

14,12

Влияние протонного и гамма-излучения на полимерный композит

© В.И. Павленко¹, А.В. Носков², Р.В. Сидельников^{1,¶}, В.А. Шуршаков³, В.В. Кашибадзе¹, А.Ю. Ручий¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

³ Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

¶ E-mail: roman.sidelnikov@mail.ru

Поступила в Редакцию 31 августа 2023 г.

В окончательной редакции 17 ноября 2023 г.

Принята к публикации 29 ноября 2023 г.

Представлены результаты исследования полимерного композиционного материала, который может найти применение в качестве материала для длительной защиты космонавтов от радиационного воздействия в космосе. Проведен расчет линейного коэффициента ослабления гамма-квантов. При энергии гамма-квантов $E = 0.08$ MeV значение линейного коэффициента ослабления составляет 490.62 cm^{-1} , а при энергии $E = 1.252$ MeV коэффициент составляет лишь 0.26 cm^{-1} . Представлены результаты экспериментального воздействия протонного излучения на исследуемый полимерный композит. Облучение проводили протонным пучком на фазотроне Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна. При облучении дополнительно использовали алюминиевую пластину толщиной 4 mm, полиэтилен толщиной 5 cm, водяной поглотитель разных размеров. Рассчитаны значения поглощенной ($D_{\text{ETD}}(\text{H}_2\text{O}) = 17 \pm 1 \text{ mGy}$) и эквивалентной дозы ($H_{\text{ETD}}(\text{H}_2\text{O}) = 239 \pm 7 \text{ mSv}$) вторичных частиц за локальной защитой из полимерного композита.

Ключевые слова: полимерный композит, защита от космической радиации, линейный коэффициент ослабления гамма-квантов, облучение пучком протонов.

DOI: 10.61011/FTT.2024.01.56949.193

1. Введение

Для развития космических программ необходимо разрабатывать методы, средства и материалы, которые будут обеспечивать надежную защиту космонавтов от негативных факторов космического пространства, среди которых одним из самых опасных для человека является космическая радиация [1,2]. Ее составляющими являются галактическое космическое излучение, которое состоит из непрерывного изотропного потока высокоэнергетических протонов и тяжелых ионов (90% простых протонов, 9% α -частиц и 1% других тяжелых ионов, таких как железо (Fe), кислород (O), неон (Ne), углерод (C), магний (Mg) и кремний (Si)), поступающего из-за пределов Солнечной системы, и солнечных частиц, представляющих собой спорадические импульсы протонов высокой энергии [3,4]. В работе [5] отмечалось, что во время вспышек на Солнце необходимо учитывать еще и гамма-излучение. Максимально зарегистрированная энергия гамма-квантов солнечных вспышек составила 300 MeV, а мощность дозы радиации — около $2 \cdot 10^{-6} \text{ J/s}$, что эквивалентно $3.4 \cdot 10^{-6} \text{ Rem/s}$ [5]. Так же для космонавтов представляет опасность нейтронный фон внутри космических аппаратов в виде вторичного излучения вследствие взаимодействия галактического космического излучения и солнечных космических лучей, а также про-

тонов, захваченных в радиационных поясах Земли, с ядрами химических элементов, составляющих верхнюю атмосферу Земли и материалов самой орбитальной станции [6,7].

На данный момент основными конструкционными материалами в космической сфере остаются алюминий и полиэтилен, но проведенные многочисленные исследования, включая моделирование и исследовательские миссии, показывают, что данные материалы не обеспечивают достаточной защиты от космической радиации, поэтому необходимо либо их замена, либо установка дополнительной защиты [8–11]. Возможность установки дополнительной защиты из водосодержащих материалов исследовали на российском сегменте МКС, где была собрана „Шторка защитная“. Средняя толщина такой защиты составляет 6.3 g/cm^2 . Далее при помощи комбинации пассивных детекторов были зафиксирована средняя мощность поглощенной дозы и эквивалентной дозы за защитный шторкой и сбоку от нее. Для незащищенных мест показания составили $327 \mu\text{Gy/day}$ и $821 \mu\text{Sv/day}$, а для защищенных $224 \mu\text{Gy/day}$ и $575 \mu\text{Sv/day}$, соответственно [12]. Это говорит об возможности использования дополнительной защиты, но для эффективного использования на космических аппаратах необходимо учитывать занимаемый полезный объем такой защиты и обеспечение защиты от радиации в широком диапазоне энергий.

Существует множество разработок, которые, в перспективе, можно будет использовать на борту космических кораблей для обеспечения защиты от космической радиации [13,14]. Каждая из них перед непосредственным применением нуждается в проверке путем моделирования прохождения через данные материалы космического излучения и экспериментального воздействия негативными факторами космического пространства [15]. Например, известна работа, направленная на защиту от нейтронного космического излучения при помощи полимерного композита на основе эпоксидной матрицы, армированной полиэтиленовым, углеродным и базальтовым волокном, а также WO_3 и BC_4 в качестве наполнителей. Было произведено моделирование методом Монте-Карло для исследования защиты от нейтронного излучения. Обнаружено, что соединение бора имеет решающее значение для защиты от тепловых нейтронов, а эффективность защиты от быстрых нейтронов в основном зависит от типа волокна. Главное преимущество данного материала является малый вес [16]. Но в погоне за повышением нейтронно-защитных характеристик остальные необходимые свойства для использования в космосе не изучены.

Интересна работа [17], в которой было произведено моделирование методом Geant4 Монте-Карло прохождение ионов Fe с энергиями 500 MeV/n, 1 GeV/n и 2 GeV/n через множество материалов для исследования их экранирующих свойств. Обнаружено, что ${}^6Li^{10}BH_4$ является наиболее эффективным водородосодержащим материалом из исследуемых, обеспечивая снижение дозы облучения на 20% больше, чем полиэтилен. Отметим, что углепластик обеспечивает снижение дозы облучения в 1.9 раза по сравнению с алюминием, при этом обладая и высокой механической прочностью. Данная работа подтверждает наличие большого количества материалов, которые можно использовать для защиты от космического излучения взамен используемых сейчас, но даже их внедрение не обеспечит такого уровня защиты, при котором возможны длительные космические миссии.

В настоящей работе представлены результаты исследования полимерного композита для защиты от космической радиации. Изучены его физико-механические характеристики и представлены экспериментальные значения защиты от гамма- и протонного излучения.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Исследуемый композит

В БГТУ им. В.Г. Шухова совместно с Центром подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина был разработан полимерный композиционный материал, который может быть использован для длительной защиты космонавтов от радиационного воздействия в космосе. Полимерный композит представляет собой фторопластовую матрицу

Таблица 1. Атомарный химический состав полимерного защитного композита

	Элемент				
	Bi	O	C	F	W
Содержание в композите, mass%	52.47	6.03	9.42	29.26	2.82

Примечание. Более подробно описание состава и синтеза композита представлено в [18].

с модифицированными радиационно-защитными наполнителями. Химический атомарный состав материала представлен в табл. 1.

2.2. Облучение композита протонами

Облучение полимерного композита проводили протонным пучком на фазотроне Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна. При облучении дополнительно использовали алюминиевую пластину толщиной 4 mm, полиэтилен толщиной 5 cm, водяной поглотитель разных размеров. Для облучения был изготовлен цилиндр из исследуемого полимерного композита, конструкция цилиндра (контейнера) представлена на рис. 1.

Схема облучения представлена на рис. 2.

