

Моделирование взаимодействия ускоренных электронов с энергией 1–10 MeV с радиационно-защитным полимерным композитом

© В.И. Павленко, В.В. Кашибадзе, А.Ю. Ручий, С.В. Серебряков, Р.В. Сидельников

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012 Белгород, Россия
e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 20 марта 2025 г.

Принято к публикации 27 марта 2025 г.

Применение физико-математического моделирования позволяет изучать процессы, происходящие при взаимодействии ускоренных электронов различной энергии с исследуемыми материалами. Рассмотрен полимерный композит на основе фторопласта и карбида вольфрама с целью его применения в качестве биологической защиты в установках линейных ускорителей частиц с энергией электронов до 10 MeV. Исследована возможность модифицирования наполнителя, проведен синтез радиационно-защитного материала. Также изучено моделирование влияния ускоренных электронов на разработанный композит и определены его прочностные характеристики. Модифицирование порошка карбида вольфрама позволило создать гидрофобную оболочку. Эффективный пробег электронов в чистом фторопласте при энергии последних 1, 5 и 10 MeV составил 3, 14 и 28 mm соответственно. Добавка к полимерной матрице 30 mass% карбида вольфрама привела к уменьшению толщины вещества, поглощающее данные частицы, на 51–34 %. При увеличении концентрации наполнителя в 2 раза эффективный пробег электронов уменьшился на 56–6 % по сравнению с бездобавочным составом. Оценено изменение физико-механических свойств синтезированных материалов, которое показало, что добавление 30 mass% карбида вольфрама к фторопласту привело к снижению прочности при изгибе на 23.4 %, а двукратное увеличение содержания наполнителя 60 mass% — на 16.9 %. Результаты работы позволяют прогнозировать поведение композитов в условиях воздействия ускоренных частиц, а также оптимизировать составы данных материалов для улучшения их радиационно-защитных свойств.

Ключевые слова: фторопласт, карбид вольфрама, линейный ускоритель электронов, радиационно-защитные свойства.

DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60658.304-24

Введение

Ускорители частиц — это устройства, разгоняющие пучок заряженных частиц до субсветовой скорости и удерживающие их на конкретной орбите при помощи электромагнитных полей. С момента изобретения эти машины можно подразделить на три типа в соответствии с их применением: коллайдеры, предназначенные для экспериментов, связанных с физикой высоких энергий (ФВЭ), ускорители тяжелых ионов для использования в медицине, а также источники синхротронного излучения для детального изучения прикладной физики [1].

Электронные ускорители обеспечивают авангардные исследования в области ФВЭ и других науках еще с 1950-х гг. Несмотря на то что физика высоких энергий была ведущей движущей силой развития данных устройств, ускорительные установки регулярно находили все новые применения во многих областях технологий и исследований. К примеру, прогрессивные области применения ускорителей включают лазеры на свободных электронах, радиотерапию для лечения рака, производство короткоживущих медицинских изотопов, лучевую литографию для микросхем, синхротронные источники

светового излучения, тонкопленочную технологию и радиационную обработку продуктов питания [2].

Во время разгона и последующего использования заряженных частиц возникает вторичное излучение, которое может быть вредным для людей, эксплуатирующих и обслуживающих соответствующее оборудование, а также населению и окружающей среде [3]. Облучение от пучков первичных частиц и вторичное излучение во время ежедневной работы предотвращается радиационной защитой, окружающей ускоритель. Обычно материалом радиационной защиты является вещество, в состав которого входят атомы с большими массовыми и зарядовыми числами и имеющее значительное сечение адрон-ядерных взаимодействий. Традиционным материалом радиационной защиты ускорителей является железобетон из-за сравнительной дешевизны, прочности и возможности создавать сложные конструкции [4]. Также материалами для защиты могут быть керамические подложки из нитрида алюминия [5,6] или полимерные композиты [7,8].

В последние годы спрос на новые компоненты ускорителей с улучшенными эксплуатационными характеристиками и интегрируемыми структурами, такие как дрейфовые трубки и внутренние каналы охлаждения, по-

будил исследование аддитивного производства в области ускорителей частиц [9]. Радиационно-защитные материалы на основе полимеров играют важную роль в защите ядерных установок, оборудования и работников от вредного излучения. С появлением новых, более жестких условий ядерной безопасности разработка таких материалов претерпела значительные изменения. Научно-технический прогресс, в частности технология наноматериалов, позволяет создавать радиационно-защитные материалы, обеспечивающие большую всестороннюю производительность [10].

Особый интерес представляют полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе фторопласта и карбида вольфрама, обладающие не только повышенной износостойкостью и термостойкостью, но и отличными радиационно-защитными свойствами. Композитные материалы на основе полимеров стали одними из самых важных элементов аддитивного производства благодаря своим улучшенным свойствам и универсальности конструкции, позволяя создавать компоненты с беспрецедентными эксплуатационными характеристиками [11]. Такие материалы находят применение в аэрокосмической, атомной и химической промышленности, где они подвергаются воздействию различного излучения, агрессивных сред и высоких температур.

Несмотря на свои превосходные свойства, ПКМ на основе фторопласта и карбида вольфрама могут испытывать деградацию под воздействием ионизирующего излучения, в частности, ускоренных электронов, в особенности при применении этих материалов в качестве биологической защиты в установках линейных ускорителей электронов [12]. Понимание механизмов взаимодействия ускоренных электронов с данными материалами имеет важное значение для прогнозирования их поведения в условиях эксплуатации и разработки методов повышения их радиационной стойкости.

Полезным инструментом для анализа взаимодействия ускоренных электронов с различными материалами является физико-математическое моделирование. Оно позволяет изучать процессы, происходящие на микроскопическом уровне, и прогнозировать поведение материалов в разных условиях облучения. Существуют две модели взаимодействия электронов с веществом, такие как модель непрерывного замедления (CSDA) и модель Монте-Карло.

Методы Монте-Карло представляют собой большой спектр вычислительных алгоритмов, основанных на повторной случайной выборке для получения числовых значений. Суть данной модели заключается в использовании вероятности для решения конкретных задач. Решение достигается путем выполнения алгоритмов с заданными исходными значениями и состоянием системы. Такой метод полезен, когда использование иных подходов не представляется возможным. Чаще всего методы Монте-Карло используются в физико-математических задачах, таких как моделирование прохождения ускоренных электронов через различные материалы, включая полимеры и композиты на их основе [13].

В работе [14] исследовали моделирование ослабления энергии протонов в полимерных пленках, имеющих защитное покрытие из тефлона и каптона. Авторы пришли к выводу, что поток энергии ионизирующего излучения можно ослабить, меняя состав, толщину и последовательность расположенных слоев в защитном покрытии. Моделирование взаимодействия протонов показало, что при небольших энергиях протона защита может быть обеспечена полимерным материалом толщиной около $5\text{ }\mu\text{m}$, а при больших энергиях — путем использования двухслойных покрытий суммарной толщиной приблизительно $150\text{ }\mu\text{m}$.

Исследование [15] показало, что при моделировании облучения полимеров ионами атомарного кислорода с высокой энергией полиимида Kapton-H потеря массы последнего на порядок больше, чем при кинетическом распылении. Коэффициент ускорения же при облучении полимера высокоэнергичными ионами на два порядка выше, чем коэффициент ускорения частиц малой энергии.

