

УДК 537.533.9

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е. А. Джур¹, А. Ф. Санин¹, С. А. Божко¹, А. Ю. Андрианов¹, В. А. Белоус², А. В. Рыбка², А. А. Захарченко²,
В. Н. Борисенко², А. М. Зиновьев³, А. П. Кузнецов³, Ю. В. Плисак³

¹Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара
Украина, 49050, Днепропетровск, просп. Юрия Гагарина, 72. E-mail: sinter@ukr.net

²Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

³Научно-производственная группа «Днепротехсервис»

Украина, 49005, Днепропетровск, ул. Симферопольская, 21

Рассматривается проблема обеспечения защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов от ионизирующего излучения на орбите. Целью работы является разработка и исследование многофазных гетерогенных материалов для защиты радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата, находящегося на геостационарной орбите. Предметом исследования являются дисперсно-наполненные полимерные композиционные материалы, а объектом исследования – процессы взаимодействия электронного излучения с указанными материалами. Для исследования использовалась методика имитационного облучения электронами образцов композиционных материалов. Проведено моделирование методом Монте-Карло прохождения электронов через образцы композиционных материалов. Результаты исследования показали, что экранирующая способность разработанных образцов композиционных материалов выше не менее чем на 30 % по сравнению с алюминием при равной массовой толщине. Разработанные композиционные материалы могут использоваться в системах пассивной защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на геостационарной орбите.

Ключевые слова: композиционный материал, экранирующая способность, поток электронов.

COMPOSITE MATERIAL FOR PROTECTION OF SPACECRAFT ELECTRONICS AGAINST IONIZING RADIATION

Y. A. Dzhur¹, A. F. Sanin¹, S. A. Bozhko¹, A. Y. Andrianov¹, V. A. Belous², A. V. Rybka²,
A. A. Zakharchenko², V. N. Borysenko², A. M. Zinoviev³, A. P. Kuznetsov³, Y. V. Plysak³

¹Dnipropetrovsk National University named after Oles Honchar
72 Gagarin str., Dnepropetrovsk, 9050, Ukraine. E-mail: sinter@ukr.net

²National Science Center “Kharkov Institute of Physics and Technology”

1 Akademicheskaya str., Kharkov, 61108, Ukraine

³Scientific and Production Group Dneprotechservice

21 Simferopolskaya str., Dnepropetrovsk, 49005, Ukraine

The problem of protection of spacecraft electronics against ionizing radiation is reviewed. The goal of the work is to develop and study the multiphase heterogeneous materials for shielding of spacecraft electronics on the geostationary orbit. The subject of the study is disperse-filled polymer composite materials and the objects of the study are the processes of interaction of electron radiation with the mentioned materials. The imitative irradiation method of samples of the composite materials was used in the study. Simulating of electron transmission through the samples of the composite materials was made with Monte-Carlo method. The results of the study demonstrate that shielding ability of the developed samples of the composite materials is no less than 30 % greater as compared with aluminum at the equal mass thickness. The developed composite materials can be applied in the systems of passive shielding of the spacecraft electronics on geostationary orbit.

Keywords: composite material, shielding ability, electron radiation.

Одна из основных проблем обеспечения надежности телекоммуникационных космических аппаратов (КА) заключается в необходимости защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) системы управления КА от ионизирующего излучения на орбите. Защита

РЭА от воздействия ионизирующего излучения может быть реализована несколькими организационно-техническими способами, одним из которых является применение более радиационно-стойкой элементной базы РЭА [1; 2]. Однако повышение радиационной

стойкости элементной базы, в том числе интегральных схем, приводит к существенному удорожанию системы управления, что снижает конкурентоспособность КА на быстроразвивающемся рынке телекоммуникационных услуг.

Способ обеспечения защиты РЭА может быть позаимствован из практики повышения радиационной безопасности наземных ядерных объектов, который заключается в сокращении времени работы под облучением с целью снижения накопленной дозы [3]. Но сокращение времени эксплуатации КА совершенно неактуально в условиях требования повышения срока его активного существования на орбите [4]. Другой организационный способ заключается в выборе такой траектории полета, которая обеспечивает минимальное пребывание КА в зонах повышенного радиационного воздействия, что также является не приемлемым, поскольку КА должен иметь определенную ориентацию относительно Земли.

