

12,14

Экспериментальное облучение полиэтиленовых композитов нейтронами и γ -квантами

© Н.И. Черкашина¹, В.И. Павленко¹, Д.С. Романюк¹, Р.В. Сидельников¹, П.И. Руднев², И.В. Чешигин²

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

² Центр АДЦ, Москва, Россия

E-mail: romanyuk.dmitrij.98@bk.ru

Поступила в Редакцию 18 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 28 февраля 2025 г.

Принята к публикации 5 марта 2025 г.

Представлены результаты исследования полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена высокого давления C_nH_{2n+2} , карбида бора B_4C и гидрида титана TiH_2 для защиты от радиационного воздействия нейтронов и γ -квантов. Представлена технология изготовления материалов следующего состава: C_nH_{2n+2} — 40% wt., B_4C — 5% wt., TiH_2 — 55% wt. (ПКМ- TiH_2 - B_4C) и C_nH_{2n+2} — 95% wt., B_4C — 5% wt. (ПКМ- B_4C). Предел прочности при изгибе ПКМ- TiH_2 - B_4C составляет 12.5 МПа, а ПКМ- B_4C — 4.8 МПа. Рассмотрена и описана структура материалов методом электронной микроскопии, проведена дефектоскопия для оценки качества получаемых композитов и удаления бракованных образцов. Проведено моделирование взаимодействия ионизирующего излучения с материалами с помощью программы XCOM 3.1. Экспериментальным путем определен коэффициент ослабления потока нейтронов: при энергии 2 MeV для ПКМ- B_4C он имеет значение 73.3 cm^{-1} , а для ПКМ- B_4C - TiH_2 его значение — 128.5 cm^{-1} . Оценен коэффициент ослабления потока γ -квантов, установленный экспериментальным путем: при энергии 2.5 MeV для ПКМ- B_4C этот коэффициент имеет значение 10.3 cm^{-1} , а для ПКМ- B_4C - TiH_2 — 19.22 cm^{-1} .

Ключевые слова: полиэтилен, гидрид титана (TiH_2), композиционный защитный материал, коэффициент ослабления.

DOI: 10.61011/FTT.2025.03.60272.311

1. Введение

Изучение взаимодействия ионизирующего излучения с различными средами имеет ключевое значение в разработке радиационно-защитных экранов. Нейтронное и γ -излучение являются значительной проблемой в таких областях как ядерная энергетика, медицина и аэрокосмическая инженерия [1]. Защитные материалы от γ -излучения и нейтронов являются базовым классом в ядерной инженерии и радиологической защите. Ионизирующее излучение, такое как γ -кванты и нейтроны, может нанести значительный вред находящемуся поблизости оборудованию и людям из-за своей сильной проникающей способности. Продолжительное воздействие радиации нейтронов и γ -квантов может вызвать повреждение живых тканей, электронных компонентов и конструкционных материалов [2,3]. Поэтому разработка эффективных материалов для защиты от нейтронного и γ -излучения является важной задачей для обеспечения безопасности и надежности в этих областях. Традиционные материалы для защиты от γ -излучения, такие как свинец, имеют ограничения из-за значительного веса защиты и ее токсичности [4–6].

В последние годы композитные материалы использовались как перспективное решение для защиты от нейтронного и γ -излучения. Комбинируя различные ма-

териалы с уникальными свойствами, можно добиться улучшения радиационно-защитных свойств композиционного материала, уменьшения веса и повышения безопасности [7–13].

Известен композит на основе полимерных нанокompозитов из эпоксидной смолы и наночастиц HfB_2 [14]. Данный композиционный материал, имеет хорошие показатели ослабления γ -излучения, однако практически не влияет на поток нейтронов. Для улучшения поглощения нейтронного и γ -излучения необходимо создавать композиционные материалы, способные справляться с большим количеством излучений, что было исследовано в работе [15]. В представленном в работе [15] композиционном материале в качестве матрицы используется политетрафторэтилен (ПТФЭ), а в качестве наполнителя — оксид висмута (Bi_2O_3), карбид вольфрама (WC), гидрид титана (TiH_2), карбид бора (B_4C). Данный композиционный материал хорошо справляется с замедлением быстрых нейтронов до тепловых, а также со снижением интенсивности нейтронного излучения. Однако в работе [15] отсутствуют данные по поглощению γ -квантов, что не позволяет в полной мере оценить способность материала к защите.

Также материалы с водородом в составе представляются большой интерес в изучении вопроса защиты от нейтронов из-за способности водорода замедлять быстрые ней-

троны до тепловых [16–18]. По сравнению с обычными водородными материалами, металлогидриды, которые обогащены водородом, сохраняют свои свойства при высоких температурах и, кроме того, имеют хорошие механические свойства [19–22].

Гидриды металлов обладают свойством полностью обратимого хранения водорода и хорошей объемной водородной емкостью. Плотность водорода делает его привлекательным в качестве нейтронной защиты. Во многих литературных источниках изучалось потенциальное использование гидридов металлов в качестве ядерных материалов в быстрых реакторах. В космической промышленности гидриды металлов, такие как гидрид титана и гидрид лития, можно использовать в качестве радиационной защиты в космических кораблях [23].

В данной работе представлено исследование композиционного материала на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД) с наполнителем из гидрида титана (TiH_2) и карбида бора (B_4C). Оценены физико-механические параметры образцов, а также проведены экспериментальные исследования по оценке их радиационно-защитных свойств к нейтронному и γ -излучению.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы

Для получения композиционного материала в качестве матрицы использовался (ПЭВД) марки 15303-003, (чистота > 99%, плотность 900–930 kg/m^3 , температура плавления 100–115 °С) (ООО „Казаньоргсинтез“, Россия), в качестве наполнителя были использованы два соединения: 1) карбид бора (B_4C), средний размер частиц 0.10–120 μm , $\rho = 2.52 \text{ g/cm}^3$, (ООО „Платина“, Россия) и 2) дробь гидрида титана (TiH_2) (ГОСТ 14-1-2159-77), (ООО „РУСХИМ“, Россия). Средний диаметр дробы был $\sim 0.2\text{--}2.5 \text{ mm}$. После помола средний размер частиц составлял 0.20–150 μm .