В работе [16] представлены результаты моделирования взаимодействия электронов и протонов энергией 100 keV с объемными и полыми частицами оксида алюминия. Моделирование показало, что длина свободного пробега в полых частицах в 10 раз превышает таковую в объемных при воздействии протонов и в 2.4 раза — при воздействии электронов.

Результаты исследований статьи [17] установили, что облучение электронным потоком при различных температурах существенно меняют физические свойства композиционных полимеров. При увеличении дозы облучения уменьшается напряжение при разрушении, а также величина прогиба поверхности материала.

В работе [18] проанализировано влияние быстрых электронов высокой энергии на полиимидный композит, содержащий оксид вольфрама. Расчеты показали, что с увеличением содержания оксида вольфрама в композите значительно возрастает как ионизационные, так и радиационные потери высокоэнергетических электронов.

Целью настоящей работы является разработка полимерных композитов на основе фторопласта и карбида вольфрама, оценка их радиационно-защитных свойств по отношению к электронному излучению с энергией от 1 до 10 MeV с использованием расчетных моделей.

1. Материалы и методы исследования

1.1. Исходные материалы

В качестве полимера для композиционного материала использовали политетрафторэтилен (фторопласт-4) по ГОСТ 10007-80 „Фторопласт-4. Технические условия“ (ООО „Фторопластовые изделия“, г. Белгород, Россия). При синтезе ПКМ фторопласт выступал в качестве матрицы. Фторопласт-4 — это пресс-порошок белого цвета, размер частиц которого составляет $6\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$. Основные свойства фторопласта-4 представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные свойства фторопласта-4

Свойства	Значение	Свойства	Значение
Плотность, g/cm ³	2.23	Предел прочности при растяжении, kgf/cm ²	253
Температура плавления, °C	327	Удлинение при разрыве, %	330
Температура разложения, °C	415	Предел прочности при сжатии, kgf/cm ²	125

В качестве радиационно-защитного наполнителя использовали карбид вольфрама (WC), представляющий собой порошок черного цвета, размер частиц которого составляет 10–250 nm. Наполнитель был синтезирован из лома твердосплавных изделий производства по уникальной технологии, описанной в [19]. Содержание углерода в соединении составляет 8 mass%. Анализ полученных рентгенограмм порошка показал, что дифракционное отражение высшей интенсивности соответствует монокарбиду вольфрама, который представлен в двух кристаллографических модификациях: α -WC с гексагональной решеткой и β -WC с кубической гранцентрированной решеткой [20].

1.2. Модифицирование наполнителя

В связи со значительной агрегацией частиц наполнителя было проведено его модифицирование с целью создания гидрофобной оболочки на поверхности материала. Создание такой оболочки позволит равномерно распределиться частицам карбида вольфрама во всем объеме композита, значительно снизив агрегацию частиц [21]. Для изменения свойств смачивания карбида вольфрама использовали смолу K-9 марки „А“ по технологии, описанной в [8]. Кремнийорганическая смола представляет собой продукт конденсации метилсилантриола и фенилсилантриола, полученных из соответствующих силанхлоридов.

1.3. Синтез ПКМ

Смешение порошков фторопласта и модифицированного наполнителя WC производили в мельнице с использованием криогенного помола. Мельница оснащена двумя размольными местами, имеет две различные камеры цилиндрической формы предварительного и финального измельчения. В первый размольный стакан помещен один большой стальной шар, во второй — несколько мелких. Обе камеры закрываются крышкой, через которую подается жидкий азот для охлаждения материалов. Помол производился при температуре ниже -60°C с выдержкой в течение 30 min.

Далее гомогенизированную смесь порошков загружали в пресс-форму, нагревали до температуры 280°C в сушильной печи, выдерживали в течение 1 h. Затем осуществляли прессование композитов при удельном давлении 80 МПа. После чего материалы охлаждались до комнатной температуры и подвергались спеканию

при температуре 350°C в течение 3 h. Спекание фторопластовых композитов приводит к увеличению плотности, уменьшению теплового расширения и увеличению теплопроводности, что связано со структурными изменениями, сопровождающимися интенсификацией адгезионного межфазного взаимодействия, [22]. При этом температура спекания должна быть выше температуры плавления кристаллов (327°C), которая необходима для формирования высокой степени кристалличности (до 90 %) фторопластовых образцов.

1.4. Используемое оборудование и методы исследования

Для измельчения и смешения материалов использовали вибрационную мельницу MM 500 NANO с возможностью использования криогенного помола производства ООО „Колба“, Воронеж, Россия.

Для нагрева, сушки и спекания полупродуктов использовали сушильную печь KC-136 производства ООО „Метротест“, Нефтекамск, Россия.

Для прессования материалов использовали испытательную машину РЭМ-100-А-1-1 производства ООО „Метротест“, Нефтекамск, Россия.

Испытания предела прочности при изгибе проводились на оборудовании РЭМ-100-А-1-1 производства ООО „Метротест“, Башкортостан, Россия.

Для идентификации кристаллических фаз использовали метод рентгеновской дифракции. Дифрактограммы порошков были получены при помощи прибора ARL X'TRA (Thermo Techno LLC, Швейцария) с источником CuK_{α} в диапазоне углов 2θ от 4° до 56° . Пики идентифицировались по базе данных PDF-2 в программах Dif Win и Search Match.

Образцы исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе TESCAN MIRA 3LMU (TESCAN ORSAY HOLDING, Чехия).

Гранулометрический состав исследовался на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTec plus (Frisch, Idar-Oberstein, Германия) методом лазерной дифракции в суспензии. Для этого небольшое количество порошка разводилось в 96 % изопропиловом спирте, так как он позволяет избежать излишнего набухания частиц, которое приводит к искажению результатов.

Плотность исследуемых образцов определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139-69 (СТ СЭВ 891-78).

Моделирование взаимодействия электронов с разработанными ПКМ осуществляли в программе CASINO V2.481 по методу Монте-Карло. Полученные результаты обрабатывались в программе OriginPro V9.8.0 и Adobe Illustrator V28.7.1.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Анализ смачиваемости частиц наполнителя

Модифицирование карбида вольфрама кремнийорганической смолой К-9 позволило создать гидрофобную оболочку на поверхности частиц порошка. Значительное изменение гидрофобно-гидрофильного баланса наполнителя подтверждается результатами анализа краевого угла смачивания. Значение краевого угла смачивания карбида вольфрама изменяется с $(27^\circ \pm 3^\circ)$ до $(124^\circ \pm 4^\circ)$.

2.2. Микроскопический анализ синтезированных ПКМ

Методом СЭМ были исследованы композиты, синтезированные с использованием немодифицированного и модифицированного наполнителя для подтверждения эффективности модифицирования на распределение WC в полимере и их агрегацию. На рис. 1 представлены СЭМ изображения композитов с WC при использовании модифицирования и без. Темная область на СЭМ изображениях — это область распределения полимера — фторопласта, а светлая область — наполнитель.

Можно заметить, что модифицирование наполнителя значительно способствовало недопущению агрегации частиц и более равномерному распределению по всему объему композитов. При этом использование криогенного помола при смешении фторопластового порошка с немодифицированным WC практически не повлияло на размер агрегированных частиц наполнителя. Размеры агломератов частиц порошка WC и размеры агломератов WC в композите (рис. 1, а, с) составляют до $20 \mu\text{m}$. Это вероятнее всего связано с тем, что порошок WC обладает достаточно малым размером частиц, достигая наноразмерного уровня, при этом между частицами начинают действовать силы Ван-дер-Ваальса, которые обладают достаточной энергией и не могут быть разрушены даже при криогенном помоле.