Повышение работоспособности РЭА в условиях космического облучения может обеспечиваться использованием защитных экранов – активных, в виде направленного электромагнитного поля, отклоняющего поток заряженных частиц, и пассивных, в виде защитных материалов, поглощающих или рассеивающих излучение [5]. Первый из вариантов на сегодняшний день технически не реализуем, второй является наиболее простым как по технической реализации, так и по стоимости. Его реализация может быть основана на оптимизации компоновки РЭА, в результате которой критические элементы экранируются более стойкими или менее ответственными элементами, что трудно реализовать в условиях ужесточения требований к компактности и функциональности современных интегральных схем РЭА. Следует отметить, что при использовании экранирующих материалов для пассивной защиты возникает проблема неизбежного повышения массы КА. Поэтому основной характеристикой защитного материала должна быть экранирующая способность, отнесенная к удельному весу. Основным материалом, используемым в качестве защитного, является алюминий и его сплавы, обладающие небольшой плотностью и высокой технологичностью.

Тем не менее, поиск новых более эффективных экранирующих материалов не прекращается. Именно поэтому значительная часть работ в области защиты КА от космического излучения разного вида посвящена исследованию экранирующих свойств различных материалов, а также геометрических характеристик самого экрана.

Основной целью работы, некоторые результаты которой представлены в статье, является разработка и исследование многофазных гетерогенных материалов для защиты РЭА КА, находящегося на геостационарной орбите (ГСО). Объектом исследования являются процессы взаимодействия корпускулярного излучения с полимерными композиционными материалами (ПКМ), содержащими высокодисперсные модификаторы.

Для ГСО ионизирующее излучение представлено электронами и протонами естественного радиационного поля Земли (ЕРПЗ), а также протонами солнечных космических лучей (СКЛ). Другие источники (галактические лучи или ионы СКЛ) не рассматриваются в виду низкой интенсивности или проникаемости. Спектры дифференциальных и интегральных потоков электронов и протонов для ГСО, рассчитаны с помощью программного обеспечения OMERE 3.5.2.1 при использовании моделей AE8MAX для электронов, AP8MIN для протонов, JPL1 и «Август 1972 г» для протонов (соответственно для усредненных значений по всем точкам орбиты и для пиковых значений солнечных вспышек, наблюдаемых в августе 1972 г.).

Экспериментальные исследования экранирующих свойств материалов осуществлялось путем имитационного облучения потоком электронов энергией 2,5 МэВ мишени из ПКМ с высокодисперсным наполнителем и эталонов из алюминия марки А7 с измерением и сопоставлением энергетических параметров первичных и прошедших сквозь мишень электронов. Облучение образцов с размерами 40×40 мм и толщиной 1, 1,5, 2, 3 и 4 мм проводилось с использованием электростатического ускорителя электронов «ЭЛИАС». Геометрические параметры детектора на базе кристалла CdZnTe выбирались таким образом, чтобы электроны с энергией 2,5 МэВ и сечением пучка 2,25 мм² полностью поглощались в кристалле. Кратность ослабления k_I (по току) первичного потока электронов образцами ПКМ и алюминиевыми эталонами определяли путем сопоставления силы тока при фиксированном напряжении смещения на детекторе, возникающего при облучении с мишенью и без: $k_I = I_0 / I_\tau$, где I_0 – сила тока на детекторе без мишени, характеризующая первичный поток электронов; I_τ – сила тока на детекторе с мишенью, характеризующая поток электронов, прошедших мишень и мощность квантового тормозного излучения от мишени в телесный угол детектора. Общий ток на детекторе пропорционален сумме токов, производимых электронами и квантами тормозного излучения в отдельности.

Расчетная оценка прохождения потока электронов для ряда образцов ПКМ и алюминиевого сплава АМгб проводилась с помощью программного кода EGS моделирования методом Монте-Карло взаимодействия электронов и гамма-квантов с веществом.