Для измерения поглощенной дозы использовались пассивные датчики — твердотельные трековые детекторы (далее ТТД) марки TD-1/HARZLAS (изготовитель Fukuvi Chemical Industry Co. Ltd., Фукуй, Япония) размером 25 × 25 mm и толщиной 0.9 mm с порогом регистрации линейной передачи энергии (далее ЛПЭ) 10 keV/μm (H_2O), что соответствует, например, энергии протонов 5...10 MeV (протоны с энергией выше указанной, не образуют треки в веществе ТТД, однако могут участвовать в актах ядерной фрагментации, в результате которой образуются вторичные частицы с ЛПЭ выше порога) [19].

После облучения проводили травление детекторов, промывка и последующее сканирование поверхности детекторов в полуавтоматическом режиме на модифицированном полуавтоматическом оптическом микроскопотографе SEIKO® FlexSCOPE FSP-1000 [20].

Параметры треков заряженных частиц были распознаны с помощью в специализированной программе распознавания и анализа цифровых изображений SEIKO® PitFit v. 2.0.

Выходные файлы текстовых данных были импортированы в программу MATLAB® и подвергнуты статистической обработке. Для определения относительной скорости травления V в каждом треке использовался так называемый „классический“ метод, когда входными параметрами являются размеры большой A и малой B

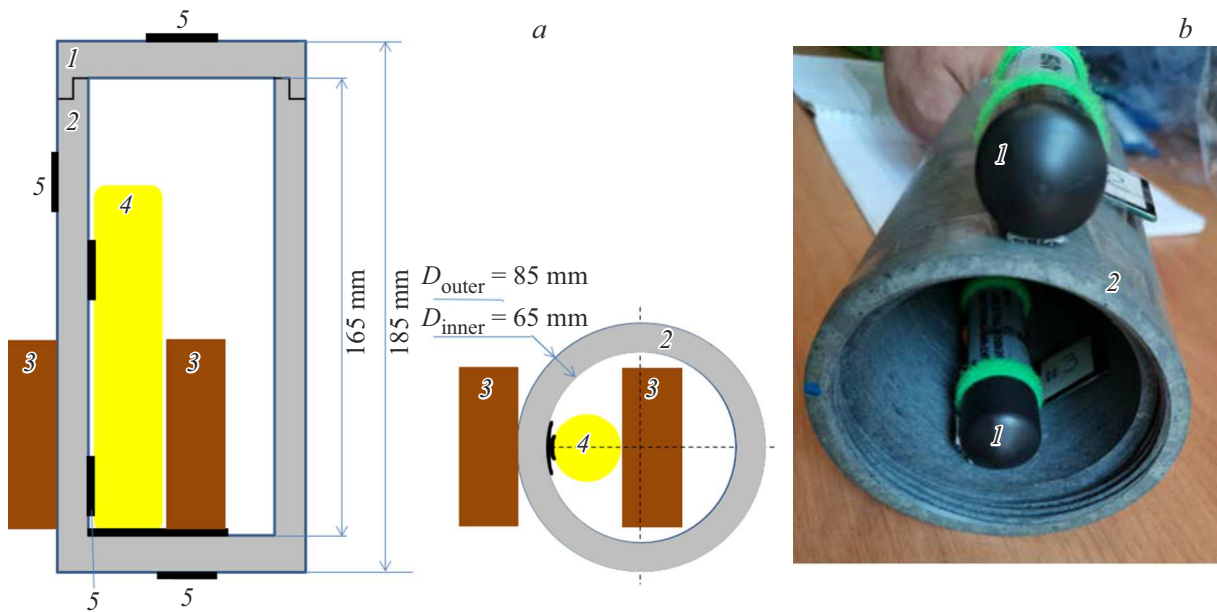


Рис. 1. Радиационно-защитный экран в виде контейнера с датчиками: *a* — модель конструкции: 1 — крышка контейнера, 2 — корпус контейнера, 3 — сборка с пассивными детекторами ТЛД и ТТД, 4 — детектор „ПИЛЛЕ-МКС“, 5 — застежка „Велькро“; *b* — фотография контейнера из полимерного композита при проведении облучения на фазотроне: 1 — датчик „ПИЛЛЕ-МКС“, 2 — контейнер.



Рис. 2. Схема облучения полимерного композита на фазотроне (красной стрелкой указано направление выхода пучка протонов из канала фазотрона), где: 1 — фазотрон, 2 — алюминиевый экран толщиной 4 мм, 3 — водяной поглотитель (в данном эксперименте не использовался), 4 — датчик „ПИЛЛЕ-МКС“ и сборка с пассивными детекторами ТЛД и ТТД, 5 — полимерный композит.

осей входного эллипса [21]:

$$V = \frac{V_t}{V_b} = \sqrt{\frac{16H_0^2 A^2}{(4H_0^2 - B^2)^2} + 1}. \quad (1)$$

Полученные значения скоростей травления пересчитывались затем в величину ЛПЭ, с использованием калибровочной функции, заранее определенной для данного типа детектора [19].

Далее, производился расчет дифференциальных спектров ЛПЭ, поглощенной и эквивалентной (в соответствии с рекомендациями МКРЗ [22]) дозы в соответствии со стандартной процедурой, описанной в работе [23].

2.3. Методы испытаний

Для определения механических характеристик композита использовали машину испытательную универсальную РЭМ-100-А-1-1 с верхним диапазоном измерений нагрузки 100 кН. Производитель ООО „Метротест“, Республика Башкортостан, г. Нефтекамск.

Микрофотографии материала выполнены на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU. Микрофотографии были сделаны в режиме SE — детектор вторичных электронов типа Эверхарта–Торнли.

Зондовая сканирующая микроскопия проведена на сканирующем зондовом микроскопе „Ntegra-Aura“. Исследования выполнены в режимах постоянного или прерывистого контактов на приборе „Ntegra-Aura“ (Компания НТ-МДТ, г. Зеленоград, Россия) с использованием коммерческих Si или SiN кантилеверов (NSG01, NT-MDT, Россия) в условиях атмосферы и низкого вакуума. Анализ параметров шероховатости поверхности проводился на площади 100 × 100 μm.

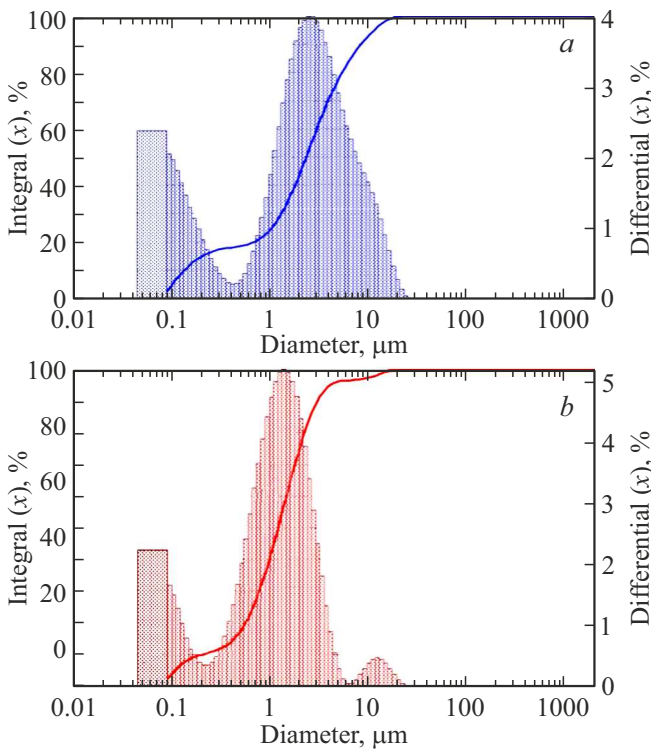


Рис. 3. Фракционный состав порошков первого (а) и второго (b) наполнителей.