Отметим, что использование модифицирования позволило исключить агломерацию частиц порошка WC, а криогенный помол эффективен при смешении фторопласта с WC.

2.3. Физико-механические характеристики ПКМ

Плотность полученных композитов с различным содержанием модифицированного WC с шагом в 10 % определяли методом гидростатического взвешивания.

Вначале определяли вес композита в воздухе, затем — в жидкости с известной плотностью (дистиллированной воде). После взвешивания образцов в воздухе и в жидкости плотность находили по формуле:

$$\rho = \frac{m}{m - m_1} \cdot \rho_w, \quad (1)$$

где m — вес композита в воздухе; m_1 — вес композита в воде; $\rho_w = 0.998 \text{ g/cm}^3$ — плотность дистиллированной воды при 20°C .

Полученные результаты плотности композитов представлены в табл. 2.

Введение наполнителей значительно повышает плотность композитов, так как WC обладает повышенной плотностью (16.63 g/cm^3) по сравнению с фторопластом. Так, при увеличении содержания WC до 30 mass% изменение плотности композита выросло на 31.7 %, а до 60 mass% — 93.2 %.

Для исследования механических свойств композиционных материалов при воздействии изгибающей нагрузки применялась стандартная методика ГОСТ Р 57749-2017 (ИСО 17138:2014). Для каждого состава было проведено по 5 испытаний. Расстояние между опорами составляло 14–15 mm, максимальная нагрузка при проведении эксперимента достигала 598 N. Прочность при трехточечном изгибе (МПа) вычисляли по формуле

$$\sigma_{f,m} = \frac{3F_m \cdot L}{2b \cdot h^2}, \quad (2)$$

где F_m — максимальная нагрузка, [N]; L — расстояние между нижними опорами, [mm]; b — ширина образца, [mm]; h — средняя толщина образца, [mm].

Были синтезированы образцы композитов, содержащие 30 mass% и 60 mass% модифицированного порошка WC. Также для оценки введения наполнителя в состав композитов были изготовлены образцы из чистого фторопласта для сравнения. На рис. 2 представлены кривые зависимости прочности при изгибе исследуемых композитов в зависимости от степени наполнения. На основании полученных данных была построена кривая регрессии с учетом доверительного интервала в 95 %. Наибольшей прочностью при изгибе обладают образцы без содержания наполнителя $((27.8 \pm 2.0) \text{ МПа})$. При увеличении содержания модифицированного WC до 30 mass% прочностные характеристики, оцениваемые по прочности при изгибе, снижаются до $(21.3 \pm 1.5) \text{ МПа}$ (рис. 2), а при дальнейшем увеличении (до 60 mass%) наблюдается незначительное увеличение $((23.1 \pm 1.6) \text{ МПа})$. Это может быть связано с тем, что при оценке прочности высоконаполненного композита начинает играть роль не только связь полимера с наполнителем, но и прочность самого наполнителя. Так как WC обладает высокими физико-механическими свойствами, то разрушить композит, в котором 60 mass% твердого порошка, становится сложнее, что и повышает прочностные свойства композита в целом.

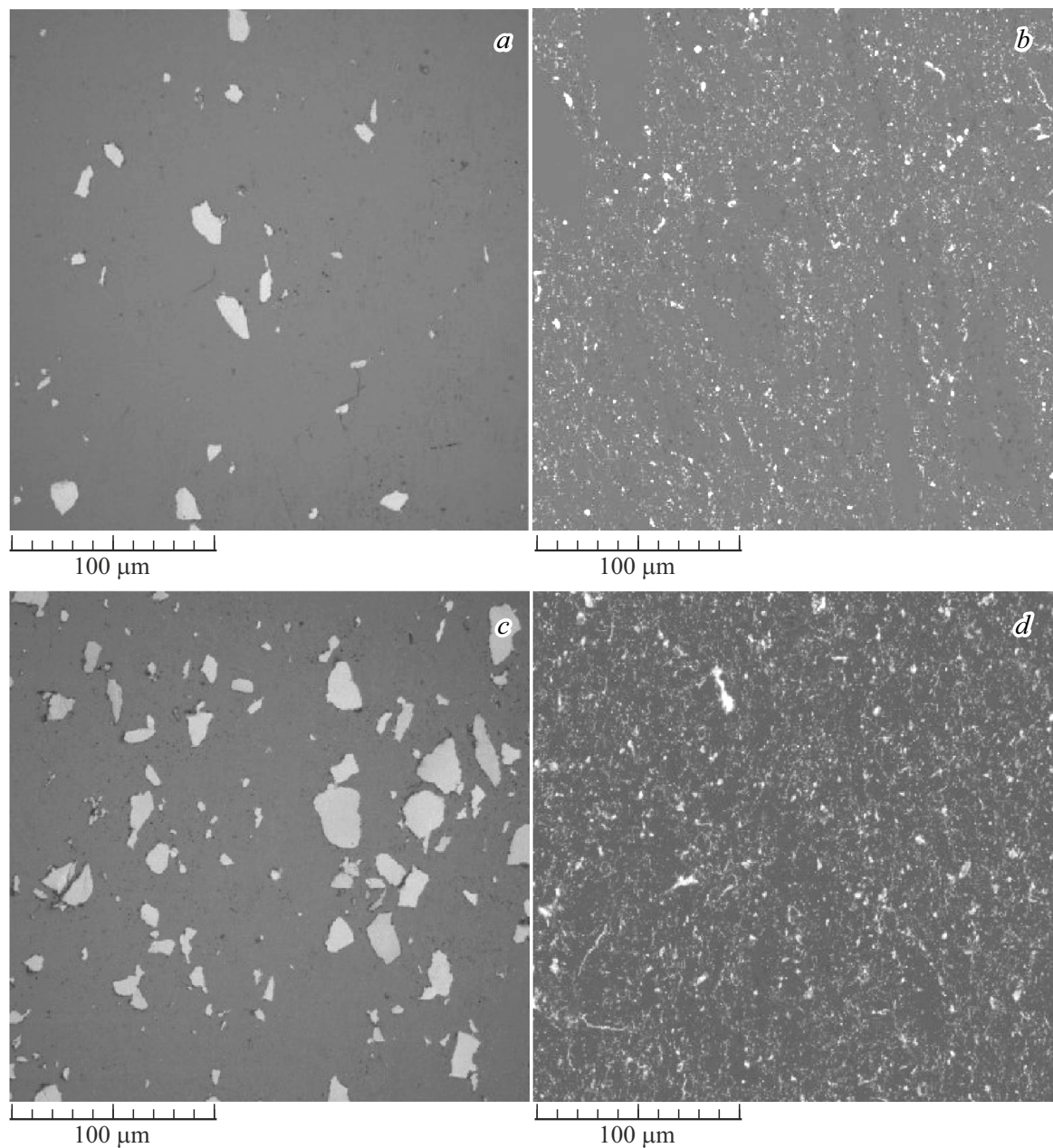


Рис. 1. СЭМ изображения композитов при содержании 30 mass% (*a, b*) и 60 mass% WC (*c, d*): *a, c* — немодифицированного; *b, d* — модифицированного.