Согласно выполненным ранее исследованиям, обобщенным в [6], потери энергии электронами и протонами обратно пропорциональны атомному номеру элемента материала защиты. Такая зависимость нарушается для электронов с энергиями, выходящими за пределы рассматриваемого в работе спектра, что связано с увеличением вклада радиационных потерь по сравнению с потерями на ионизацию. Радиационные потери электронов возрастают с увеличением их кинетической энергии [7], и это возрастание пропорционально атомному номеру вещества. «Обратная сторона медали» радиационных потерь – возникновение тормозного излучения. И соответственно, чем больше атомный номер вещества, тем больше выход тормозного излучения; чем выше

энергия электрона, тем шире спектр тормозного излучения. Следует отметить, что кроме «энергетической проблемы» взаимодействия электронов с веществом существует и «геометрическая проблема» [8], связанная с рассеиванием электронов, и это рассеивание протекает наиболее интенсивно в веществах с высоким атомным номером. Многократное рассеивание электронов в веществе в конечном итоге приводит к увеличению альбедо первичного потока, что в условиях открытого космоса способствует значительному повышению экранирующей способности защитного материала.

Таким образом, при выборе компонентов ПКМ целесообразно принять к рассмотрению элементы как с малым атомным номером (для эффективного ослабления потоков протонов), так и элементы с высоким атомным номером, повышающие альбедо электронов. Их относительное содержание в составе материала определяется интенсивностью и спектром протонов и электронов на заданной орбите. Согласно приведенным спектрам на рис. 1 наибольшую интенсивность на рассматриваемой орбите имеют электроны ЕРПЗ.

В связи с этим наибольший интерес представляет изменение энергии электронов при прохождении через слой защиты при разном относительном содержании основных компонентов в образцах ПКМ, состоящих из легкой полимерной матрицы, например, эпоксидной смолы, содержащей такие легкие элементы как водород, углерод и кислород, и наполнителя из металлов с высоким атомным номером. Данный класс смол хорошо себя зарекомендовал в изделиях ракетно-космической техники, поскольку удовлетворяет основным требованиям к физическим и механическим свойствам (структурная и адгезионная прочность, низкое газовыделение, радиационная стойкость). В качестве наполнителя можно рассматривать тяжелые металлы, такие как уран, свинец, висмут или

вольфрам, при этом предпочтение отдается последнему элементу вследствие его наименьшей токсичности.

В условиях поиска альтернативы алюминию, как материалу экранирующей защиты РЭА, интерес представляет экспериментальное исследование образцов КМ с плотностью меньшей или близкой к 2700 кг/м^3 .

В табл. 1 представлены результаты экспериментального определения кратности ослабления потоков электронов при прохождении через образцы ПКМ и алюминия (эталон).

Для сравнения экранирующей способности ПКМ и алюминиевого эталона необходимо использовать материалы с равными массовыми толщинами. Для количественной оценки соотношения экранирующей способности образцов и эталонов использовали коэффициент отношения массово-защитных свойств, который позволяет оценить, во сколько раз отличаются кратности ослабления потока электронов ПКМ и алюминием при их равной массовой толщине $r_s = k_c/k_a$, где k_c – кратность ослабления потока электронов образцом ПКМ при одинаковой с алюминием массовой толщине; k_a – кратность ослабления потока электронов алюминиевым эталоном при одинаковой с образцом ПКМ массовой толщине. Анализ результатов, представленных в табл. 2 и рис. 2, показывает, что как минимум четыре образца ПКМ имеют большую экранирующую способность к потоку электронов (или массово-защитные характеристики) по сравнению с алюминием.

Как видно из данных табл. 2, экранирующая способность отвержденной эпоксидной смолы без наполнителя несколько хуже, чем для алюминия. С увеличением содержания вольфрама наблюдается рост экранирующих свойств ПКМ. Образец с содержанием вольфрама 63 % является наиболее эффективным – его экранирующая способность более чем на 30 % превосходит экранирующую способность алюминия.