Микротвердость образцов определялась методом статического вдавливания наконечника — алмазной пирамиды Виккерса, с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка и пересчетом значения длин диагоналей в значения твердости по Виккерсу (HV) на твердомере Nexus 4504-IMP.

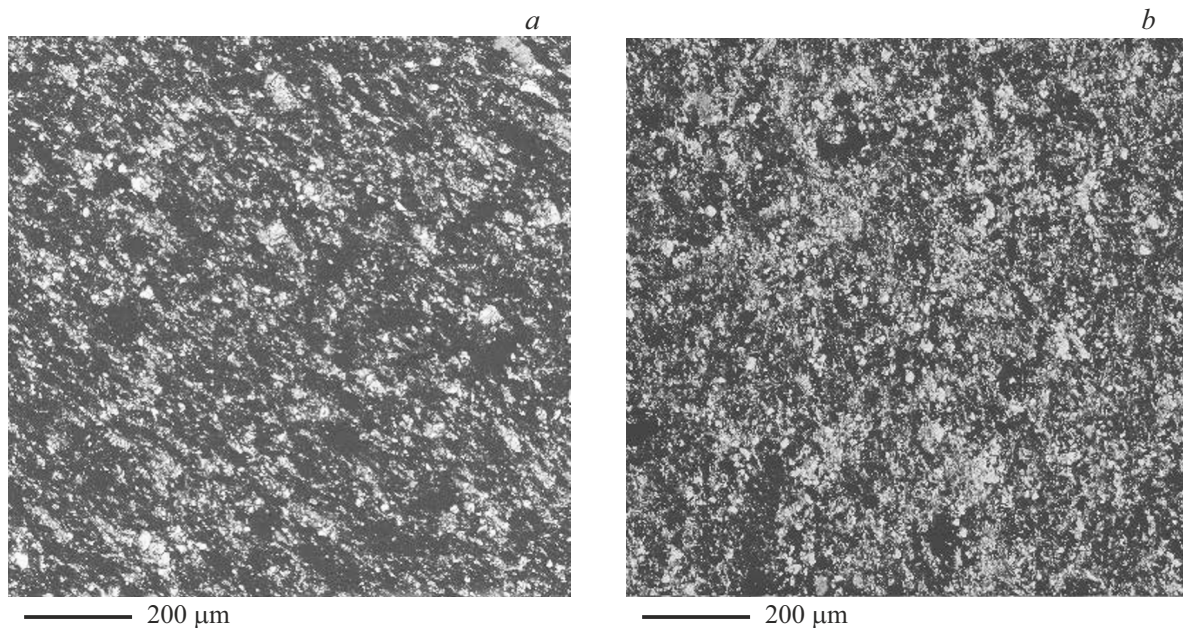


Рис. 4. Микрофотографии поверхности полимерного композита: а — наружная поверхность; b — поперечный срез.

Модуль упругости рассчитывался по формуле (2) при помощи измерителя времени распространения ультразвука ПУЛЬСАР-1.2

$$E = \frac{\gamma V^2}{0.95} \cdot 10^3, \quad (2)$$

где E — модуль упругости, Па, V — числовое значение скорости ультразвука, м/с, γ — объемный вес, г/см³.

Оценка краевого угла смачивания проводилась с использованием прибора Krüss DSA 30 (KrüssGmbH, Германия).

Гранулометрический состав порошковых материалов определялся методом лазерной гранулометрии на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTec plus.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Исследования физико-механических свойств полимерного композита

Для изучения влияния размеров частиц наполнителя на структуру полимерного композита был проведен гранулометрический анализ порошковых материалов. Фракционный состав двух различных наполнителей представлен на рис. 3, а, b.

Анализ данных по гранулометрии показал, что размеры частиц первого наполнителя находятся в диапазоне от 0.08 мкм до 25.9 мкм, модальный диаметр частиц 0.09 мкм, а удельная поверхность частиц 106489 см²/см³. Второй наполнитель имеет размеры частиц в диапазоне от 0.09 мкм до 24.7 мкм, модальный диаметр частиц 10.31 мкм, удельная поверхность частиц 108 268 см²/см³.

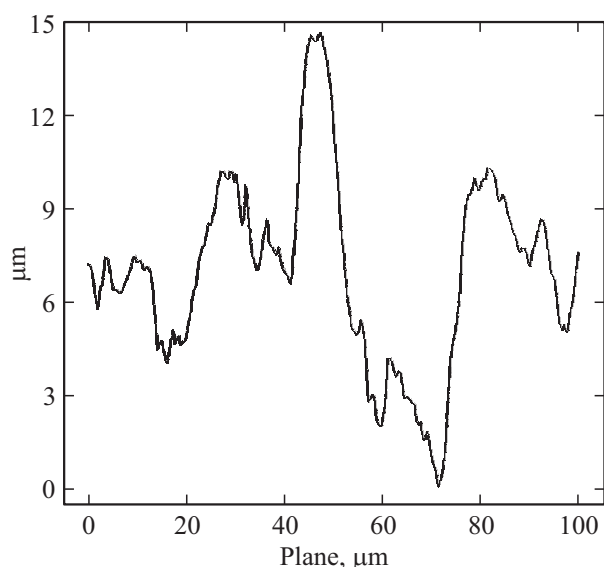


Рис. 5. 2-D АСМ-изображение поверхности полимерного композита.

Для изучения микроструктуры поверхности полимерного композита были получены микрофотографии его поверхности в режиме SE — детектор вторичных электронов типа Эверхарта–Торнли, которые и представлены на рис. 4.

На микрофотографиях поверхности полимерного композита обнаружены шероховатости с впадинами $15\ \mu\text{m}$, размер которых может быть обусловлен размером частиц наполнителя, что подтверждается анализом фракционного состава наполнителей, для более детального изучения была проведена зондовая сканирующая микроскопия и представлена на рис. 5.

По результатам зондовой сканирующей микроскопии значения шероховатости составляют: средняя шерохо-

Таблица 2. Твердость полимерного композита по Виккерсу

Место измерения	Твердость по Виккерсу, HV (при нагрузке 200 g)
Наружняя поверхность	5.03
Поперечный срез	4.93

ватость (S_a) $2.17\ \mu\text{m}$; S_z — десять точек по высоте $7.82\ \mu\text{m}$; S_q — среднеквадратичная шероховатость $2.74\ \mu\text{m}$, максимальная шероховатость $14.71\ \mu\text{m}$.

Наполнители распределены равномерно по всему объему материала, отсутствуют крупные агломераты частиц, вследствие чего можно ожидать, что физико-механические и радиационно-защитные характеристики будут идентичными в различных точках исследования.

Далее для исследования твердости полимерного композита было определена микротвердость с последующим пересчетом в значение твердости по шкале Виккерса.

Изображение отпечатка индентора микротвердомера при измерении микротвердости при нагрузке 200 g представлены на рис. 6.

Результаты микротвердости представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, твердость по Виккерсу практически совпадает на поверхности полимерного композита с аналогичной во внутреннем объеме. Небольшое различие в $0.10\ \text{HV}$ можно объяснить повреждением связи между слоями материала во время среза.

Для более детального изучения данного вопроса был исследован предел прочности на изгиб образцов полимерного композита в виде прямоугольников размером $50 \times 10 \times 7\ \text{mm}$ методом 3-точечного изгиба. График испытания предела прочности на изгиб представлены на рис. 7.