Таблица 2. Плотность радиационно-защитных композитов с различным содержанием модифицированного WC

Содержание WC, mass%	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Плотность, g/cm ³	2.05	2.23	2.45	2.70	3.02	3.43	3.96	4.68	5.73

2.4. Физико-математическое моделирование взаимодействия ускоренных электронов с ПКМ

Моделирование прохождения электронов с энергий от 1 до 10 MeV через разработанные полимерные

радиационно-защитные композиты проводилось на основании элементного химического состава композитов. Заданный диапазон энергий (от 1 до 10 MeV) обусловлен тем, что основная масса прикладных линейных ускорителей электронов имеет энергию пучков электронов до 10 MeV, самым перспективным диапазоном энергий

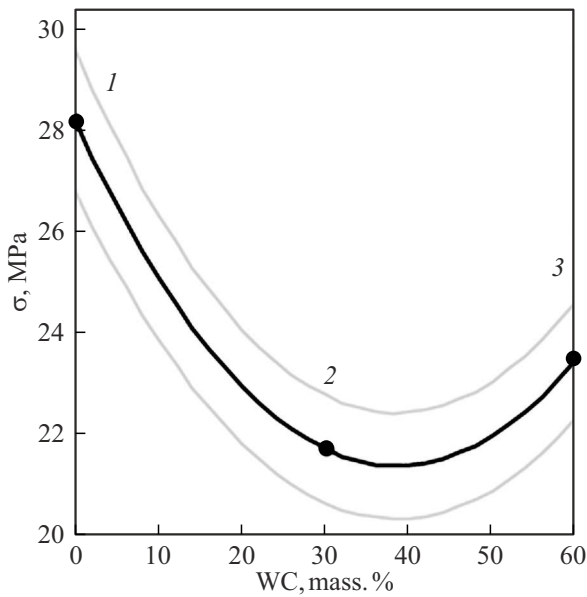


Рис. 2. Кривые зависимости прочности при изгибе исследуемых композитов в зависимости от степени наполнения WC: 1 — фторопласт, 2 — композит с 30 mass% WC, 3 — композит с 60 mass% WC.

пучка электронов для создания проводящих ускорителей электронов непрерывного действия с высокой мощностью считается 1–5 MeV [23,24].

Теоретические расчеты проводились для образца из чистого фторопласта, а также для композитов, содержащих 30 mass% и 60 mass% WC. Атомарный элементный состав исследуемых материалов представлен в табл. 3. При моделировании не учитывали соединения используемых при модификации веществ в силу их малого (менее 1 %) вклада.

При прохождении через вещество электроны при низких энергиях ($E < 1$ MeV) теряют свою энергию преимущественно за счет ионизации. В то время как скорость ионизационных потерь растет логарифмически с увеличением энергии, потери тормозного излучения растут почти линейно (доля всех потерь почти не зависит от энергии) и доминирует над критической энергией на несколько десятков MeV для большинства материалов [25].

Ионизационные потери энергии электрона в исследуемых радиационно-защитных композитах вычисляли по следующей формуле [26]:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = K\rho \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{2\beta^2} \left[\ln \left(\frac{m_e c^2 E_k}{I^2} \cdot \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)} \right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right], \quad [\text{MeV/cm}], \quad (3)$$

где индекс „ion“ означает потери на столкновения частиц с атомами, A — атомная масса элемента,

$[g/mol]$, Z — атомный номер (порядковый номер элемента в таблице Менделеева), $K = 4\pi r_e^2 m_e c^2 N_A = 0.307 \text{ MeV/(g/cm}^2\text{)}$, $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ — энергия покоя электрона, $r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ — классический радиус электрона, $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, ρ — плотность вещества, $[g/cm^3]$, I — средний ионизационный потенциал атома вещества среды, $[eV]$, $\beta = \sqrt{1 - \frac{(m_e c^2)^2}{(m_e c^2 + E_k)^2}}$ — Лоренц фактор электрона с кинетической энергией E_k .

Так как рассматриваемые радиационно-защитные композиты представляют собой смесь нескольких атомов разных химических элементов, то необходимо воспользоваться композиционным законом Брэгга: смесь или соединение можно рассматривать как состоящую из тонких слоев чистых элементов в соответствующей пропорции (аддитивность Брэгга). В этом случае потери можно будет найти по следующей формуле:

$$\frac{dE}{dx} = \sum \omega_j \frac{dE}{dx_j}, \quad [\text{MeV/cm}], \quad (4)$$

где $\frac{dE}{dx_j}$ — средняя скорость потери энергии в j -м элементе.

Используя композиционный закона Брэгга (4), ионизационные потери энергии электронов были рассчитаны по формулам:

— для фторопласта:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C) + \rho_F \frac{Z_F}{A_F} F(E_k, I_F), \quad [\text{MeV/cm}], \quad (5)$$

— для композиционного материала с WC:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \rho_C \frac{Z_C}{A_C} F(E_k, I_C) + \rho_F \frac{Z_F}{A_F} F(E_k, I_F) + \rho_W \frac{Z_W}{A_W} F(E_k, I_W), \quad [\text{MeV/cm}], \quad (6)$$

где

$$F(E_k, I) = \frac{K}{2\beta^2} \left[\ln \left(\frac{m_e c^2 E_k}{I^2} \cdot \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)} \right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right]. \quad (7)$$

Радиационные потери энергии при прохождении электронов через разработанные радиационно-защитные композиты определяли, используя следующую формулу:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \rho \frac{Z^2}{A} \cdot \frac{K\alpha}{4\pi} \cdot \frac{\varepsilon}{m} \cdot G(E_k), \quad [\text{MeV/cm}], \quad (8)$$

Таблица 3. Атомарный элементный состав исследуемых материалов для моделирования

Материал	Содержание в материале, mass%		
	W	C	F
Фторопласт	0.0	24.0	76.0
Композит, содержащий 30 mass% моделирование WC	28.2	18.6	53.2
Композит, содержащий 60 mass% моделирование WC	56.4	13.2	30.4

где $\varepsilon = E_k + m_e c^2$ — полная энергия электрона, [MeV];
 $\alpha = \frac{1}{137}$ — постоянная тонкой структуры.

$$G(E_k) = \frac{K\alpha}{4\pi} \cdot \frac{\varepsilon}{m} \cdot \left[\frac{12\varepsilon^2 + 4m_e^2 c^4}{3\varepsilon p} \ln\left(\frac{\varepsilon + p}{m_e c^2}\right) - \frac{(8\varepsilon + 6p)m^2 c^4}{3\varepsilon p^2} \cdot \left(\ln\left(\frac{\varepsilon + p}{m_e c^2}\right)\right)^2 - \frac{4}{3} + \frac{2m^2 c^4}{\varepsilon p} \cdot F\left(\frac{2p(\varepsilon + p)}{m^2 c^4}\right) \right], \quad (9)$$

где $F(x) = F\left(\frac{2p(\varepsilon + p)}{m^2 c^4}\right) = \int_0^{\frac{2p(\varepsilon + p)}{m^2 c^4}} \frac{\ln(1+y)}{y} dy$, p — импульс электрона, [g·cm/s].

Используя композиционный закон Брэгга (формула (4)), радиационные потери в исследуемых радиационно-защитных композитах вычисляли по следующим формулам:

— для фторопласта:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_F \frac{Z_F^2}{A_F}\right) G(E_k), \quad [\text{MeV/cm}], \quad (10)$$

— для композиционного материала с WC:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \left(\rho_C \frac{Z_C^2}{A_C} + \rho_F \frac{Z_F^2}{A_F} + \rho_W \frac{Z_W^2}{A_W}\right) \times G(E_k), \quad [\text{MeV/cm}]. \quad (11)$$

Общие (суммарные) потери энергии электронов при прохождении через радиационно-защитные композиционные материалы вычисляли по следующей формуле:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion}, \quad [\text{MeV/cm}]. \quad (12)$$

На рис. 3 представлены кривые ионизационных и радиационных потерь энергии электрона, а также суммарные потери электрона в фторопласте и композитах, содержащих WC. Моделирование проводили для энергии электронов от 1 до 10 MeV.