2.2. Изготовление композитов

Изготовление композитного материала происходило в несколько этапов. Первым этапом была подготовка наполнителей: дробь гидрида титана (TiH_2) размалывалась в ударной шаровой мельнице, с дальнейшим просеиванием через сито с размером ячейки 64 μm . Далее полученный порошок гидрида титана и карбида помещался в шаровую мельницу без добавления мелющих тел, где происходило смешение двух компонентов наполнителя. После чего полученная смесь высушивалась в сушильном шкафу при температуре 110 °С, в течение 10 min.

Вторым этапом являлась подготовка полиэтилена: из гранул (ПВДЭ) с помощью дробилки щековой (ЩД 6М)

был получен порошок размером 130–200 μm . Порошок ПЭВД изначально просушивался в сушильном шкафу при температуре 70 °С, в течение 15 min, с последующим просевом через сито в 140 μm . Далее подготовленный материал (ПЭВД) загружался в шаровую мельницу с ранее подготовленным по соотношению наполнителем. После загрузки материала добавлялись мелющие тела в соотношении 20:1 по массе. Далее производилась гомогенизация материалов в течение 3 min. Затем из подготовленного материала извлекались мелющие тела.

Этап третий: подготовленный материал подвергался горячему прессованию в пресс-форме, при удельном давлении 125 МПа, с использованием стальной пресс-формы с постоянным нагревом и выдержкой при температуре 140–160 °С в течение 20 min. После остывания пресс-формы проводилось извлечение материала, с последующей шлифовкой. Готовые образцы имели габаритные размеры $L = 98 \text{ mm}$, $B = 22.5 \pm 2.00 \text{ mm}$, $H = 98 \text{ mm}$.

Аналогичным методом были приготовлены образцы, содержащие только 5% wt. B_4C .

2.3. Оборудование и методы исследования

Для исследования структур использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Tescan MIRA (Tescan, Brno, Czech Republic) 4-ого поколения с катодом Шоттки. Прибор позволяет получить качественные СЭМ-снимки поверхностей материала и проводить тест элементарного состава в реальном времени. Он располагает удобным интерфейсом и упрощает получение данных о локальном составе образцов.

Испытания на изгиб проводились на испытательной машине РЭМ-100 (ООО „МЕТРОТЕСТ“, Республика Башкортостан, г. Нефтекамск, Россия). Предел прочности при изгибе определяли по стандартным методикам согласно ГОСТ ИСО 17138:2014. Нагружение проводилось для испытаний на трехточечный изгиб.

Измерения энергетических распределений плотности потока быстрых нейтронов и γ -квантов выполнялись с помощью спектрометра-дозиметра SDMF-1608SN (ООО „АДЦ“, г. Москва, Россия) [24] в диапазоне энергий нейтронов $\sim 0.8\text{--}16 \text{ MeV}$ и γ -квантов $\sim 0.1\text{--}9 \text{ MeV}$.

Источником быстрых нейтронов и γ -квантов являлся точечный изотропный источник с энергетическим спектром, близком к спектру деления U^{235} .

3. Результаты и обсуждение

3.1. Характеристики материалов

Для исследований были получены материалы, содержащие следующие компоненты:

- ПЭВД ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) 40% (по массе), карбид бора B_4C — 5%, гидрид титана (TiH_2) — 55% (обозначение материала ПКМ- $\text{TiH}_2\text{-B}_4\text{C}$).

- ПЭВД ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) 95% (по массе), карбид бора (B_4C) — 5% (обозначение материала ПКМ- B_4C).

Таблица 1. Параметры композита

Материал	Плотность, g/cm^3	Ядерная плотность, cm^{-3}	Толщина, см
ПКМ- B_4C	0.9267	$1.81 \cdot 10^{23}$	15
ПКМ- $\text{B}_4\text{C-TiH}_2$	1.619	$1.198 \cdot 10^{23}$	16.29

Таблица 2. Массовая доля вещества в композитных материалах

Композит	Наименование	Процентное соотношение, %
ПКМ- $\text{B}_4\text{C-TiH}_2$	C	35.34
	H	7.97
	B	3.91
	Ti	52.78
ПКМ- B_4C	C	82.6
	H	13.5
	B	3.9

В табл. 1 представлены физические величины исследуемых материалов, необходимые для вычисления полных сечений взаимодействия. В табл. 2 указана массовая доля вещества в композитных материалах.

3.2. Исследования прочностных характеристик материала

Образцы композиционных материалов были исследованы на испытательной машине РЕМ-100. Данные испытаний образцов на трехточечный изгиб, приведены на рис. 1.

На графике представлены результаты исследования прочностных характеристик композитных материалов, содержащих B_4C (карбид бора) в количестве 5% wt., а также добавку TiH_2 (гидрид титана) в количестве 55% wt.. График отражает зависимость предельного напряжения (σ_f) от деформации (ε_f) при трехточечном изгибе. Композит ПКМ- B_4C , B_4C (5% wt.) демонстрирует высокое предельное напряжение (более 12 МПа). При испытании композита ПКМ- $\text{B}_4\text{C-TiH}_2$ с содержанием карбида бора и гидрида титана в составе (B_4C 5% wt. + TiH_2 55% wt.) образцы показали среднее значение 4.8 МПа. Оба материала показывают пластическое поведение, но композит только с B_4C (5% wt.) достигает большего значения деформации ($\varepsilon_f \approx 14\%$), в то время как добавление TiH_2 приводит к уменьшению предельной деформации. Отметим, что в сравнении с образцом борированного полиэтилена композит с содержанием гидрида титана (TiH_2) потерял 61.60% прочности, что связано с повышением % наполнения. На основе полученных данных можно заключить, что композитный материал, содержащий 55% wt. TiH_2 и 5% wt. B_4C , демонстрирует удовлетворительную прочность при трехточечном изгибе, обеспечивая стабильные