Было исследовано 5 образцов полимерного композита, минимальный результат предела прочности на изгиб

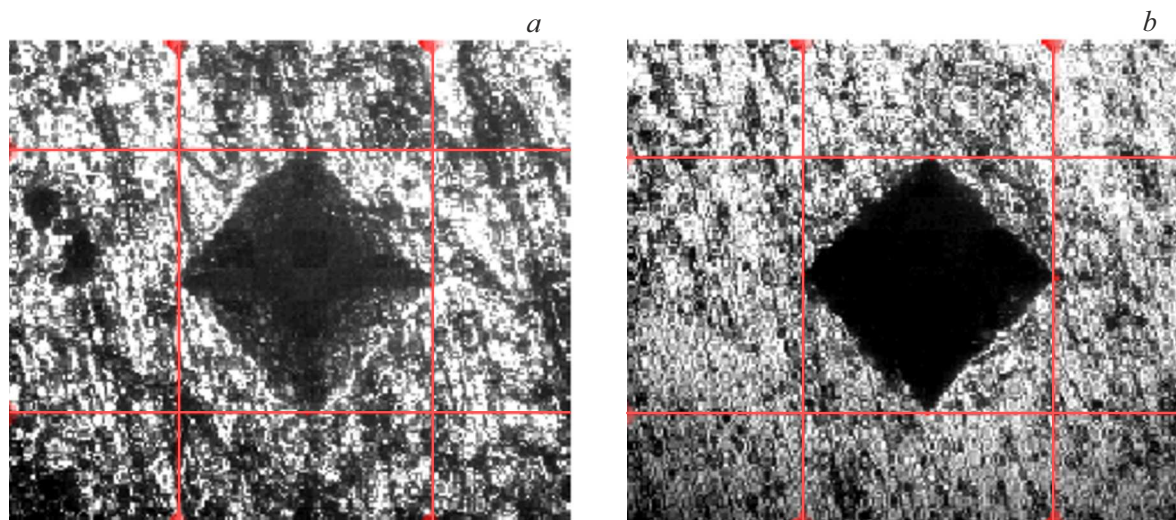


Рис. 6. Изображение отпечатка индентора микротвердомера при измерении микротвердости при нагрузке 200 g: *a* — наружная поверхность; *b* — поперечный срез.

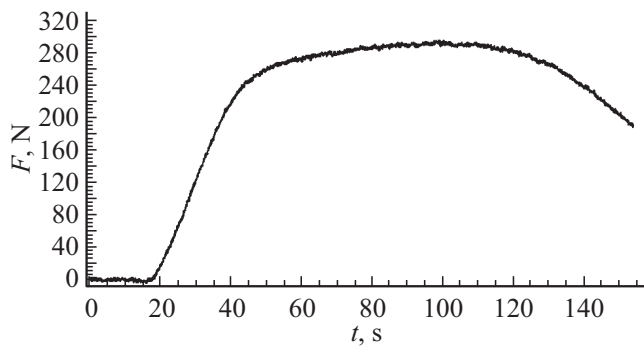


Рис. 7. Кривые зависимости приложенной нагрузки от времени для образца полимерного композита.

составил 17.1 МПа (максимальная нагрузка 315 N), а максимальный 20.8 МПа (максимальная нагрузка 414 N), среднее значение предела прочности на изгиб 19 МПа (средняя максимальная нагрузка 341 N). Значения максимальной деформации варьируются от 1.2 mm до 1.3 mm.

Так же был рассчитан модуль упругости полимерного композита ультразвуковым методом по формуле (2). Ультразвуковой метод основан на зависимости скорости распространения ультразвуковых колебаний (волн) в материалах от их упругости, результаты представлены в табл. 3, где точка 1 — измерение в верхней части кон-

Таблица 3. Модуль упругости полимерного композита

Замеры полимерного композита			
Точка 1			
	Замер 1	Замер 2	Замер 3
V , m/s	2472	2459	2468
V_{av} , m/s		2466.33	
T	66.77	66.95	66.82
T_{av}		66.84	
E , GPa		26.25	
Точка 2			
	Замер 1	Замер 2	Замер 3
V , m/s	2437	2429	2426
V_{av} , m/s		2430.66	
T	67.75	67.89	67.79
T_{av}		67.81	
E , GPa		25.50	
Точка 3			
	Замер 1	Замер 2	Замер 3
V , m/s	2459	2437	2426
V_{av} , m/s		2440.66	
T	67.89	66.95	66.77
T_{av}		67.20	
E , GPa		25.71	
M , g		253.7	

Таблица 4. Значения физико-механических характеристик полимерного композита

Параметр	Значение
Плотность, g/cm ³	4.05
Микротвердость по Виккерсу HV/1 (нагрузка 200 g), HV	5.03
Предел прочности на изгиб, МПа	19
Модуль упругости, GPa	25.82
Краевой угол смачивания водой, °	100.98 ± 2.60
Краевой угол смачивания дийодометаном, °	57.50 ± 8.33

тейнера, точка 2 — измерение в середине контейнера, точка 3 — измерение в нижней части контейнера.

Стабильные показатели модуля упругости позволяют говорить о том, что структура контейнера достаточно однородна и значительных внутренних дефектов не обнаружено.

Для изучения свойств поверхности полимерного композита был изучен краевой угол смачивания. На рис. 8 представлены изображения лежащей капли дистиллированной воды и дийодометана на поверхности полимерного композита.

Результаты краевого угла смачивания показали, что поверхность полимерного композита хорошо смачивается дийодометаном (52.1° и 54.4°), а для воды данная поверхность несмачиваемая (102.5° и 103.4°).

Дийодометан был выбран для измерения краевого угла смачивания на поверхности композита, поскольку он является неполярным растворителем, он необходим для оценки вклада полярной и дисперсной (неполярной) составляющих в свободную энергию поверхности, которую можно будет вычислить по модели Оуэнса–Вендта–Рабеля–Ксельбле (ОВРК, OWRK).

Значения физико-механических характеристик полимерного композита представлены в табл. 4.

Таким образом показано, что полимерный композит обладает достаточно высокими физико-механическими характеристиками. Далее были проведены исследования защитных свойств данного композита по отношению к гамма- и протонному облучению.

3.2. Исследования гамма-защитных свойств полимерного композита

Оценка гамма-защитных свойств полимерного композита проводилась теоретически, исходя из атомарного состава полимерного композита (табл. 1). Ослабление гамма-излучения происходит за счет фотоэффекта, эффекта Комптона и эффекта образования электрон-позитронных пар.

Формула расчета коэффициента ослабления потока гамма-квантов за счет фотоэффекта для полимерного

Таблица 5. Значения линейного коэффициента ослабления гамма-квантов

	Линейный коэффициент ослабления, см ⁻¹			
	<i>E</i> = 0.08 MeV	<i>E</i> = 0.570 MeV	<i>E</i> = 0.662 MeV	<i>E</i> = 1.252 MeV
Фторопласт (состав 1)	$\mu = 0.407$	$\mu = 0.171$	$\mu = 0.16$	$\mu = 0.118$
Полимерный композит (состав 2)	$\mu = 490.616$	$\mu = 0.647$	$\mu = 0.516$	$\mu = 0.261$
Полиэтилен (состав 3)	$\mu = 0.191$	$\mu = 0.092$	$\mu = 0.086$	$\mu = 0.064$

композиита

$$\mu_f = 4\pi r_e^2 \alpha^4 N_a \left(\rho_{Bi} \frac{Z_{Bi}^5}{A_{Bi}} + \rho_O \frac{Z_O^5}{A_O} + \rho_C \frac{Z_C^5}{A_C} + \rho_F \frac{Z_F^5}{A_F} + \rho_W \frac{Z_W^5}{A_W} \right) G_{fot}(E), \quad (3)$$

где ρ_i — плотность соответствующего элемента, Z_i — порядковый номер соответствующего элемента, A_i — атомная масса соответствующего элемента, N_A — число Авогадро, равное $6.02 \cdot 10^{23}$, $r_e = e^2/m_e c^2 = 2.8 \cdot 10^{-13}$ см — классический радиус электрона, $\alpha = 1/137$ — постоянная тонкой структуры, G_{fot} — сечение процесса фотоэффекта на атоме [24].