Для всех рассматриваемых энергиях электронов вклад ионизационных значительно превышает вклад радиационных потерь в суммарные потери электрона как во фторопласте, так и в композитах, содержащих WC. Наименьшие суммарные потери электрона наблюдаются при

моделировании прохождения через чистый фторопласт без наполнителей, а наибольшие — при прохождении через композит, содержащий в качестве наполнителя WC (60 mass%).

Введение большего содержания наполнителя WC от 30 mass% до 60 mass% в радиационно-защитные композиционные материалы на основе фторопласта приводит к увеличению как ионизационных, так и радиационных потерь быстрых электронов.

Известно, что больший вклад в суммарные потери энергии электрона дают атомы тяжелых элементов, по сравнению с атомами, обладающими малыми порядковыми номерами в таблице Менделеева [27,28].

Известно, что быстрые электроны при прохождении через материал претерпевают многократное рассеяние, и поэтому их траектория в веществе не прямолинейна (как для тяжелых частиц). Их траектория движения меняется неоднократно, и только лишь некоторые электроны из пучка проходят максимальное расстояние в материале в направлении, перпендикулярном к его поверхности.

В результате рассеяния (торможения) электронов в электрическом поле при прохождении через вещество возникает тормозное излучение. Поскольку тормозное излучение намного сильнее для более легких частиц, этот эффект более важен для электронов, чем для протонов, альфа-частиц и тяжелых заряженных ядер (осколков деления). Этим эффектом можно пренебречь при энергиях частиц ниже 1 MeV, поскольку потери энергии из-за тормозного излучения очень малы. Потери на излучение начинают приобретать значение только при энергиях частиц, значительно превышающих минимальную энергию ионизации. При релятивистских энергиях отношение скорости потерь при тормозном излучении к скорости потерь при ионизации приблизительно пропорционально произведению кинетической энергии частицы и атомного номера поглотителя.

В связи с этим возникает научный интерес моделирования прохождения электронов через композиты с оценкой не только суммарных потерь энергии электронов, но и их визуальной траектории, а также возникновения тормозного излучения.

Для моделирования прохождения электронного излучения с энергией от 1 до 10 MeV использовалось моделирование методом Монте-Карло в программе CASINO V2.481 [29]. Данная программа использует та-

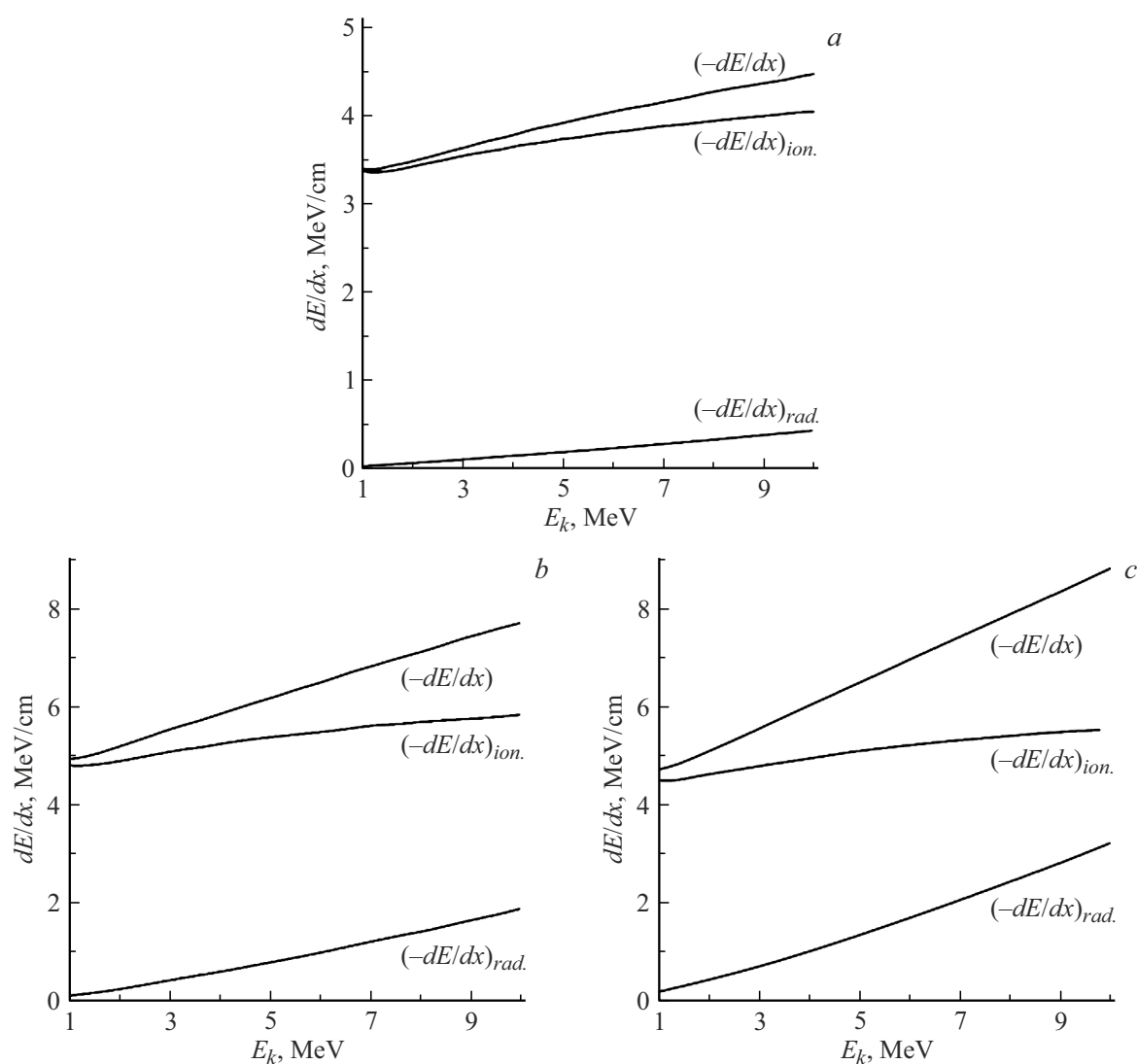


Рис. 3. Графики зависимости потерь энергии быстрых электронов от начальной E_k в следующих материалах: *a* — фторопласте, *b* — композите с 30 mass% WC, *c* — композите с 60 mass% WC.

булированные сечения упругих взаимодействий (Мотта) и экспериментально определенные тормозящие силы для расчета траекторий движения электронов в веществе [30]. Программа позволяет графически построить траекторию движения электронов, а также вычислить эффективный пробег электронов в заданном композитном материале. Исходными данными для программы являются плотность и атомарный состав материала.

Общее количество выпускаемых моделируемых частиц электронов в программе составляло 1000. Все электроны начинали свое движение из одной точки, которая располагалась вплотную к материалу. На рис. 4 графически представлены траектории движения электронов в исследуемых материалах, а также изменение их кинетической энергии при движении. Можно заметить, что при моделировании облучения электронным пучком основная масса электронов в материалах не сохраняет направление движения первичного пуч-

ка быстрых электронов. Видно, что путь электронов состоит из отрезков, определяемых расстоянием между двумя последовательными актами упругого рассеяния при атомном столкновении. Траектория движения электрона во всех исследуемых материалах после рассеивания становится настолько сложной, что напоминает процесс диффузии частиц в веществе. Абсолютная глубина проникновения электронов во фторопласте и композитах с WC оказывается намного меньше, чем полный путь электронов до торможения, определяемый ионизационными и радиационными потерями.