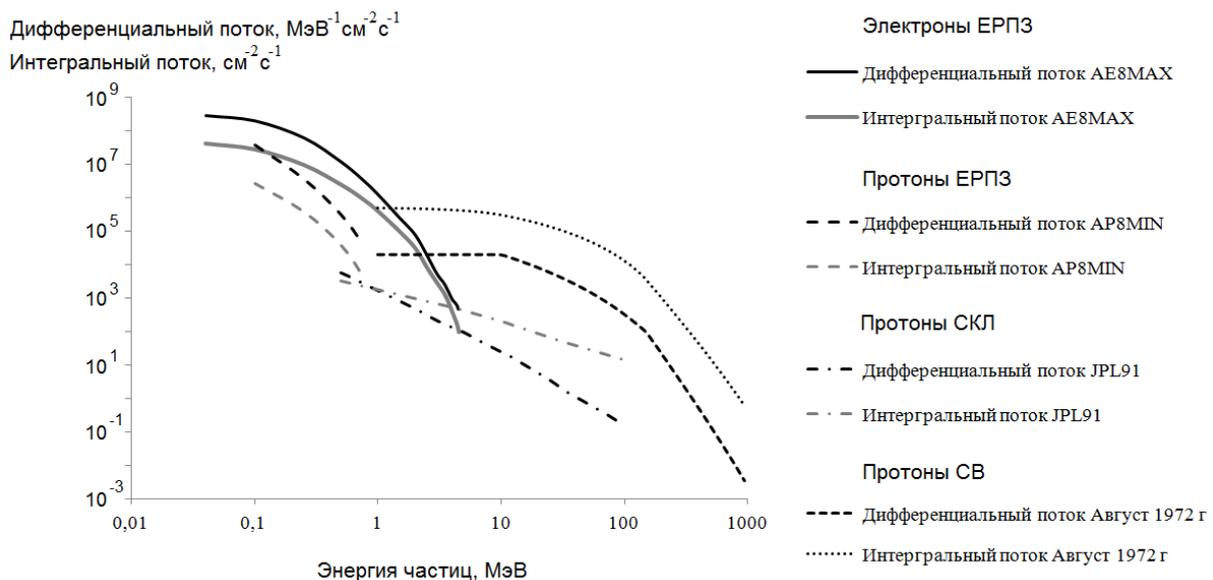


Рис. 1. Характеристики ионизирующего излучения на ГСО с указанием типа выбранной модели

Кратности ослабления потока электронов энергией 2,5 МэВ ПКМ и алюминиевым эталоном

№ п.п.	Состав образца КМ (в % указано массовое содержание наполнителя)	Плотность измеренная, кг/м ³	Массовая толщина, кг/м ²	Кратность ослабления
1	Эпофлекс-09	1180	3,13	1,44±0,054
2	Эпофлекс-09 + 45 % W	2040	4,28	2,22±0,104
3	Эпофлекс-09 + 63 % W	2860	5,81	3,20±0,112
4	Эпофлекс-09 + 15 % Al ₂ O ₃ + 35 % W	1940	3,94	2,12±0,055
5	Эпофлекс-09 + 25 % Al ₂ O ₃ + 25 % W	1830	3,75	1,89±0,052
6	Эпофлекс-09 + 35 % Al ₂ O ₃ + 15 % W	1780	3,35	1,64±0,021
7	Алюминий А7	2700	2,70	1,44±0,022
8			4,05	1,82±0,018
9			5,40	2,35±0,047

Таблица 2

Сравнение массово-защитных характеристик ПКМ и алюминия при одинаковой массовой толщине

№ п.п.	Состав образца КМ (в % указано массовое содержание наполнителя)	Массовая толщина, кг/м ²	Кратность ослабления		Коэффициент отношения по защите
			эталона Al	образца КМ	
1	Эпофлекс-09	3,13	1,56	1,44	0,92
2	Эпофлекс-09 + 45 % W	4,28	1,93	2,22	1,15
3	Эпофлекс-09 + 63 % W	5,81	2,42	3,20	1,32
4	Эпофлекс-09 + 15 % Al ₂ O ₃ + 35 % W	3,94	1,82	2,12	1,17
5	Эпофлекс-09 + 25 % Al ₂ O ₃ + 25 % W	3,75	1,76	1,89	1,07
6	Эпофлекс-09 + 35 % Al ₂ O ₃ + 15 % W	3,35	1,63	1,64	1,01

Если коэффициент отношения по защите позволяет оценить, во сколько раз экранирующие свойства ПКМ выше, чем у алюминия при одинаковой массе, то коэффициент отношения по массе позволяет количественно оценить, во сколько раз масса образцов ПКМ ниже, чем у алюминия при одинаковой экранирующей способности $r_m = m_a/m_c$, где m_a – массовая толщина алюминия при одинаковой с образцом ПКМ кратности ослабления; m_c – массовая толщина образца ПКМ при одинаковой с алюминием кратности ослабления.