Расчет коэффициента ослабления потока гамма-квантов за счет эффекта Комптона через полимерный композит представлен формулой

$$\mu_K = N_a \left(\rho_{Bi} \frac{Z_{Bi}}{A_{Bi}} + \rho_O \frac{Z_O}{A_O} + \rho_C \frac{Z_C}{A_C} + \rho_F \frac{Z_F}{A_F} + \rho_W \frac{Z_W}{A_W} \right) \sigma_K, \quad (4)$$

где σ_K — сечения процесса комптоновского рассеяния гамма кванта на электроне [24].

Коэффициент ослабления потока γ -квантов за счет эффекта образования электрон-позитронных пар в полимерном композите

$$\begin{aligned} \mu_p = r_e^2 \alpha N_a \left(\frac{\rho_{Bi}}{A_{Bi}} Z_{Bi}(Z_{Bi} + 1) + \frac{\rho_O}{A_O} Z_O(Z_O + 1) + \frac{\rho_C}{A_C} Z_C(Z_C + 1) + \frac{\rho_F}{A_F} Z_F(Z_F + 1) + \frac{\rho_W}{A_W} Z_W(Z_W + 1) \right) \left[\frac{28}{9} \ln(2\varepsilon) - \frac{218}{27} \right], \quad (5) \end{aligned}$$

где $\varepsilon = E/m_e c^2$.

Суммарный коэффициент ослабления γ -квантов в полимерном композите состоит из суммы коэффициентов ослабления от каждого процесса

$$\mu = \mu_f + \mu_k + \mu_p. \quad (6)$$

Для наглядного представления результатов полученные значения для полимерного композита (далее состав 2) будут сравниваться со значениями наиболее распространенных полимеров, а именно с фторопластом

(далее состав 1) и с полиэтиленом (далее состав 3), плотность которых 2.2 и 1.0 г/см³ соответственно.

График зависимости коэффициента ослабления γ -квантов от их энергии представлен на рис. 9.

Как видно из графика коэффициент ослабления γ -квантов полимерным композитом во всем диапазоне энергий выше в 2 и более раз, чем у представленных для сравнения полимерах. Особое внимание следует уделить диапазону энергий от 0.01 до 0.5 MeV, на котором видно, что предложенные полимеры практически не ослабляют гамма-кванты при низких энергиях, в отличие от предложенного полимерного композита. С увеличением энергии происходит постепенное сближение и выравнивание кривых, с ориентировочной стабилизацией в районе 2–3 MeV.

Численные значения линейного коэффициента ослабления гамма-квантов представлены в табл. 5.

При малых энергиях сравниваемые полимеры (состав 1 и состав 3) более чем в 490 раз менее эффективны (при энергии 0.08 MeV), по сравнению с предложенным полимерным композитом (табл. 5). Но с увеличением энергии разница уменьшается, но все равно остается значительно выше, чем у сравниваемых полимеров.

Далее для оценки вклада фотоэффекта и эффекта Комптона в суммарный коэффициент ослабления гамма-квантов были построены кривые зависимости ослабления гамма-квантов от их энергии для каждого эффекта в отдельности в полимерном композите и представлены на рис. 10. Рассчитанный вклад рождения электрон-позитронных пар в суммарный коэффициент ослабления гамма-квантов в заданном диапазоне энергий практически равен нулю (а при энергиях ниже 1.022 MeV вообще отсутствует), поэтому не представлен на рисунке.

Основной вклад в ослаблении гамма-квантов фотоэффекта приходится на диапазон энергий от 0.01 до 0.5 MeV, практически не внося вклад в случае с составом 3 и в меньшей степени для состава 1. При энергии 0.5 MeV вклад фотоэффекта и эффекта Комптона для составов 1 и 2 примерно одинаков, после чего основное ослабление происходит за счет эффекта Комптона. Такие результаты гамма-защитных характеристик объясняются высокой плотностью полимерного композита за счет высокого содержания Bi в составе, который равномерно распределен во всем объеме.

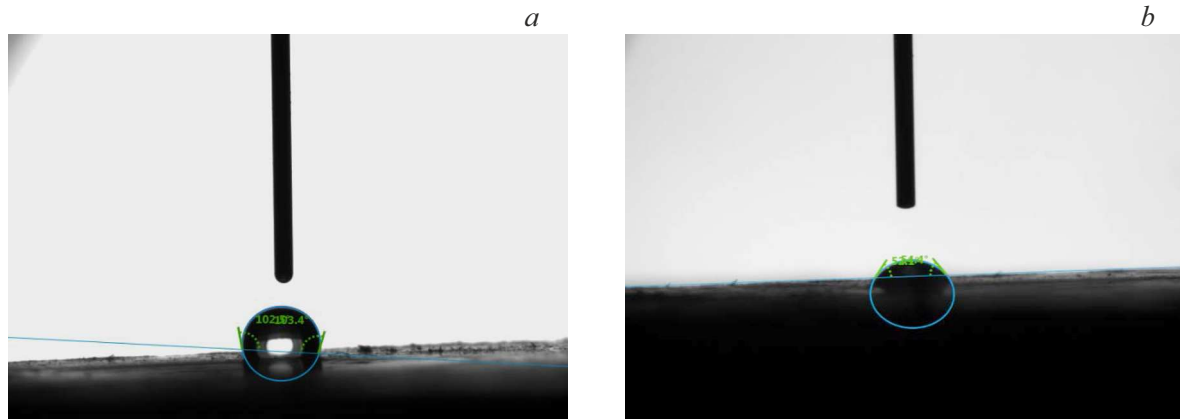


Рис. 8. Изображения лежащей капли на поверхности полимерного композита: *a* — вода, *b* — диiodометан.