Масса электронов значительно меньше массы тяжелых частиц, что сказывается на характере их движения в веществе. При столкновении с атомными электронами и ядрами электроны значительно отклоняются от первоначального направления движения и двигаются по извилистой траектории. Поэтому для электронов

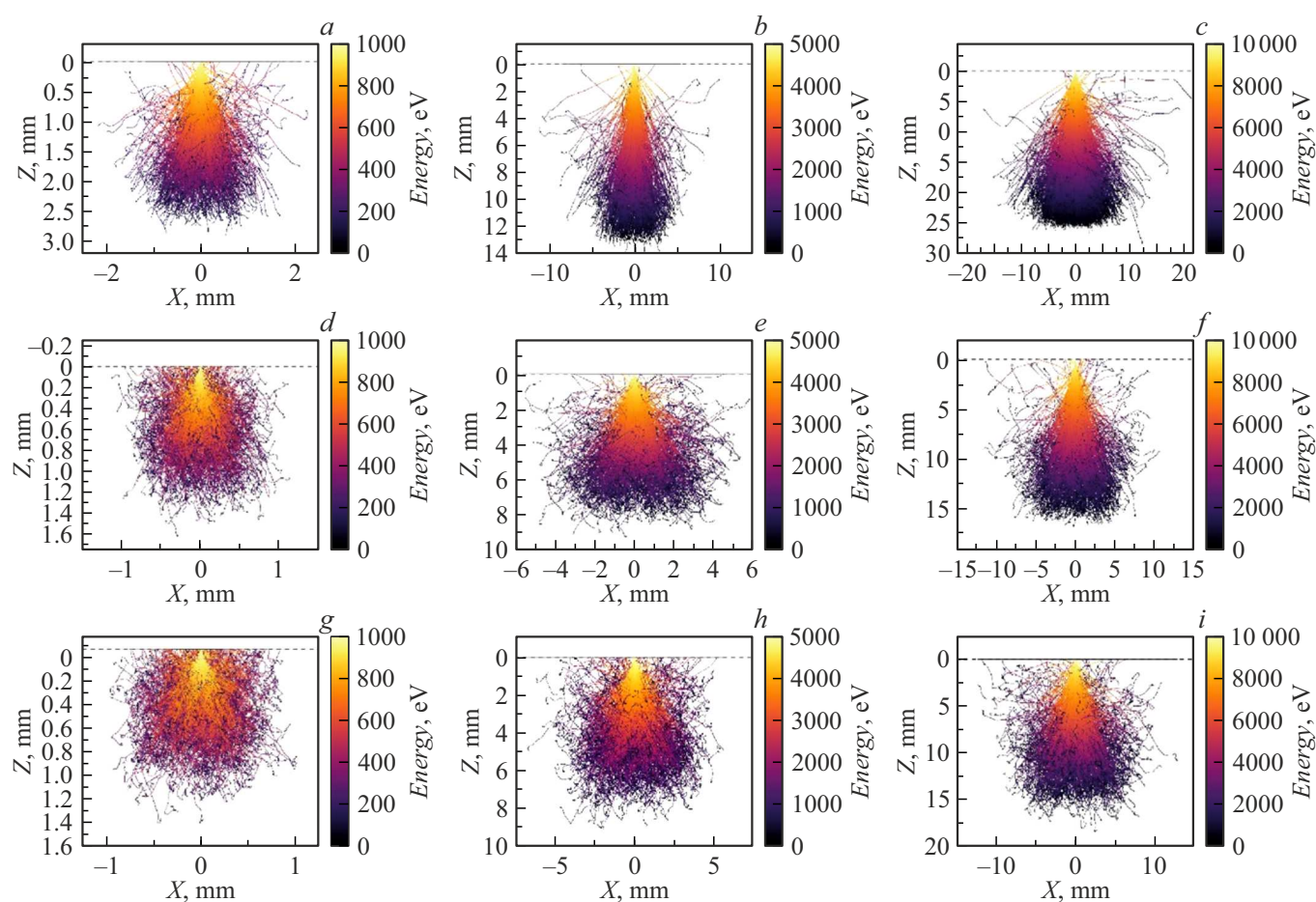


Рис. 4. Траектории движения электронов, смоделированные в программе CASINO V2.481 в следующих материалах: *a–c* — фторопласте [8]; *d–f* — композите с наполнением 30 mass% WC; *g–i* — композите с наполнением 60 mass% WC; при следующих начальных энергиях электронов: *a, d, g* — 1 MeV, *b, e, h* — 5 MeV, *c, f, i* — 10 MeV.

вводится понятие эффективный пробег, определяемый минимальной толщиной вещества, измеряемой в направлении исходной скорости пучка и соответствующей полному поглощению электронов.

На рис. 5 представлены кривые, демонстрирующие зависимость эффективного пробега электронов во фторопласте и радиационно-защитных композитах с WC от начальной кинетической энергии электронов в сравнении с известными аналогами. Эффективные пробеги электронов в железе и бетоне находили, используя данные [31].

В табл. 4 представлены данные по эффективному (среднему) пробегу электронов во фторопласте и радиационно-защитных композитах с WC в зависимости от начальной кинетической энергии электронов в сравнении с известными аналогами. Эффективные пробеги электронов в железе и бетоне находили, используя данные [31].

Основными факторами при выборе материалов радиационной защиты являются стоимость и наличие пространства. При значительно сильном ограничении пространства основной упор делается не на стоимость, а на толщину защиты.

Первоначально для радиационной защиты промышленных ускорителей электронов использовали или бе-

тонную камеру, или металлическую стену [34]. Бетон обычно является наиболее подходящим и экономичным, и его следует использовать там, где это возможно. Из него можно отливать заданную форму, и он имеет превосходные механические свойства. В установках лучевой терапии типичные бетонные барьеры могут варьироваться от 60 см (вторичные барьеры) до 2 м (первичные барьеры) из обычного бетона. Ускорители более высокой энергии и мощности могут потребовать значительно большей толщины, но это также очень зависит от расстояний, от источников радиации в жилых помещениях и, следовательно, от размера радиационной комнаты. Там, где пространство ограничено, могут быть использованы наполнители из барита или железосодержащие агрегаты, такие как ильменит или магнетит [35].