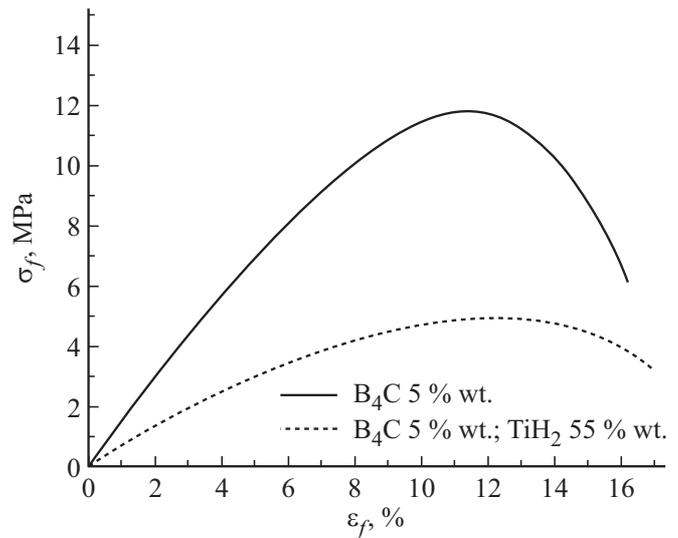


Рис. 1. График зависимости приложенной нагрузки от деформации образцов.

механические характеристики. Хотя его предельное напряжение ниже по сравнению с чистым B_4C (5% wt.), материал сохраняет достаточную конструкционную способность, что делает его перспективным для применения в изделиях, где требуется баланс между прочностью и пластичностью.

Добавление TiH_2 способствует изменению механизма разрушения, потенциально улучшая энергоёмкость деформации и обеспечивая комбинацию прочностных и деформационных свойств, что может быть критически важным для инженерных решений, требующих контроля над разрушением и повышения ударной вязкости.

3.3. Микроскопия образцов

Методом сканирующей электронной микроскопии, были получены микрофотографии излома композитного материала ПКМ- $\text{B}_4\text{C-TiH}_2$ (рис. 2).

Основной целью микроскопии является визуальный контроль размера частиц и распределения их в материале. Для получения излома использовался стандартный метод заморозки в жидком азоте образцов, применяемый для получения четкой, не искаженной структуры образца, что важно для анализа микроструктуры. Особенно это касается хрупких материалов.

На рис. 2, а отчетливо видны частицы наполнителей, которые распределены равномерно в матрице. При большем увеличении рис. 2, b и c в большей степени различимы частицы неправильной формы, с угловатыми краями. Размер частиц можно определить по рис. 2, c. Основная масса частиц имеет размер до 20 мкм. Благодаря различной контрастности на СЭМ изображениях, возможно идентифицировать принадлежность частиц. Так как титан (Ti) в составе гидрида титана обладает большим атомным номером, он выделяет боль-

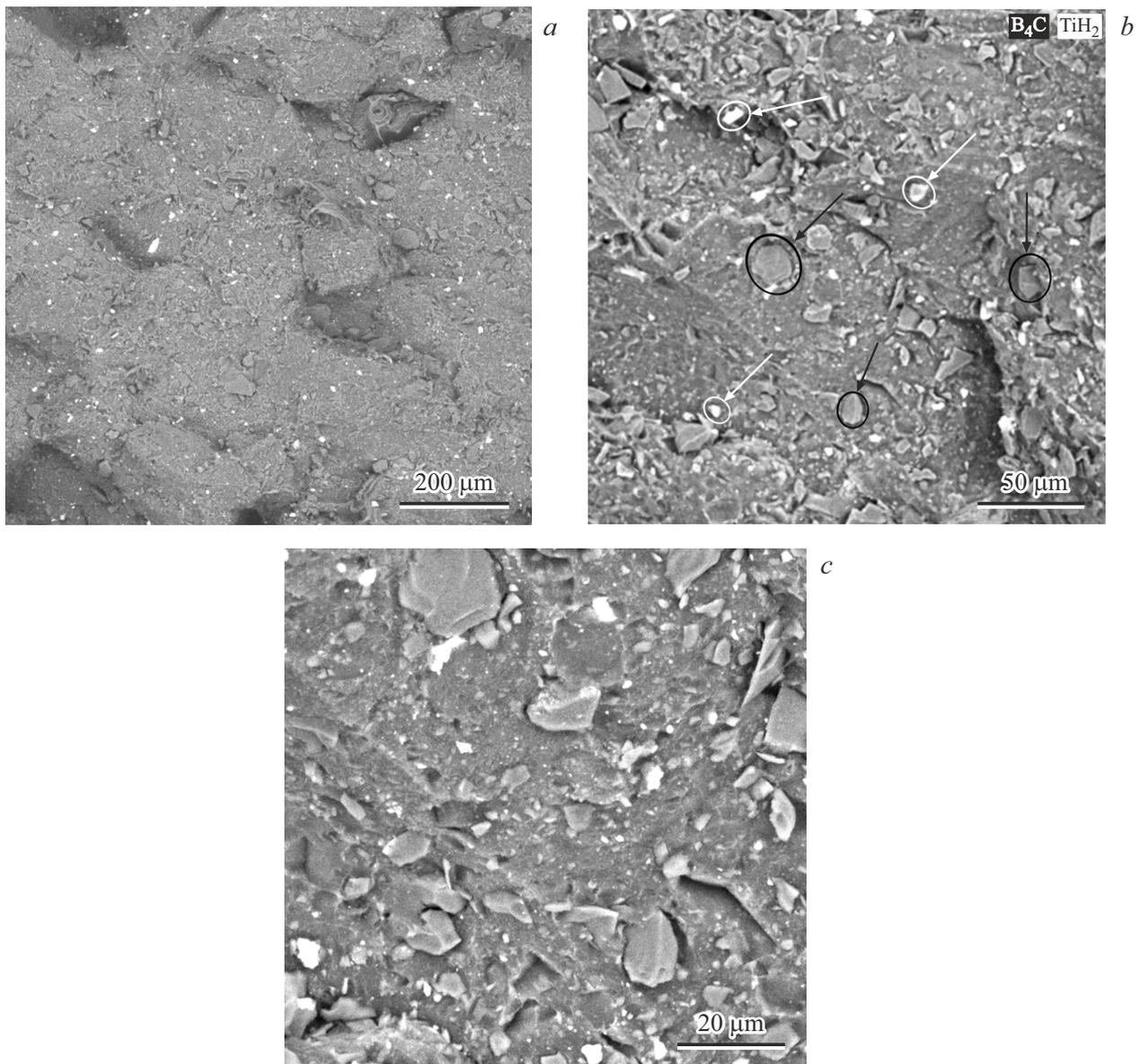


Рис. 2. Микрофотографии излома композитного материала ПКМ-В₄С-ТiН₂.