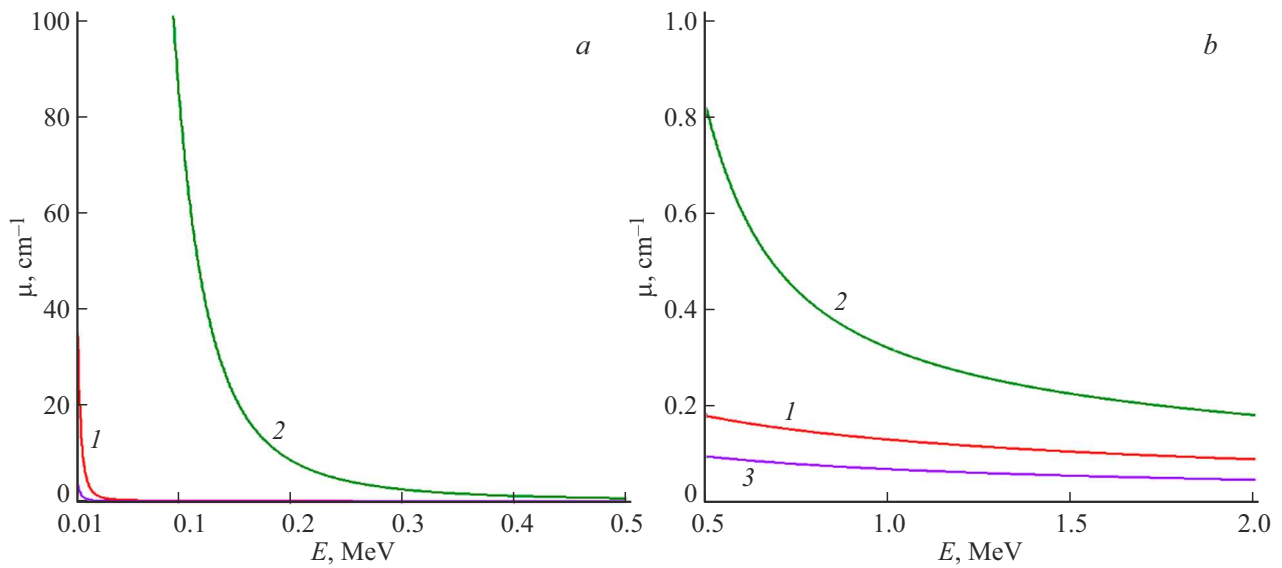


Рис. 9. График зависимости коэффициента ослабления γ -квантов от их энергии: *a* — от 0.01 до 0.5 MeV; *b* — от 0.5 до 2 MeV (*1* — фторопласт, *2* — полимерный композит, *3* — полиэтилен).

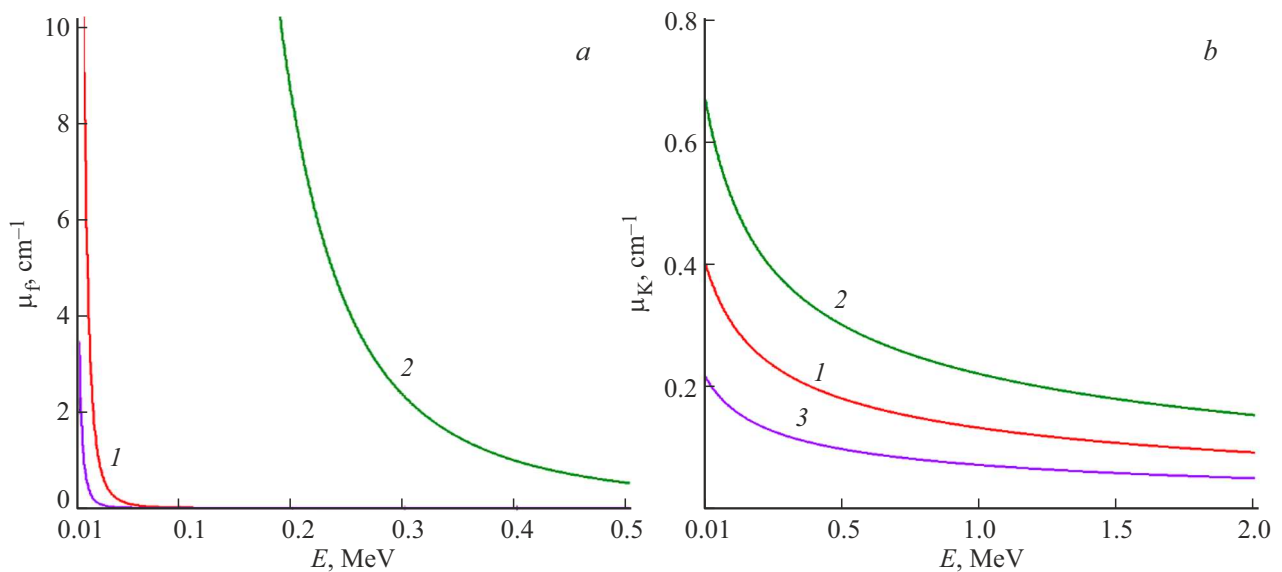


Рис. 10. Вклад фотоэффекта (μ_f) и эффекта Комптона (μ_k) в суммарный коэффициент ослабления в полимерном композите.

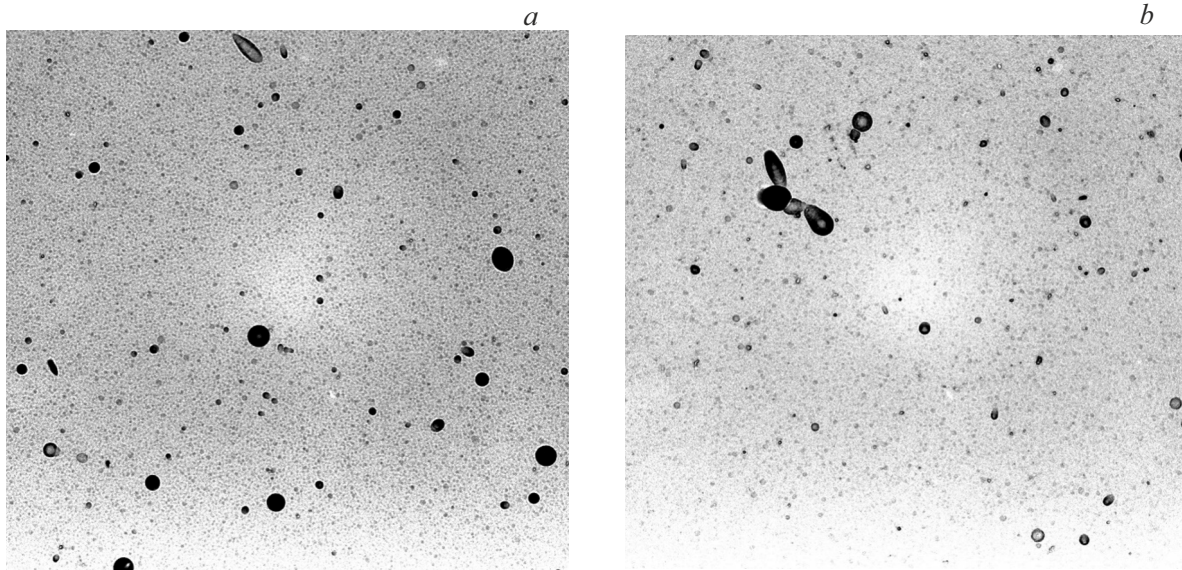


Рис. 11. Треки вторичных заряженных частиц, образованных в объеме ТТД после облучения на пучке протонов за локальной защитой: Al толщиной 4 mm + борированный п/э толщиной 5 cm (a), Al толщиной 4 mm + полимерный композит толщиной 1 cm (b).

4. Экспериментальные исследования по облучению полимерного композита протонным пучком

После облучения на пучке протонов за двумя сборками локальной защиты (Al толщиной 4 mm + борированный (плотность 0.94 g/cm^3) полиэтилен (п/э) толщиной 5 cm, Al толщиной 4 mm + полимерный композит толщиной 1 cm) проводилось травление детекторов. На рис. 11 представлена поверхность детекторов после травления и промывки. Площадь каждого изображения 0.044 mm^2 .

Как видно по представленным изображениям количество треков за защитой из борированного полиэтилена значительно больше, чем за защитой из полимерного композита. При этом толщина локальной защиты полимерного композита в 5 раз меньше, чем таковой у борированного полиэтилена.

Далее были получены спектры ЛПЭ. Полученные спектры ЛПЭ, нормированные на дозу приходящего первичного (протонного) излучения (по данным ТЛД) в соответствии с рекомендациями [19], представлены на рис. 12.