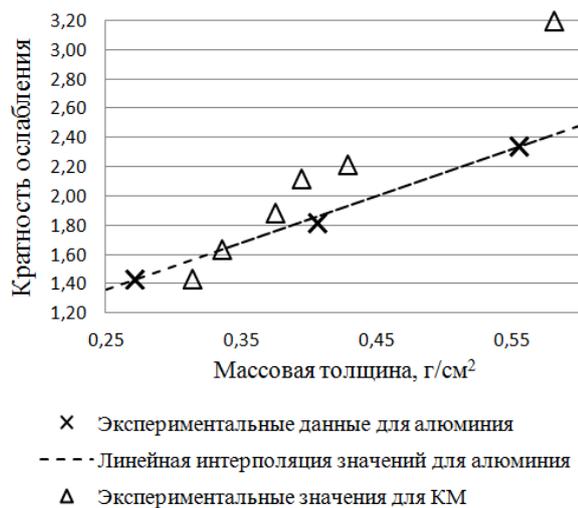


Рис. 2. Зависимость кратности ослабления потока электронов энергией 2,5 МэВ образцами КМ и алюминиевыми эталонами от их массовой толщины

Результаты исследований показывают, что защита из ПКМ с содержанием вольфрама 63 % на 42 % легче, чем из алюминия, при одинаковой кратности ослабления 3,2 (табл. 3).

Моделирование методом Монте-Карло проводилось для наиболее эффективных образцов КМ с содержанием вольфрама 45 и 63 % и толщиной, соответственно, 2,59 и 1,85 мм, эквивалентных 2 мм эталона из сплава АМгб (массовая толщина всех материалов одинакова – 5,28 кг/м²).

В качестве основного критерия для оценки доли энергии электронов, поглощенной или рассеянной мишенью, использовался параметр, определяемый согласно выражению $\eta = E_c/E_0$, где η – эффективность ослабления потока энергии, переносимой электронами, E_c – поглощенная мишенью энергия потока электронов; E_0 – начальная энергия потока электронов. Несмотря на различие в способах оценки кратности ослабления первичного потока электронов k_f , используемой в эксперименте, и эффективности ослабления потока энергии η в моделировании, эти параметры можно сопоставить как $k_f = 1 / (1 - \eta)$.

Согласно результатам оценки величины η в широком энергетическом спектре (рис. 3) способности к ослаблению потока электронов ПКМ и АМгб начинают заметно отличаться при энергии электронов, превышающей 1 МэВ.

Кратность ослабления потока электронов с энергией 2,5 МэВ образцом с содержанием вольфрама 63 % и толщиной 1,85 мм составляет 4, образцом с содержанием вольфрама 45 % и толщиной 2,5 мм – 3,2, а сплавом АМгб толщиной 2 мм – 2. Таким образом, экранирующая способность ПКМ с содержанием

вольфрама 63 % на энергии электронов 2,5 МэВ выше, чем у АМг6 в 2 раза, а образца с содержанием вольфрама 45 % – в 1,6 раз.

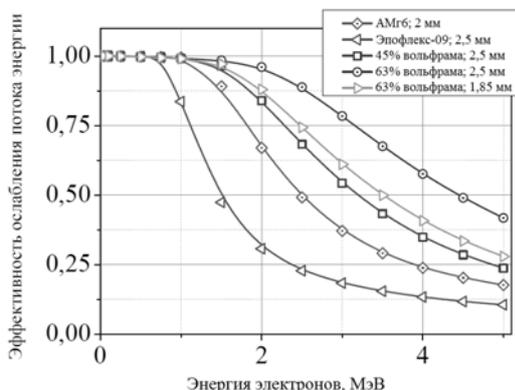


Рис. 3. Эффективность ослабления потока энергии веществом мишени в зависимости от энергии электронов

Однако в представленных на рис. 3 результатах не учитывается энергия электронов, преобразованная в энергию квантов тормозного излучения. Анализ спектров вторичного тормозного излучения (рис. 4) позволил установить, что отношение количества квантов тормозного излучения за образцом из ПКМ