ше вторичных электронов, что делает его участки светлее, в то время карбид бора поглощает больше электронов и излучает меньше вторичных электронов, что делает его участки темнее. Таким образом, разная контрастность на изображениях обусловлена различием в атомной структуре материалов, их взаимодействии с электронным пучком и, как следствие, количеством излучаемых вторичных электронов. Различные частицы карбида имеют более крупную структуру размером $\sim 10\text{--}20\text{ мкм}$.

На рис. 3 представлены СЭМ-изображения разных областей излома композита ПКМ-В₄С. На рис. 3, *a* различимы частицы карбида бора неправильной формы. На рис. 3, *b* можно наблюдать распределение частиц внутри композита, а так же наличие пустых полостей,

которые не заполнены частицами, так как композит имеет малый процент наполнения.

4. Результаты измерений

4.1. Моделирование

Моделирование проводилось для гомогенной смеси композита с целью определения механизмов ослабления фотонного излучения, анализа вклада основных взаимодействий (фотоэффект, эффект Комптона, когерентное рассеяние, образование пар) в полное сечение взаимодействия γ -квантов с материалом, сравнения ослабления фотонного излучения в различных композитах, изучения изменений в характере взаимодействий γ -квантов с

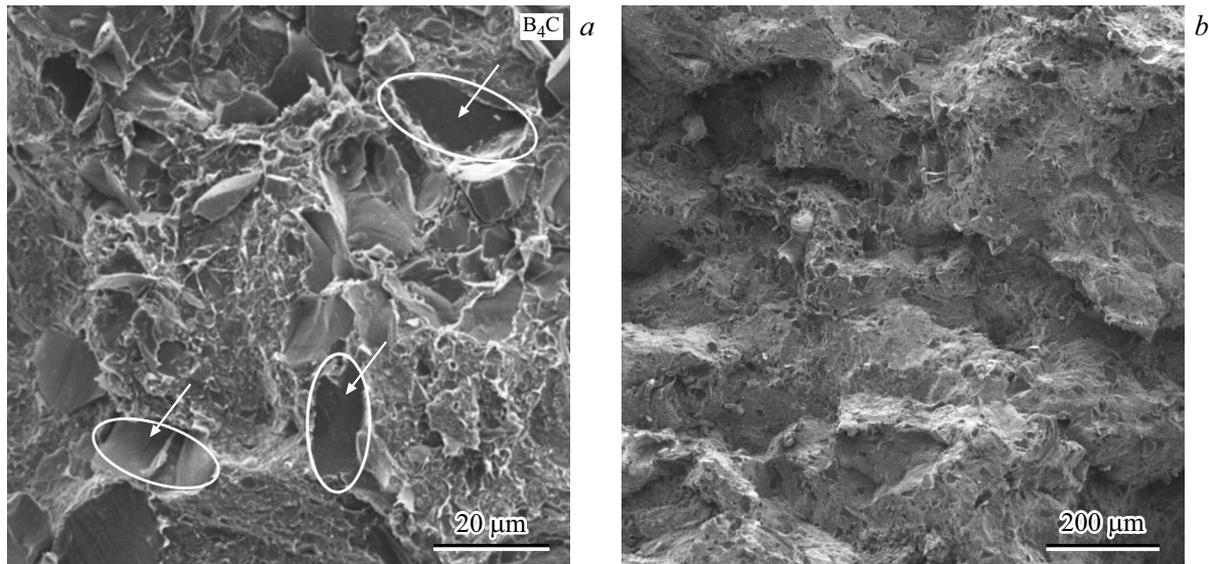


Рис. 3. Микрофотографии излома композитного материала ПКМ-В₄С.

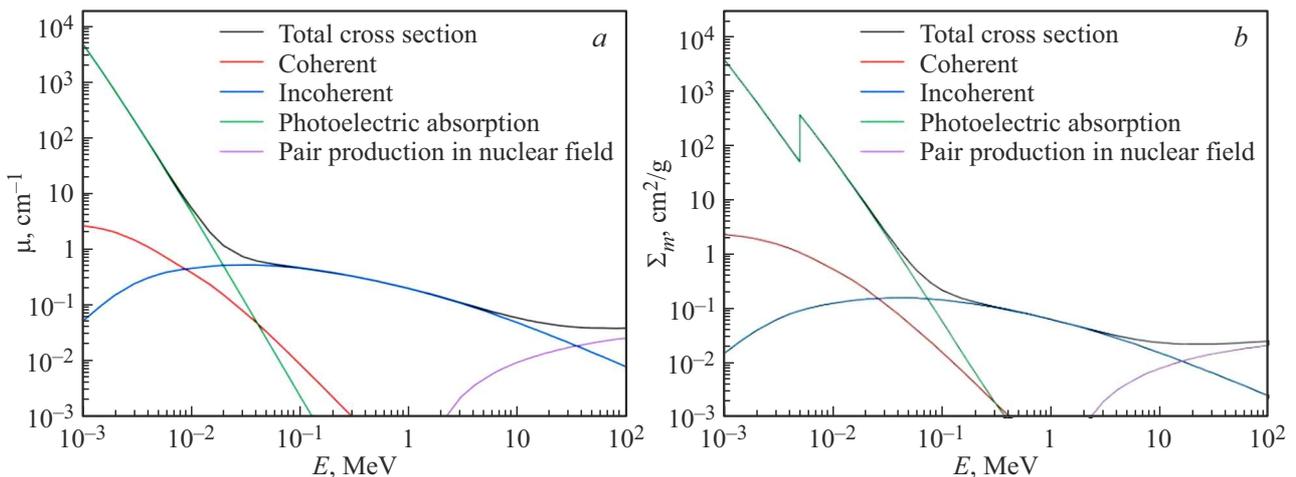


Рис. 4. Зависимость полного и частичных сечений взаимодействия фотонного излучения с материалами композитов ПКМ-В₄С (а) и ПКМ-В₄С-ТiН₂ (б).