Как видно из представленного рисунка, за локальной защитой (Al толщиной 4 mm + полимерный композит толщиной 1 cm), по сравнению с локальной защитой (Al толщиной 4 mm + борированный п/э толщиной 5 cm), наблюдается заметное снижение флюенса вторичных частиц, в области ЛПЭ $< 40 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O), что может быть связано с меньшим выходом нейтронов с энергиями менее $0.5 \dots 1 \text{ MeV}$, ответственных за формирование одиночных треков протонов отдачи [25]. В то же время, наблюдается увеличение флюенса тяжелых

сильноионизирующих фрагментов с ЛПЭ от 50 до $200 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O), а также появления фрагментов с ЛПЭ $> 250 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (H_2O), которые в спектре за защитой (Al толщиной 4 mm + борированный п/э толщиной 5 cm) не наблюдаются. За формирование данной части спектра ответственны как первичные протоны с энергиями более 50 MeV (прошедшие локальную защиту, и взаимодействовавшие с веществом ТТД), так и вторичные нейтроны с энергиями порядка $10 \dots 20 \text{ MeV}$ (образовавшиеся в локальной защите, и взаимодействовавшие с веществом ТТД) [26]. С радиобиологической точки зрения, наибольшими значениями относительной

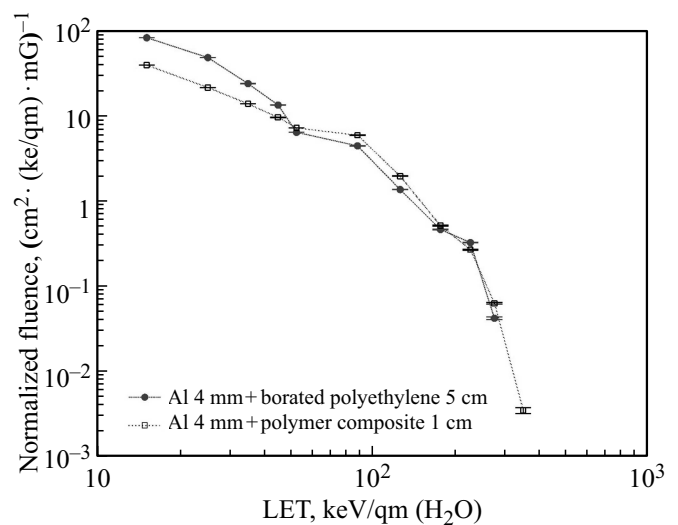


Рис. 12. Спектры ЛПЭ вторичных заряженных частиц, измеренные с помощью ТТД за двумя сборками локальной защиты.

Таблица 6. Рассчитанные значения поглощенной и эквивалентной дозы вторичных частиц, за различной локальной защитой

Материал локальной защиты	$D_{\text{ЕТД}}$, mGy (H ₂ O)	Вклад в суммарную поглощенную дозу, %	$H_{\text{ЕТД}}$, mSv (H ₂ O)	Вклад в суммарную эквивалентную дозу, %
Al толщиной 4 mm + борированный п/э толщиной 5 cm	17 ± 1	11%	239 ± 7	9%
Al толщиной 4 mm + полимерный композит толщиной 1 cm	15 ± 1	63%	261 ± 8	64%

биологической эффективности (ОБЭ) обладают частицы с ЛПЭ от 80 до 300 keV/μm (H₂O) [27], наиболее важным является максимальное снижение вклада частиц в данной области спектра ЛПЭ.

Рассчитанные значения поглощенной $D_{\text{ЕТД}}$ и эквивалентной $H_{\text{ЕТД}}$ дозы (по данным ТТД) представлены в табл. 6. Вклад поглощенной $D_{\text{ЕТД}}$ и эквивалентной $H_{\text{ЕТД}}$ дозы ТТД в суммарную дозу определен как отношение соответствующего значения к полной величине, определенной как сумма дозы ТТД (вторичная компонента) и ТЛД (первичная компонента) [28].

Как видно из данных табл. 6, значения поглощенной дозы $D_{\text{ЕТД}}$ в обоих случаях практически совпадают в пределах погрешности измерения. В то же время значение эквивалентной дозы $H_{\text{ЕТД}}$ оказывается больше за более тяжелой защитой (полимерный композит) за счет наличия тяжелых сильноионизирующих продуктов ядерной фрагментации. В целом, оба значения эквивалентной дозы $H_{\text{ЕТД}}$ согласуются в пределах 20...30%, допустимых для различного типа дозиметрических измерений, поэтому данные результаты не могут рассматриваться как качественно отличающиеся друг от друга.

Увеличение выхода более тяжелых осколков ядер С, О может быть связанным как со снижением энергии налетающих протонов (полное сечение ядерных взаимодействий растет с уменьшением энергии от 160 MeV вплоть до 50 MeV) [29,30], так и с увеличением выхода высокоэнергетических нейтронов (10...20 MeV) [25,26] из материала полимерного композита. Приведенные в таблице вклады поглощенной и эквивалентной дозы ТТД в два раза выше аналогичных значений, полученных ранее на пучках протонов 157 MeV без использования локальной защиты [31]. Этот результат может свидетельствовать о влиянии вторичного нейтронного компонента, ответственного за дополнительную генерацию ядерных фрагментов в материале ТТД.

Таким образом, результаты сравнительных измерений спектров ЛПЭ и доз вторичных ядерных фрагментов за двумя типами локальной защиты (Al толщиной 4 mm + полимерный композит толщиной 1 cm) и (Al толщиной 4 mm + борированный п/э толщиной 5 cm) демонстрируют примерно одинаковую эффективность защитных свойств выбранных материалов. По сравнению с (Al толщиной 4 mm + борированный п/э толщиной 5 cm), полимерный композит подвывает выход вторичных частиц в материале ТТД с ЛПЭ < 40 keV/μm

(H₂O) за счет снижения энергии протонов, в то же время увеличивается выход ядерных фрагментов с ЛПЭ от 50 до 200 keV/μm, и более 250 keV/μm (H₂O), имеющих наибольшую биологическую эффективность. С точки зрения интегральных поглощенной и эквивалентной дозы, накопленной в материале ТТД (имитирующем мягкую биологическую ткань), существенной разницы от использования двух типов защитных материалов не наблюдается. Но существенным фактором является толщина используемой защиты, так как толщина локальной защиты из полимерного композита в 5 раз тоньше, чем из полиэтилена.

Возможна комбинация полимерного композита с борированным полиэтиленом в виде сборки в несколько слоев для защиты во всем диапазоне энергий из-за использования преимуществ обоих материалов.

5. Заключение

Установлена возможность получения полимерного композиционного материала с высокими физико-механическими характеристиками: плотность — 4.05 g/cm³, микротвердость по Виккерсу при нагрузке 200 g — 5.03 HV, модуль упругости — 25.82 GPa.

Проведенный расчет линейного коэффициента ослабления гамма-квантов показал высокие защитные свойства полимерного композита по отношению к гамма-излучению: при энергии $E = 0.08$ MeV значение μ составляет 490.62 cm⁻¹, а при энергии $E = 1.252$ MeV коэффициент составляет лишь 0.26 cm⁻¹.

Облучение полимерного композита протонным пучком также показало его высокие радиационно-защитные свойства. При облучении протонами сборки Al толщиной 4 mm + полимерный композит толщиной 1 cm было обнаружено заметное снижение флюенса вторичных частиц, в области ЛПЭ < 40 keV/μm (H₂O), что может быть связано с меньшим выходом нейтронов с энергиями менее 0.5...1 MeV, ответственных за формирование одиночных треков протонов отдачи. В то же время наблюдалось увеличение флюенса тяжелых сильноионизирующих фрагментов с ЛПЭ от 50 до 200 keV/μm (H₂O), а также появления фрагментов с ЛПЭ > 250 keV/μm (H₂O).