с содержанием вольфрама 63 % к количеству квантов за образцом из АМг6 составляет 1,9, а количество квантов тормозного излучения за образцом ПКМ (содержание вольфрама 45 %) и за эталоном АМг6 отличается в 1,57 раз (табл. 4). Исходя только из количественных оценок расчетная эффективность экранирования потока электронов образцами из ПКМ и АМг6 приблизительно одинаковая. Но следует отметить, что большая часть квантов тормозного излучения после АМг6 имеет энергии менее 30 кэВ. Такие γ -кванты вносят значительный вклад в поглощенную дозу элементов РЭА, так как полностью поглощаются кремниевыми пластинами (имитирующими элементы РЭА) в отличие от квантов больших энергий, которые передают только часть своей энергии.

Согласно данным табл. 5 при начальной энергии электронов 2,5 МэВ общее количество электронов, прошедших экран из ПКМ, меньше, чем прошедших через образец из АМг6. Причем для ПКМ с содержанием наполнителя 63 % и толщиной 1,85 мм количество прошедших электронов почти в 2 раза меньше, чем для алюминиевого сплава.

Анализ спектров энергий электронов, прошедших мишени из ПКМ и АМг6 (рис. 5), позволяет сделать вывод о существенном снижении количества электронов как высоких (в диапазоне 1,25...1,75 МэВ), так и низких энергий (менее 0,5 МэВ) для первого материала.

Таблица 3

Сравнение массовых характеристик образцов КМ и эталонов алюминия при их равной экранирующей способности

№ п.п.	Состав образца КМ (в % указано массовое содержание наполнителя)	Кратность ослабления	Массовая толщина, кг/м ²		Коэффициент отношения по массе
			образца КМ	эталона Al	
1	Эпофлекс-09	1,44	3,13	2,76	0,88
2	Эпофлекс-09 + 45 % W	2,22	4,28	5,19	1,21
3	Эпофлекс-09 + 63 % W	3,20	5,81	8,24	1,42
4	Эпофлекс-09 + 15 % Al ₂ O ₃ + 35 % W	2,12	3,94	4,88	1,24
5	Эпофлекс-09 + 25 % Al ₂ O ₃ + 25 % W	1,89	3,75	4,16	1,11
6	Эпофлекс-09 + 35 % Al ₂ O ₃ + 15 % W	1,64	3,35	3,38	1,01

Таблица 4

Количество квантов тормозного излучения, возникших в результате взаимодействия с мишенью электронов энергией 2,5 МэВ, нормированных к количеству первичных электронов

Мишень	Образцы КМ с содержанием наполнителя, %				АМг6
	0	45	63	63	
Толщина мишени, мм	2,5	2,5	2,5	1,85	2,0
Отношение количества γ -квантов к количеству первичных электронов	0,035	0,170	0,202	0,205	0,108

Таблица 5

Отношение количества электронов, прошедших мишень, к количеству первичных электронов с энергией 2,5 МэВ

Мишень	Образцы ПКМ с содержанием наполнителя, %				АМг6
	0	45	63	63	
Толщина мишени, мм	2,5	2,5	2,5	1,85	2,0
Отношение количества электронов за мишенью к количеству первичных электронов	1,025	0,542	0,192	0,425	0,846

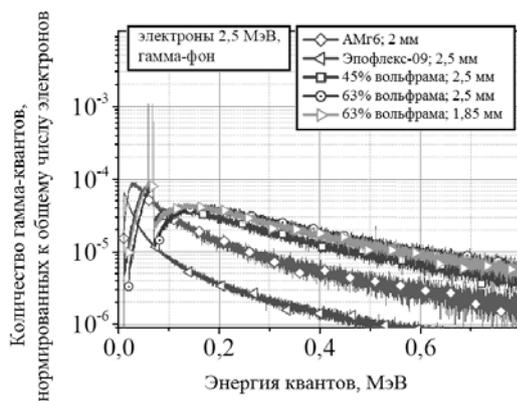


Рис. 4. Спектры тормозного излучения, возникшие в результате взаимодействия первичных электронов энергией 2,5 МэВ с веществом мишени