веществом при добавлении TiH₂ и выявления различий между ПКМ-В₄С и ПКМ-В₄С-ТiН₂.

Моделирование выполнялось при помощи программы ХСОМ 3.1 (М.Ј. Berger, Ј.Н. Hubbell) с использованием встроенной в нее библиотеки сечений парциальных взаимодействий. Вывод данных программой производится по полным и парциальным макроскопическим массовым сечениям взаимодействия (Σ^m), однако для большего удобства далее представлены полные и парциальные микроскопические сечения (σ), переход к которым производился по формуле:

$$\mu = \frac{\mu^m}{\rho}, \quad (1)$$

где μ^m — массовое сечение взаимодействия материала, cm^2/g ; ρ — ядерная плотность материала, $\text{nucleus}/\text{cm}^3$.

По данным анализа результатов моделирования для композита ПКМ-В₄С рис. 4, а, ввиду высокого содержания легких элементов (¹H, ¹⁰B, ¹²C), для фотонов с энергией более 0.2 MeV вклад фотоэффекта практически исчезает. В диапазоне 1–7 MeV основным механизмом ослабления становится эффект Комптона, который доминирует из-за высокой вероятности взаимодействия фотонов с электронами легких атомов. Вклад образования электрон-позитронных пар начинает проявляться при энергиях от 5 MeV, но становится значительным лишь при более высоких энергиях (свыше 10 MeV). Анализ моделирования для композита ПКМ-В₄С-ТiН₂ (рис. 4, б) показал, что добавление TiH₂ изменяет характер взаимодействия γ -квантов, приводя к увеличению вклада фотоэффекта в диапазоне 0.1–0.7 MeV, что связано с наличием титана, имеющего более высокий атомный

номер. Когерентное рассеяние фотонов на связанных электронах также значительно возрастает по сравнению с материалом ПКМ- B_4C , особенно в области низких энергий. Вклад образования электрон-позитронных пар становится заметным уже при 5 MeV, что отличает этот композит от ПКМ- B_4C , где данный эффект начинает проявляться при более высоких энергиях. В диапазоне 1–7 MeV по-прежнему доминирует эффект Комптона, но сечение взаимодействия в целом выше, чем у ПКМ- B_4C , за счет вклада других процессов.

Таким образом, моделирование подтверждает, что модификация состава материала позволяет контролировать механизмы взаимодействия γ -квантов, оптимизируя защитные свойства композита в зависимости от диапазона энергий излучения.

4.2. Экспериментальные исследования

В настоящей работе были измерены энергетические спектры быстрых нейтронов и γ -квантов для композита ПКМ- B_4C и специального композитного защитного материала ПКМ- B_4C-TiH_2 . Результаты измерений представлены на рис. 5–10.

Рис. 5 показывает измеренные энергетические распределения плотности потока γ -квантов, а на рис. 6 представлены энергетические распределения плотности потока нейтронов с использованием композитных материалов в качестве экранирующего материала и без него.

Из рис. 5 следует, что оба композита существенно уменьшают поток γ -квантов по всему диапазону энергий, особенно в области низких энергий (< 1 MeV), где доминирует фотоэффект. При энергиях 1–7 MeV ослабление в основном обусловлено эффектом Комптона. В диапазоне свыше 7 MeV начинает вносить вклад процесс образования электрон-позитронных пар, особенно заметный при энергиях выше 8 MeV. ПКМ- B_4C-TiH_2 (пунктирная линия) ослабляет поток γ -квантов сильнее, чем ПКМ- B_4C . Это связано с тем, что наличие TiH_2

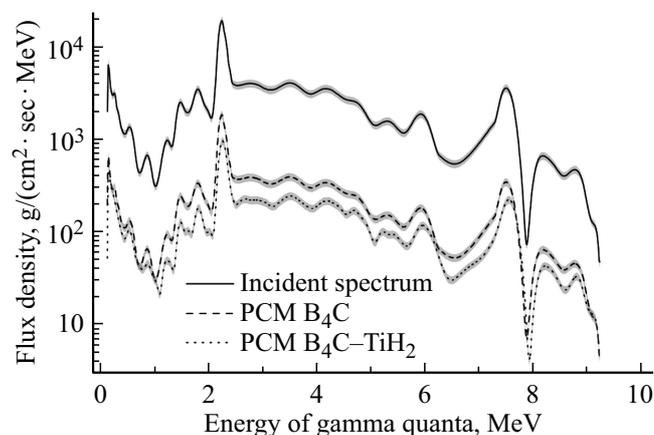


Рис. 5. Измеренные энергетические распределения плотности потока γ -квантов.

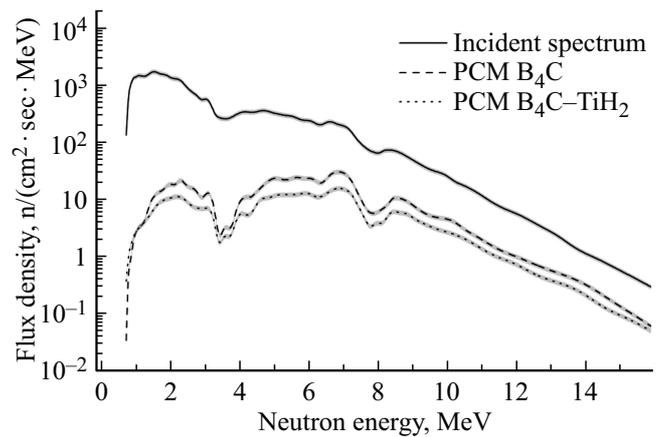


Рис. 6. Измеренные энергетические распределения плотности потока нейтронов.