Анализ данных по эффективному пробегу электронов показал, что с увеличением энергии электронов значительно повышается эффективный пробег (табл. 4). Для чистого фторопласта без наполнения при повышении начальной кинетической энергии электронов с 1 до 5 MeV эффективный пробег электронов увеличивается в 4.85 раз, а при повышении начальной кинетической

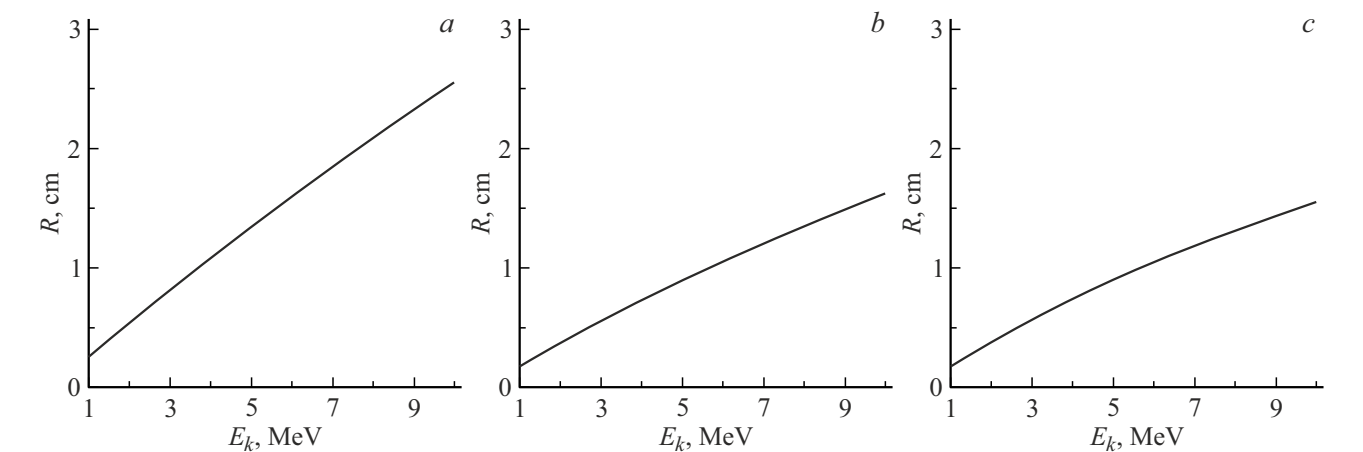


Рис. 5. Графики зависимости эффективного пробега электронов от начальной E_k в следующих материалах: a — фторопласте, b — композите с 30 mass% WC, c — композите с 60 mass% WC.

Таблица 4. Эффективный пробег электронов в исследуемых материалах и аналогах

Материал	Эффективный пробег электронов, mm		
	1 MeV	5 MeV	10 MeV
Фторопласт	2.7	13.1	26.2
Композит, содержащий 30 mass% WC (плотность 2.7 g/cm ³)	1.3	7.9	17.2
Композит, содержащий 60 mass% WC (плотность 4.0 g/cm ³)	1.2	7.5	16.8
Железо (плотность 7.9 g/cm ³)	0.8	4.2	7.7
Бетон (плотность 2.3 g/cm ³)	2.2	12.8	24.4
КМ-1* (плотность 3.8 g/cm ³)	1.6	7.9	—
Полиимидный композит, наполненный силикатом висмута Bi ₁₂ SiO ₂₀ (плотность 2.95 g/cm ³) [32]	2.3	10.2	—

Примечание*: Композиционный материал, содержащий высокодисперсные активировано-модифицированные оксиды Fe₂O₃ и Bi₂O₃, и в качестве связующего дюралюминий [33].

энергии электронов с 1 до 10 MeV — в 9.70 раза. Для композита с наполнителем из карбида вольфрама 30 mass% при повышении начальной кинетической энергии электронов с 1 до 5 MeV эффективный пробег электронов увеличивается в 6.08 раз, а при повышении начальной кинетической энергии электронов с 1 до 10 MeV — в 13.23 раза. Для композита с наполнением 60 mass% WC при повышении начальной кинетической энергии электронов с 1 до 5 MeV эффективный пробег электронов увеличивается в 6.25 раз, а при повышении начальной кинетической энергии электронов с 1 до 10 MeV — в 14 раз.

Заметно, что наполнение предлагаемым наполнителем — WC — значительно снижает эффективный пробег электронов в композитах по сравнению с чистым фторопластом при исходных условиях моделирования. Так, при моделировании прохождения электронов с

начальной кинетической энергией 1 MeV наблюдается уменьшение эффективного пробега электронов на 51.85 % при наполнении 30 mass% карбида вольфрама по сравнению с чистым фторопластом. При наибольшей начальной кинетической энергии моделирования в 10 MeV наблюдается уменьшение эффективного пробега электронов на 35.88 % при наполнении 60 mass% WC по сравнению с чистым фторопластом.

Таким образом, введение предлагаемого наполнителя значительно снижает эффективный пробег прохождения электронов во всем исследуемом диапазоне энергий электронов. Снижение эффективного пробега позволит значительно сократить толщину радиационной защиты линейных ускорителей электронов, что особенно актуально для модернизации уже существующих работающих ускорителей электронов.

Сравнительный анализ среднего пробега электронов в разработанных композитах и существующих аналогов (табл. 4), показал, что предлагаемые радиационно-защитные композиты по среднему пробегу электронов превосходят такие материалы как обычный бетон, КМ-1 и полиимидный композит, наполненный силикатом висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, уступая лишь железу. Однако плотность железа составляет 7.9 g/cm^3 , тогда как плотность композитов в 2 и более раз (в зависимости от состава) меньше. Кроме того, основная задача защиты от быстрых электронов сводится к защите от вторичного тормозного излучения, а с увеличением плотности материала кратно возрастет интенсивность тормозного излучения. Поэтому можно сделать вывод, что разработанные композиты в комплексе превосходят существующие аналоги в части защиты от электронного облучения при рассматриваемых энергиях от 1 до 10 MeV.

3. Выводы

1. Проведен синтез ПМК на основе фторопластового пресс-порошка и модифицированного WC.

2. Экспериментально подтверждено, что модифицирование WC привело к изменению гидрофобно-гидрофильного баланса поверхности его частиц, введение во фторопластовую матрицу модифицированного наполнителя значительно снижает агрегацию частиц наполнителя.

3. Проведены физико-механические испытания синтезированных ПКМ. Наибольшей прочностью при изгибе обладают образцы без содержания наполнителя, которая составляет 27.8 МПа. При содержании 30 mass% модифицированного WC в композите прочностные характеристики, оцениваемые по прочности при изгибе, снижаются на 23.4 % и составляют 21.3 МПа. При этом, если содержание наполнителя увеличить до 60 mass %, наблюдается незначительное увеличение прочностных характеристик материала на 8.45 % по сравнению с 30 mass % добавкой. Также определено, что композиты с добавкой WC обладают повышенной плотностью.

4. Расчет ионизационных и радиационных потерь энергии электрона показал, что вклад первых значителен во всех композитах. Наименьшие потери энергии наблюдаются у бездобавочного образца, а добавление модифицированного радиационно-защитного наполнителя приводит к увеличению суммарных потерь энергии быстрых электронов.