Разработанный полимерный композит может найти применение в качестве материала для защиты от космической радиации. Главным преимуществом будет яв-

латься толщина используемой защиты, так как толщина локальной защиты из полимерного композита в 5 раз тоньше, чем из полиэтилена (материал, наиболее распространенный для защиты в обитаемых отсеках МКС), что является важным моментом для использования материалов на борту космических аппаратов, где полезный и жилой объем сильно ограничен.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) „Приоритет 2030“ с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ю.Г. Григорьев, И.Б. Ушаков, А.В. Шафиркин. Гигиена и санитария **96**, 9 (2017).
- [2] В.М. Баранов, В.П. Катунцев, М.В. Баранов, А.В. Шпаков, Г.Г. Тарасенков. Ульяновский мед.-биол. журн. **3**, 109 (2018).
- [3] F. Horst, D. Boscolo, M. Durante, F. Luoni, C. Schuy, U. Weber. Life Sci. Space Res. (Amsterdam) **33**, 58 (2022).
- [4] C. Mehner, S. Krishnan, J. Chou, M.L. Freeman, W.D. Freeman, T. Patel, M.T. Turnbull. Life Sci. Space Res. (Amsterdam) **29**, 8 (2021).
- [5] С.Н. Кузнецов, В.Г. Курт, И.Н. Мягкова, Б.Ю. Юшков, К.Н. Кудела. Астроном. вестн. **40**, 2, 120 (2006).
- [6] T.P. Dachev, M.L. Litvak, E. Benton, O. Ploc, B.T. Tomov, Y.N. Matviichuk, P.G. Dimitrov, R.T. Koleva, M.M. Jordanova, N.G. Bankov, M.G. Mitev, I.G. Mitrofanov, D.V. Golovin, M.I. Mokrousov, A.B. Sanin, Vladislav.I. Tretyakov, V.A. Shurshakov, V.V. Benghin. Life Sci. Space Res. (Amsterdam) **39**, 11, 43 (2023).
- [7] А.С. Самойлов, И.Б. Ушаков, В.А. Шуршаков. Экология человека **26**, 1, 4 (2019).
- [8] M. Naito, H. Kitamura, M. Koike, H. Kusano, T. Kusumoto, Y. Uchihori, T. Endo, Y. Hagiwara, N. Kiyono, H. Kodama, S. Matsuo, R. Mikoshihira, Y. Takami, M. Yamanaka, H. Akiyama, W. Nishimura, S. Kodaira. Life Sci. Space Res. (Amsterdam) **31**, 71 (2021).
- [9] J.M. DeWitt, E.R. Benton, Y. Uchihori, N. Yasuda, E.V. Benton, A.L. Frank. Rad. Meas. **44**, 9, 905 (2009).
- [10] C. La Tessa, S. Guetersloh, L. Heilbronn, J. Miller, L. Sihver, C. Zeitlin. Adv. Space Res. **35**, 2, 223 (2005).
- [11] C. Zeitlin, D.M. Hassler, F.A. Cucinotta, B. Ehresmann, R.F. Wimmer-Schweingruber, D.E. Brinza, S. Kang, G. Weigle, S. Böttcher, E. Böhm, S. Burmeister, J. Guo, J. Köhler, C. Martin, A. Posner, S. Rafkin, G. Reitz. Science **340**, 6136, 1080 (2013).
- [12] S. Kodaira, R.V. Tolocheck, I. Ambrozova, H. Kawashima, N. Yasuda, M. Kurano, H. Kitamura, Y. Uchihori, I. Kobayashi, H. Hakamada, A. Suzuki, I.S. Kartsev, E.N. Yarmanova, I.V. Nikolaev, V.A. Shurshakov. Adv. Space Res. **53**, 1, 1 (2014).
- [13] N.I. Cherkashina, V.I. Pavlenko, A.V. Noskov, N.I. Novosadov, E.S. Samoilova. Acta Astronaut. **170**, 499 (2020).
- [14] S. Laurenzi, G. de Zanet, M.G. Santonicola. Acta Astronaut. **170**, 530 (2020).
- [15] L. Pernigoni, U. Lafont, A.M. Grande. Acta Astronaut. **210**, 627 (2023).
- [16] B. Liu, Y. Gu, Y. Liu, S. Wang, M. Li. Composites A **168**, 107483 (2023).
- [17] M. Naito, S. Kodaira, R. Ogawara, K. Tobita, Y. Someya, T. Kusumoto, H. Kusano, H. Kitamura, M. Koike, Y. Uchihori, M. Yamanaka, R. Mikoshihira, T. Endo, N. Kiyono, Y. Hagiwara, H. Kodama, S. Matsuo, Y. Takami, T. Sato, S. Orimo. Life Sci. Space Res. (Amsterdam) **26**, 69 (2020).
- [18] Патент на изобретение РФ № 2748157, МПК — 2017.01 G21F 1/12. В.И. Павленко, А.Н. Шкаплеров, А.А. Курицын, Н.И. Черкашина, Е.В. Попова, Р.Н. Ястребинский. Полимерный нанокompозит для защиты от космического воздействия и способ его получения. Заявители и патентообладатели: Белгородский гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова и Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина. Заявка № 2020134472. Заявлено: 20.10.2020 г. Опубликовано: 20.05.2021 г., Бюл. 14.
- [19] S. Kodaira, K. Morishige, H. Kawashima, H. Kitamura, M. Kurano, N. Hasebe, Y. Koguchi, W. Shinozaki, K. Ogura. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B **383**, 129 (2016).
- [20] N. Yasuda, K. Namiki, Y. Honma, Y. Umeshima, Y. Marumo, H. Ishii, E.R. Benton. Rad. Meas. **40**, 2–6, 311 (2005).
- [21] D. Nikezic, K. Yu. Mater. Sci. Eng. R **46**, 3–5, 51 (2004).
- [22] ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann ICRP **22**, 1–3, 1 (1991).
- [23] J.K. Pálfalvi. Rad. Meas. **44**, 9–10, 724 (2009).
- [24] В.И. Беспалов. Изд-во „Дельтаплан“, Томск (2006).
- [25] V.V. Kushin. Rad. Prot. Dosimetry **141**, 2, 199 (2010).
- [26] H. Tawara, K. Eda, T. Sanami, S. Sasaki, K. Takahashi, R. Sonkawade, A. Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, T. Doke. Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 3, 1726 (2008).
- [27] T. Friedrich, U. Scholz, T. Elsaesser, M. Durante, M. Scholz. J. Rad. Res. **54**, 3, 494 (2013).
- [28] K.O. Inozemtsev, S. Kodaira, T. Kusumoto, H. Kitamura, A. Strádi, J. Szabó, I. Ambrožová, V.A. Shurshakov. Rad. Meas. **140**, 106505 (2021).
- [29] M. Durante, F.A. Cucinotta. Rev. Mod. Phys. **83**, 4, 1245 (2011).
- [30] F.A. Cucinotta, J.W. Wilson, J.L. Shinn, F.F. Badavi, G.D. Badhwar. Rad. Meas. **26**, 6, 923 (1996).
- [31] S. Kodaira, H. Kitamura, M. Kurano, H. Kawashima, E.R. Benton. Sci. Rep. **9**, 1, 3708 (2019).

Редактор Ю.Э. Кутаев