увеличивает вклад фотоэффекта в области низких энергий и образование электрон-позитронных пар в области высоких энергий. Когерентное рассеяние также играет роль при низких энергиях, особенно для ПКМ- B_4C-TiH_2 . Рис. 6 демонстрирует, что оба композита снижают интенсивность нейтронного потока, особенно в области низких и средних энергий (до 8 MeV). Ослабление нейтронного потока связано с механизмами рассеяния и поглощения, включая упругое и неупругое рассеяние, а также реакции захвата. Анализ данных показывает, что композит ПКМ- B_4C-TiH_2 демонстрирует более выраженное снижение потока нейтронов чем композит ПКМ- B_4C . Это связано с наличием гидрида титана (TiH_2), который эффективно поглощает и замедляет нейтроны, увеличивая долю упругого рассеяния на ядрах водорода. При энергиях выше 8–10 MeV различия между композитами становятся менее выраженными, так как здесь доминируют ядерные реакции взаимодействия с более тяжелыми элементами.

Для получения результатов полных сечений используем известное уравнение для „нерассеянной“ составляющей излучения:

$$F_H(E) = F_0(E) \exp(-n\sigma(E)x), \quad (2)$$

где n — ядерная плотность материала (nucleus/cm³), $\sigma(E)$ — искомое поперечное сечение (cm²), x — толщина образца (cm).

Полные сечения можно рассчитать по формуле (3):

$$\sigma(E) = (1/(nx)) \ln(F_0(E)/F_H(E)). \quad (3)$$

Результаты расчетов полных сечений по формуле (3) для нейтронов представлены на рис. 7 и 8 и для γ -квантов на рис. 9 и 10.

Данные рисунки показывают зависимости полного сечения взаимодействия (в барнах) от энергии нейтронов (МэВ) для двух композитов. Можно отметить основные результаты. На рис. 7 в области низких

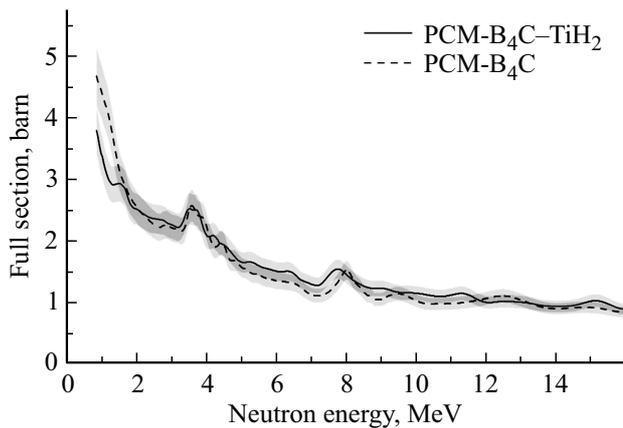


Рис. 7. Распределение энергии полного нейтронного сечения.

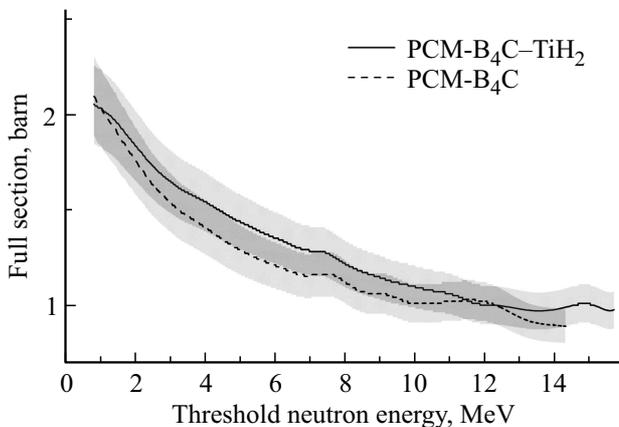


Рис. 8. Распределения полного сечения от пороговой энергии нейтронов.

энергий (до 4 MeV) сечение взаимодействия заметно выше, что связано с упругим и неупругим рассеянием нейтронов. При увеличении энергии нейтронов полное сечение постепенно снижается, стабилизируясь в диапазоне 8–15 MeV. Композит ПКМ-В₄С-ТiН₂ демонстрирует немного большее сечение, особенно на низких энергиях, что объясняется дополнительным вкладом взаимодействия с атомами водорода (из ТiН₂). На рис. 8 видно, что в области низких энергий (до 4–5 MeV), сечение заметно выше, что связано с процессами замедления и поглощения нейтронов. По мере роста пороговой энергии полное сечение снижается, особенно после 6–8 MeV, где доминируют другие механизмы рассеяния. Как и в первом случае, ПКМ-В₄С-ТiН₂ демонстрирует немного большее сечение, что подтверждает его более высокую эффективность в поглощении и рассеянии нейтронов по сравнению с ПКМ-В₄С. Добавление ТiН₂ способствует более эффективному замедлению нейтронов.