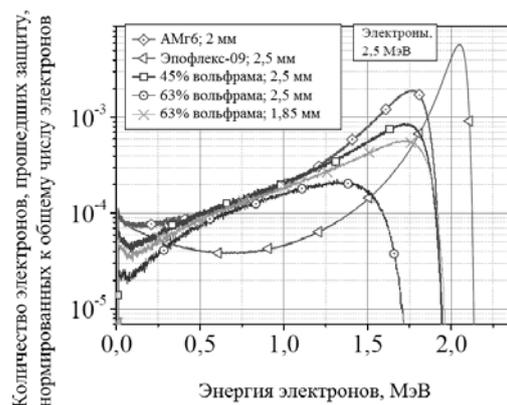


Рис. 5. Спектры электронов, прошедших мишень, нормированных к общему количеству первичных электронов энергией 2,5 МэВ

Используемые на сегодняшний день в качестве экранирующего материала алюминий и его сплавы могут быть заменены более эффективными по массово-защитным характеристикам ПКМ с наполнителями на основе высокодисперсных порошков тяжелых металлов.

Моделирование методом Монте-Карло прохождения потока электронов через исследуемые материалы защиты показало, что при выбранных критериях количественной оценки излучения эффективность экранирования образцами из ПКМ и АМг6 приблизительно одинаковая. В то же время экспериментально установлено, что ПКМ с содержанием наполнителя в количестве 63 % характеризуется на 30 % большей экранирующей способностью по сравнению с алюминием при равной массовой толщине. При этом количество электронов прошедших защиту из ПКМ значительно меньше по сравнению с алюминием.

Различие между результатами расчета и эксперимента, обусловлено тем, что моделирование учитывает все электроны и гамма-кванты за материалом защиты, а эксперимент – только те, что поглотились детектором. Таким образом, эксперимент в большей степени отражает дозовые нагрузки на объект защиты.

Для подтверждения эффективности полимерных КМ планируется проведение экспериментов по имитационному облучению наиболее критичных по отношению к излучению элементов РЭА до доз, приводящих к потере их функциональности.

Библиографические ссылки

1. Юдинцев В. Радиационно-стойкие интегральные схемы // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2007. № 5. С. 72–77.
2. Гобчанский О., Попов В., Николаев Ю. Повышение радиационной стойкости промышленных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры // *Современные технологии автоматизации*. 2001. № 4. С. 36–40.
3. International Atomic Energy Agency, Optimization of radiation protection in the control of

occupational exposure, Safety Report Series. No. 21. IAEA, Vienna. 2002. 66 p.

4. Анашин В. С. Проблемы обеспечения высоких сроков активного существования РЭА спутников связи // *Электросвязь*. 2009. № 4. С. 19–22.
5. Varga L., Horvath E. Evaluation of electronics shielding in micro-satellites. Technical memorandum: DRDC Ottawa TM 2003-017. Defence R&D Canada. Ottawa, 2003. 25 p.
6. Хаффнер Дж. Ядерное излучение и защита в космосе. М.: Атомиздат, 1971. 320 с.
7. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей. М.: Атомиздат, 1979. 304 с.
8. The radiation design handbook. ESA PSS-01-609 Issue 1. ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, 1993. 445 p.

References

1. Yudinsev V. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2007, no. 5, p. 72–77.
2. Gobchanskiy O., Popov V., Nikolaev Yu. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii*, 2001, no. 4, p. 36–40.
3. International Atomic Energy Agency, Optimization of radiation protection in the control of occupational exposure, Safety Report Series No. 21. IAEA, Vienna. 2002. 66 p.
4. Anashin V. S. *Elektrosvyaz'*, 2009, № 4, p. 19–22.
5. Varga L., Horvath E. Evaluation of electronics shielding in micro-satellites. Technical memorandum: DRDC Ottawa TM 2003-017. Defence R&D Canada. Ottawa, 2003. 25 p.
6. Khaffner Dzh. *Yadernoe izluchenie i zashchita v kosmose* (Nuclear radiation and protection in space). Moscow, Atomizdat, 1971, 320 p.
7. Murzin V. S. *Vvedenie v fiziku kosmicheskikh luchey* (Introduction to the physics of rays). Moscow, Atomizdat, 1979, 304 p.
8. The radiation design handbook. ESA PSS-01-609 Issue 1. ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, 1993. 445 p.