о прохождении протонов через исследуемые композиты. При увеличении содержания  $WO_3$  ионизационные потери возрастают при одинаковой начальной энергии протонов. Наименьшими ионизационными потерями характеризуется образец без наполнителя, а наибольшими – композит с содержанием наполнителя 80 масс. %.

Установлено, что наполнитель играет решающую роль в оценке среднего пробега протонов. В рассматриваемых композитах средний пробег протонов мал в широком диапазоне значений начальной энергии (1–5 МэВ). Это указывает на возможность использования композита для защиты от протонного излучения в космическом пространстве. Средний эффективный пробег протонов в исследуемом композите близок к пробегу в алюминии. Прогрессивное увеличение содержания наполнителя приводит к снижению пробега протонов в полимерах без наполнителя практически в два раза больше, чем в рассматриваемом композите.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-19-00316).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chancellor J.C., Scott G.B.I., Sutton J.P. // *Life*. 2014. V. 4. № 3. P. 491. <https://doi.org/10.3390/life4030491>
2. Duzellier S. // *Aerospace Science and Technology*. 2005. V. 9. № 1. P. 93. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2004.08.006>
3. Кузнецов В.Д. // *УФН*. 2012. Т. 182. № 3. С. 327.
4. Кузнецов В.Д. // *Космическая техника и технологии*. 2014. № 3(6). С. 3.
5. *Managing Space Radiation Risk in the New Era of Space Exploration*. Washington: The National Academic, D.C., 2008. P. 27.
6. Гинсбург В.Л. // *УФН*. 2001. Т. 171. № 10. С. 1107.
7. Read N., Wang W., Essa K., Attallah M.M. // *Mater. Design*. 2015. V. 65. P. 417. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.044>
8. Rioja R., Liu J. // *Metall. Mater. Transac. A*. 2012. V. 43. P. 3325. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1155-z>
9. Kumar C.S., Mayanna S.M., Mahendra K.N. et al. // *Appl. Surf. Sci.* 1999. V. 151. P. 280. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(99\)00290-1](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(99)00290-1)
10. Dong L., Ko J., Woo J.-K. // *New Phys.: Sae Mulli*. 2014. V. 64. P. 1248. <https://doi.org/10.3938/NPSM.64.1248>

11. Хасанишин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 1. С. 88.  
<https://doi.org/10.7868/S0207352815010114>
12. Павленко В.И., Черкашина Н.И., Иваницкий Д.А. // Вестн. Белгород. гос. техн. ун-та им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 185.
13. Bel T., Arslan C., Baydogan N. // Mater. Chem. Phys. 2019. V. 221. P. 58.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.09.014>
14. Вилков Ф.Е., Лозован А., Бажанов А.В. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 9. С. 22.  
<https://doi.org/10.7868/S0207352817090037>
15. Rojdev K., Atwell W. // Gravit. Space Res. 2015. V. 3. P. 59.
16. Keating A., Goncalves P., Pimenta M. et al. // Rad. Environ. Biophys. 2012. V. 51. № 3. P. 245.  
<https://doi.org/10.1007/s00411-012-0412-2>
17. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А. // Вопросы электромеханики. 2011. Т. 120. С. 37.
18. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Ред. Новиков Л.С. М.: Книжный дом Университет, 2007. 1144 с.
19. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V. // Rad. Phys. Chem. 2019. V. 159. P. 117.  
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.02.041>
20. Zhang L., Chen R. // Chin. J. Aeronaut. 2004. V. 17. P. 53.  
[https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60203-3](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60203-3)
21. Hooshangi Z., Fegghi S.A.H., Saeedzadeh R. // Acta Astronaut. 2016. V. 119. P. 233.  
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.11.031>
22. Kacarevic-Popovic Z., Kostoski D., Novakovic L. et al. // Serb. Chem. Soc. 2004. V. 69. P. 1029.
23. Faltermeier A., Reicheneder C., Römer P. et al. // J. Orofac. Orthop. 2014. V. 75. № 5. P. 334.  
<https://doi.org/10.1007/s00056-014-0229-5>
24. Fang X., Yang Z., Zhang S. et al. // Polym. 2004. V. 45. P. 2539.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.02.008>
25. Xie S., Zhang Z., Wei W. // J. Kor. Phys. Soc. 2007. V. 51. P. 1536.  
<https://doi.org/10.3938/jkps.51.1536>
26. Пономаренко П.А., Фролова М.А. // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 4. С. 90.

## Calculation of Proton Passage Through a Highly Filled Polyimide Composite

V. I. Pavlenko<sup>1</sup>, N. I. Cherkashina<sup>1,\*,\*\*</sup>, A. V. Noskov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod, 308012 Russia

<sup>2</sup>Belgorod State National Research University, Belgorod, 308015 Russia

\*e-mail: cherkashina.ni@bstu.ru

\*\*e-mail: natalipv13@mail.ru

The passage of protons in a polymer composite is studied by the calculation method. Composites based on polyimide and tungsten oxide are investigated. The data on their basic physical and mechanical properties are presented, depending on the filler content: density, ultimate tensile strength, water absorption, dielectric constant, water absorption, coefficient of linear thermal expansion. The introduction of the proposed filler, tungsten oxide, leads to improved physical and mechanical characteristics of the final composites. The ionization losses of protons in the composite under consideration have been calculated for various contents of tungsten oxide in a wide energy range from 0.5 to 5 MeV. The filler is found to play a decisive role in estimation the average range of protons. In the composites under consideration, the average range of protons is small over the entire energy range. This indicates the possibility of using the composite to protect against proton radiation in outer space.

**Keywords:** cosmic radiation, polymer composite, radiation protection, ionization losses, proton range.