Особое внимание стоит уделить данным на рис. 9, где заметна обширная область резонансных структур. На данном рисунке резонансная структура проявляется как колебания в диапазоне 0–2 МэВ. В области

$E < 1$ МэВ наблюдается пик полного сечения, который объясняется резонансным захватом нейтронов в карбиде бора (эффективное сечение поглощения нейтронов В-10) и возможным рассеянием на ТiН₂. Разница между РСМ-В₄С и РСМ-В₄С-ТiН₂ объясняется тем, что ТiН₂ дополнительно взаимодействует с нейтронами, создавая дополнительную дисперсию. Что касается резонансной структуры в диапазоне 1–3 МэВ, то в этой области хорошо видны колебания полного сечения, обусловленные резонансным рассеянием на титановых ядрах. Титан (особенно изотоп Тi-48) обладает несколькими резонансными уровнями захвата нейтронов в этом диапазоне энергий. Водород в составе гидрида титана может передавать часть энергии нейтрону, изменяя его кинематический спектр. Колебания в В₄С, связанные с возбужденными состояниями ядра. Различие между кривыми РСМ-В₄С-ТiН₂ и РСМ-В₄С особенно заметно, сплошная линия с ТiН₂ показывает большее полное сечение, что свидетельствует о дополнительном поглощении нейтронов и рассеянии на ТiН₂. В области выше 3–4 MeV происходит уменьшение резонансного поглощения, и вклад неупругого рассеяния становится доминирующим. Полное сечение уменьшается, но остаются слабо выраженные колебания, связанные с реакциями неупругого рассеяния на атомах титана и ядерными реакциями с участием В₄С, включая расщепление ядра. После 6 MeV разница между РСМ-В₄С и РСМ-В₄С-ТiН₂ уменьшается, так как эффект замедления нейтронов становится менее значимым. Вклады ТiН₂ и В₄С определяют сложную картину пиков и провалов в сечении, с тенденцией к уменьшению после 6 MeV. Вклад ТiН₂ выражается в увеличении общего сечения в области 1–4 MeV, что объясняется рассеянием и поглощением в титане. Основные отличия между РСМ-В₄С-ТiН₂ и РСМ-В₄С обусловлены наличием титана и водорода, которые повышают вероятность рассеяния, увеличивая интегральное сечение. При интегрировании спектров эти колебания сглаживаются, так как усредняются резонансные пики и неупругие взаимодействия в энергетическом диапазоне. Погрешность энергетической калибровки ($\leq 2.5\%$) также влияет на

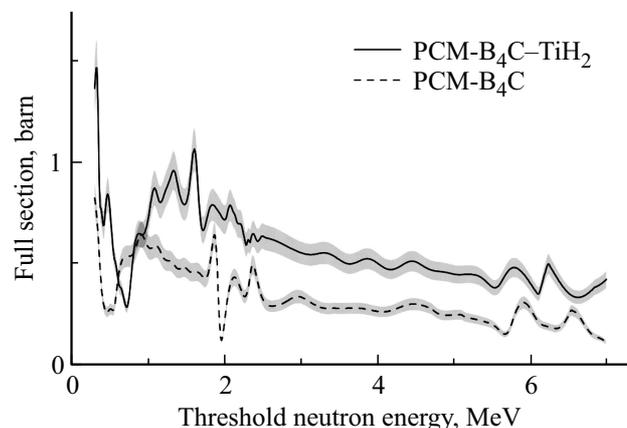


Рис. 9. Распределение энергии полного сечения γ -квантов.

Таблица 3. Данные о коэффициенте ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами

Материал	Коэффициент ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами, cm^{-1}							
	Энергия нейтронов E , MeV							
	0.81	1.1	2.0	4.0	7.0	10.0	13.0	16.0
ПКМ-В ₄ С	1183.8	428.1	73.3	37.7	6.7	5.6	4.7	4.6
ПКМ-В ₄ С-ТiН ₂	993.8	472.4	128.5	59.9	12.6	9.9	7.3	5.6

Таблица 4. Данные о коэффициенте ослабления потока гамма-квантов исследуемыми материалами

Материал	Коэффициент ослабления гамма-квантов исследуемыми материалами, cm^{-1}							
	Энергия гамма-квантов E , MeV							
	0.2	0.6	0.8	1.6	2.5	4.0	6.0	9.0
ПКМ-В ₄ С	10.31	11.34	10.32	10.32	10.3	10.35	10.52	11.43
ПКМ-В ₄ С-ТiН ₂	11.37	14.9	14.67	19	19.22	16.9	15.57	12.65

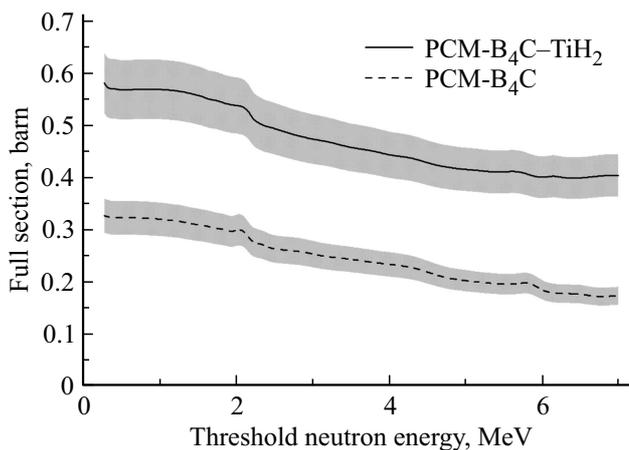


Рис. 10. Распределения полного сечения от пороговой энергии γ -квантов.

точность определения значения сечения. При интегрировании спектров эта проблема естественным образом устраняется (рис. 10).

Из представленных результатов по полному сечению для нейтронов ясно, что материал ПКМ-В₄С-ТiН₂ имеет преимущества перед защитным материалом ПКМ-В₄С в диапазоне энергий от 2 до 10 MeV около ~ 200 mbarn, при энергиях от 11.3 до 12.4 MeV различия не наблюдается, однако при дальнейшем увеличении энергии материал ПКМ-В₄С-ТiН₂ имеет явное преимущество (из-за неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах тяжелых элементов).

Из представленных результатов полного сечения для γ -квантов видно, что материал ПКМ-В₄С-ТiН₂ имеет явное преимущество перед ПКМ-В₄С (~ 250 mbarn во всем представленном диапазоне энергий γ -квантов).

На основании полученных данных об энергетических распределениях плотности потока нейтронов (γ -квантов) $F_0(E)$ и энергетических распределениях плотности потока нейтронов (γ -квантов) за исследуемым образцом $F_H(E)$ был рассчитан коэффициент ослабления по формуле (4):

$$K = \frac{F_0(E)}{F_H(E)}. \tag{4}$$

В табл. 3 представлены расчетные данные по коэффициенту ослабления потока нейтронов исследуемыми материалами, а в табл. 4 — данные по коэффициенту ослабления потока γ -квантов.