5. Проведено моделирование взаимодействия ускоренных электронов с энергией 1–10 MeV с разработанным полимерным композитом. Наполнение предлагаемыми наполнителями — WC значительно снижает расчетный эффективный пробег электронов в композитах по сравнению с чистым фторопластом при исходных условиях моделирования. Так, при введении во фторопластовую матрицу 30 mass% WC эффективный пробег электронов уменьшается на 51.9 %–34.4 %. При добавлении в полимер 60 mass% наполнителя эффективный пробег

электронов снизился на 55.6 %–35.9 % по сравнению с бездобавочным составом. Дальнейшие исследования будут направлены на проведение экспериментальных исследований по облучению разработанных композитов в установках линейных ускорителей электронов с энергией до 10 MeV с целью подтверждения их радиационно-защитных свойств и разработанных теоретических моделей.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10033, <https://rscf.ru/project/24-79-10033/> 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] Vikas, R. Sahu. *Precis. Eng.*, **71**, 232 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.03.015
- [2] J. Resta Lopez. *Future Particle Accelerators* (IntechOpen, London, 2022), DOI: 10.5772/intechopen.106340
- [3] G. Haridas, R. Ravishankar, A. Chattaraj, P. Selvam. *Handbook on Radiation Environment*, **2**, 263 (2024). DOI: 10.1007/978-981-97-2799-5_10
- [4] Г.Н. Тимошенко. *Радиационная защита высокоэнергетических ускорителей* (ОИЯИ, Дубна, 2022)
- [5] Y.P. Severgin, M.Z. Filimonov. *Proceed. Intern. Conf. Particle Accelerators*, **3**, 2208 (1993). DOI: 10.1109/PAC.1993.309270
- [6] A. Kozlovskiy, I. Kenzhina, Z.A. Alyamova, M. Zdorovets. *Opt. Mater.*, **91**, 130 (2019). DOI: 10.1016/j.optmat.2019.03.014
- [7] C.V. More, Z. Alsayed, M.S. Badawi, A.A. Thabet, P.P. Pawar. *Environ Chem. Lett.*, **19**, 2057 (2021). DOI: 10.1007/s10311-021-01189-9
- [8] В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, В.В. Кашибадзе, С.Н. Домарев. *Перспективные материалы*, **7**, 42 (2024). DOI: 10.30791/1028-978X-2024-7-42-50
- [9] T. Romano, G. Pikurs, A. Ratkus, T. Torims, N. Delerue, M. Vretenar, L. Stepien, E. López, M. Vedani. *Phys. Rev. Accel. Beams*, **27**, 1 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.27.054801
- [10] C. Zeng, Q. Kang, Z. Duan, B. Qin, X. Feng, H. Lu, Y. Lin. *J. Inorg. Organometall. Polymers Mater.*, **33** (8), 2191 (2023). DOI: 10.1007/s10904-023-02725-6
- [11] E. McCarthy, D. Brabazon. In: *Encyclopedia of Materials: Composites*, ed. by D. Brabazon (Oxford, Elsevier, 3, 2021, 263). DOI: 10.1016/B978-0-12-819724-0.00067-7
- [12] A. Passarelli, M.R. Masullo, Z. Mazaheri, A. Andreone. *Sensors*, **24**, 5036 (2024). DOI: 10.3390/s24155036
- [13] A.A. Jaoude. *Recent Advances in Monte Carlo Methods* (IntechOpen, London, 2024), DOI: 10.5772/intechopen.1000269
- [14] И.В. Верхотурова (Гопиенко), М.С. Быковский, А.В. Авращенко, К.К. Тяжелкова. *Вестник АмГУ*, **81**, 28 (2018).

- [15] В.А. Шувалов, Н.А. Токмак, Н.И. Письменный, Г.С. Кочубей. Приборы и техника эксперимента, **4**, 79 (2021). DOI: 10.31857/S0032816221040108
- [16] В.Ю. Юрина, В.В. Нецименко. В сб.: *Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование*, под ред. А.И. Мазура (ТОГУ, Хабаровск, 2022), с. 90–92.
- [17] Б.А. Кожамкулов, Ж.М. Битибаева, Ж.Е. Примкулова, Д.Е. Куатбаева, А.К. Джумадилаева. Sci. Eur., **50**–1 (50), 18 (2020).
- [18] Н.И. Черкашина. ЖТФ, **90** (1), 115 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.01.48671.163-19 [N.I. Cherkashina. Tech. Phys., **65** (1), 107 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220010028]
- [19] A. Galuga, G. Baravov, V. Gavrish, S. Smirnov, A. Losenkov, S. Vostrognutov. *Method and device for obtaining a powder from particles of tungsten or tungsten compounds with a size in the nano-, micron or submicron range* (European Patent №EP3138932A1, 08.03.2017)
- [20] И.Х. Худайкулов, Ж.Р. Равшанов, Х.Б. Ашууров, В.Н. Арустамов, Д.Т. Усманов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **8**, 43 (2022). DOI: 10.31857/S102809602208009X [I.Kh. Khudaykulov, J.R. Ravshanov, Kh.B. Ashurov, V.N. Arustamov, D.T. Usmanov. J. Surf. Investig: X-Ray Synchrotron Neutron Tech., **16** (4), 599 (2022). DOI: 10.1134/S1027451022040280]
- [21] В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, Н.И. Черкашина. Перспективные материалы, **7**, 15 (2019). DOI: 10.30791/1028-978X-2019-7-15-25 [V.I. Pavlenko, G.G. Bondarenko, N.I. Cherkashina. Inorganic Mater.: Appl. Res., **11** (2), 304 (2020). DOI: 10.1134/S2075113320020306]
- [22] N.I. Cherkashina, V.I. Pavlenko, A.N. Shkaplerov, A.A. Kuritsyn, R.V. Sidelnikov, E.V. Popova, L.A. Umnova, S.N. Domarev. Adv. Space Res., **73** (5), 2638 (2024). DOI: 10.1016/j.asr.2023.12.003
- [23] Д.В. Юров, В.И. Шведун, А.С. Алимов. Вестн. Моск. ун-та, Сер. 3. Физ. Астрон., **1**, 2310501 (2023). DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2310501 [D.S. Yurov, V.I. Shvedunov, A.S. Alimov. Moscow University Phys. Bull., **78** (1), 85 (2023). DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2310501]
- [24] О.В. Тхорик, В.А. Харламов, И.В. Полякова, Н.Н. Лой, М.Г. Помясова, В.И. Шишко. Вестник Росс. ун-та дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство, **18** (4), 541 (2023). DOI: 10.22363/2312-797X-2023-18-4-541-553 [O.V. Tkhorik, V.A. Kharlamov, I.V. Polyakova, N.N. Loy, M.G. Pomyasova, V.I. Shishko. RUDN J. Agron. Anim. Ind., **18** (4), 541 (2023). DOI: 10.22363/2312-797X-2023-18-4-541-553]
- [25] D.F. Crawford, H. Messel. *Electron-photon shower distribution function* (Elsevier Science, 2013, Berlin)
- [26] В.И. Беспалов. *Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом: уч. пособие* (Томский политех. ун-т, Томск, 2008)
- [27] В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, Н.И. Черкашина. Перспективные материалы, **8**, 5 (2015).
- [28] A.V. Pavlenko, N.I. Cherkashina, R.N. Yastrebinski, A.V. Noskov. Problems Atom. Sci. Technol., **111** (5), 21 (2017).
- [29] D. Drouin, A.R. Couture, D. Joly, X. Tastet, V. Aimez, R. Gauvin. Scanning, **29** (3), 92 (2007). DOI: 10.1002/sca.20000
- [30] P. Hovington, D. Drouin, R. Gauvin. Scanning, **19** (1), 1 (2006). DOI: 10.1002/sca.4950190101
- [31] M.J. Berger, J.S. Coursey, M.A. Zucker, J. Chang. *Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions* (NIST PML, Gaithersburg, 2017), DOI: 10.18434/T4NC7P
- [32] N.I. Cherkashina, V.I. Pavlenko, A.V. Noskov. Radiat. Phys. Chem., **159** (1), 111 (2019). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.02.041
- [33] Ю.М. Самойлова. Автореф. канд. дисс. (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015)
- [34] В.В. Краюшкин, П.А. Орленко, А.В. Ларичев. Атомная энергия, **61** (3), 218 (1986).
- [35] W.P. Swanson. *Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators international atomic energy agency* (IAEA, Vienna, 1979)