Таким образом, добавление ТiН₂ в защитный материал из борированного полиэтилена в указанных выше количествах повышает его защитные характеристики для быстрых нейтронов. Таким же образом для γ -квантов добавление тяжелого компонента в борированный полиэтилен улучшает защитные характеристики такого композитного материала.

Следовательно, можно сделать вывод, что композитный материал ПКМ-В₄С-ТiН₂ является достаточно хорошим компромиссом между защитой от нейтронов и защитой от γ -излучения, по крайней мере, в исследованном диапазоне энергий излучения и обладает хорошими физико-технологическими свойствами для изготовления реакторных защитных композиций.

5. Заключение

Преимущество ПКМ-В₄С-ТiН₂ над ПКМ-В₄С практически во всем энергетическом диапазоне (кроме $E < 1.5$ MeV) объясняется тем, что гидрид титана (ТiН₂) содержит водород, который значительно эффективнее замедляет нейтроны за счет упругого рассеяния. Несмотря

на то, что сам титан играет роль в неупругом рассеянии, основную роль в снижении энергии нейтронов играет водород в TiH_2 , а не сам титан. При $E < 1.5 \text{ MeV}$ преимущество остается у B_4C , так как бор обладает очень высоким сечением поглощения тепловых нейтронов.

Таким образом, добавление в борированный полиэтилен тяжелого материала в указанных выше количествах не ухудшает его защитные характеристики для нейтронов, а с гидридом титаном даже несколько улучшает их. Для γ -квантов добавление в борированный полиэтилен тяжелого материала естественно улучшают защитные характеристики такого композитного материала.

Также необходимо отметить, что композитный материал ПКМ- B_4C - TiH_2 является достаточно хорошим компромиссом между защитой от нейтронов и защитой от гамма-излучения, по крайней мере, в исследуемом диапазоне энергий излучений и обладает хорошими физическими и технологическими свойствами для изготовления защитных композиций.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ имени В.Г. Шухова.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Apkin. *Procedia — Soc. Behav. Sci.* **149**, 59–64 (2014).
- [2] C. Guo, Q. Wang, P. Shuai, T. Wang, W. Wu, Y. Li, S. Huang, J. Yu, L. Yi. *Chemosphere* **357**, 142030 (2024).
- [3] J.J. Broerse. in *Advances in Radiation Protection and Dosimetry in Medicine* / Editors: R.H. Thomas, V. Perez-Mendez. Springer, US (1980) p. 415–429.
- [4] R.N. Ihsani, P.L. Gareso, D. Tahir. *Radiat. Phys. Chem.* **218**, 111619 (2024).
- [5] M. Asgari, H. Afarideh, H. Ghafoorifard, E.A. Amirabadi. *Nucl. Eng. Technol.* **53**, 12, 4142–4149 (2021).
- [6] F. Erdogan, B. Goddard, R. Mohammadi, J.V. Rojas. *Radiat. Phys. Chem.* **222**, 111884 (2024).
- [7] W. Abdullah, R.M. Ramli, T.H. Khazaalah, N.Z.N. Azman, T.M. Nawafleh, F. Salem. *Nucl. Eng. Technol.* **56**, 9, 3608–3615 (2024).
- [8] Muh. Ilham Akbar, B. Armynah, D. Tahir. *Ind. Crops Prod.* **222**, 119440 (2024).
- [9] S.M. Kassem, S.R. El-Shawadfy, N.A. Kotb. *Prog. Nucl. Energy.* **176**, 105393 (2024).
- [10] H. He, Y. Xu, B. Zhang, Q. Wang, W. Li, Y. Cai. *J. Energy Storage* **100**, 113465 (2024).
- [11] A.M. El-Khatib, M.T. Alabsy, A.Y. El-Khatib, M.F. Dib, M.I. Abbas. *Nucl. Eng. Technol.* **56**, 10, 4103–4114 (2024).
- [12] M. Yilmaz, F. Akman. *Appl. Radiat. Isot.* **200**, 110994 (2023).
- [13] J.C. Knott. *Compos. Sci. Technol.* **233**, 109876 (2023).
- [14] F. Erdogan, B. Goddard, R. Mohammadi, J.V. Rojas. *Radiat. Phys. Chem.* **222**, 111884 (2024).
- [15] 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, 2638–2651 (2024).
- [16] H. Ogul, B. Gultekin, H. Yildiz, H. Us, F. Bulut. *Radiat. Phys. Chem.* **219**, 111686 (2024).
- [17] G. Almisned, G. Susoy, H.O. Tekin. *Radiat. Phys. Chem.* **218**, 111585 (2024).
- [18] J. Rataj, P. Suk, T. Bílý, M. Štefánek, J. Frýbort. *Appl. Radiat. Isot.* **168**, 109529 (2021).
- [19] C. Kursun, M. Gao, A.O. Yalcin, K.A. Parrey, Y. Gaylan. *Ceram. Int.* **50**, 15, 27154–27164 (2024).
- [20] X. Huang, Z. Du, Y. Li, Z. Li, X. Yang, M.-J. Li. *Energy* **302**, 131813 (2024).
- [21] M.A. Al Zaman, N.J. Monira. *Radiat. Phys. Chem.* **205**, 110706 (2023).
- [22] M. Naito, S. Kodaira, R. Ogawara, K. Tobita, Y. Someya, T. Kusumoto, H. Kusano, H. Kitamura, M. Koike, Y. Uchi-hori, M. Yamanaka, R. Mikoshiba, T. Endo, N. Kiyono, Y. Hagiwara, H. Kodama, S. Matsuo, Y. Takami, T. Sato, S. Orimo. *Life Sci. Space Res.* **26**, 69–76 (2020).
- [23] H.-W. Li, Y. Yan, S. Orimo, A. Züttel, C.M. Jensen. *Energies* **4**, 1, 185–214 (2011).
- [24] П. Руднев, И. Чешигин. *Электроника, наука, технология, бизнес* **4**, 00225 (2023).

Редактор А.Н. Смирнов