

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-86-93

*Ястребинский Р.Н., Карнаухов А.А., Павленко В.И., \*Городов А.И., Акименко А.В., Фанина Е.А.*  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
\*E-mail: gorodov-andreyu@mail.ru

## РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ТЕРМОСТОЙКОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРОБИ ГИДРИДА ТИТАНА

**Аннотация.** В статье приводится описание технологии получения высокоэффективного композиционного радиационно-защитного материала, на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана и глинозёмистого цементного вяжущего. Исследованы физико-механические свойства полученного композита. Представлены результаты экспериментального исследования радиационно-защитных свойств композиционного материала на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана и глинозёмистого цемента по отношению к гамма- и нейтронному излучению. Для измерений использовались точечные изотопные источники быстрых нейтронов  $Pu-\alpha-Be$  (энергия нейтронов – 4,5 МэВ), изотопный источник  $\gamma$ -излучения  $Cs-137$  (энергия гамма-квантов – 0,661 МэВ) и изотопный источник  $\gamma$ -излучения  $Co-60$  (средняя энергия  $\gamma$ -квантов – 1,25 МэВ). В работе приведено сравнение эффективности защиты на основе композита и бетона. Показано, что при одинаковой кратности ослабления нейтронного излучения толщина защиты из композита на основе модифицированной дроби гидрида титана и глинозёмистого цемента будет в ~ 1,7 раз меньше, чем из бетона. Использование композиционных материалов на основе модифицированной дроби гидрида титана и глинозёмистого связующего позволит существенно упростить технологию монтажа защиты, снизить ее массогабаритные характеристики, стоимость и повысит надежность.

**Ключевые слова:** гидрид титана, композит, радиационно-защитные свойства, глинозёмистый цемент, нейтронное излучение, гамма-излучение.

**Введение.** Несмотря на постоянное совершенствование режимов ядерной безопасности, вопрос обеспечения защиты от радиации на объектах ядерной энергетики является актуальным. Данный вопрос особо значим в связи с последними важными событиями на Белоярской АЭС: реактор БН-800 четвертого энергоблока впервые переведён на работу с полной загрузкой активной зоны уран-плутониевым МОКС-топливом и утверждением дорожной карты строительства пятого энергоблока с реактором БН-1200М [1]. Эти события важны для развития атомной отрасли нашей страны, в особенности для перехода к двухкомпонентной атомной энергетике с замыканием ядерного топливного цикла. Одновременно с этим немаловажное значение имеют вопросы создания высокоэффективных радиационно-защитных конструкционных материалов для обеспечения безопасного функционирования реакторной установки.

Необходимым свойством для радиационно-защитных материалов реакторов на быстрых нейтронах является их термическая стойкость и эффективное ослабление нейтронного и вторичного  $\gamma$ -излучений. Известно, что для эффективного замедления нейтронов требуются материалы с большим содержанием водорода. Одним из наиболее эффективных материалов нейтронной

защиты является гидрид титана, обладающий высоким содержанием водорода и сечением неупругого рассеяния нейтронов на ядрах титана [2–6]. Для повышения термической стабильности на поверхности гидрида титана создают многослойное покрытие, выполняющее функции ловушек и диффузионных барьеров водорода [7].

В данной работе представлены экспериментальные исследования радиационной стойкости и радиационно-защитных свойств композиционного материала на основе гидрида титана, содержащего электрохимически осажденное титановомедное покрытие  $Ti(=Ti-O-Cu)Cu$ , по отношению к  $\gamma$ - и нейтронному излучению точечных радиоизотопных источников в барьерной геометрии защиты.

**Материалы и методы.** В работе исследуется композиционный материал, состоящий из дроби гидрида титана, модифицированной титановомедным покрытием  $Ti(=Ti-O-Cu)Cu$ , глинозёмистого цемента, суперпластификатора и воды. Данный состав обусловлен тем, что для создания высокоэффективных радиозащитных композитов для реакторов на быстрых нейтронах необходимо добиться максимального содержания водородсодержащего материала, то есть дроби гидрида титана, а также плотности и подвижности композиционной смеси. Подвижность играет важную роль в случае заполнения

полостей конструкций радиационной защиты для исключения образования в них пустот. Материал получали методом виброуплотнения с частотой колебаний виброплощадки 3000 в минуту при амплитуде 0,5 мм, с последующим твердением в естественных (стандартных) условиях в течение 28 суток. Для исследований использовались композиционные блоки размером 200×200×100 мм (3 блока) и 200×200×50 мм (1 блок), дополнительно подвергшиеся термической обработке при 400 °С

до постоянной массы. Максимальная толщина слоя защиты составляла 35 см. Химический состав разработанного композиционного материала на глиноземистом цементе после рабочего режима сушки при 400 °С в течение 100 часов, представлен в таблице 1.

Физико-механические свойства разработанного композиционного материала на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана представлены в таблице 2.

Таблица 1

**Химический состав композита на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана и глиноземистого цемента, масс. %**

TiH <sub>1,982</sub>	Cu	Ti	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CuO	H <sub>2</sub> O
78,81	0,95	0,24	0,58	11,53	0,19	6,15	0,29	0,38	0,22	0,12	0,54

Таблица 2

**Физико-механические свойства композита**

Показатель	Численное значение
Объемная масса композиционной смеси, г/см <sup>3</sup>	3,39±0,03
Плотность (28 суток твердения), г/см <sup>3</sup>	3,36±0,03
Плотность (сушка 110 °С), г/см <sup>3</sup>	3,33±0,03
Плотность (сушка 400 °С), г/см <sup>3</sup>	3,28±0,03
Предел прочности при сжатии после 28 суток твердения ( <sup>28 сут.</sup> R <sub>сж</sub> ), МПа	38,2±1,2
<sup>28 сут.</sup> R <sub>сж</sub> (сушка 110 °С), МПа	42,4±1,2
<sup>28 сут.</sup> R <sub>сж</sub> (сушка 300 °С), МПа	41,5±1,2
<sup>28 сут.</sup> R <sub>сж</sub> (сушка 400 °С), МПа	40,5±1,2
Коэффициент подвижности смеси	1,76±0,10
Коэффициент теплопроводности при 20 °С, Вт/(м · К)	4,35
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) при	
20 °С	1,042
50 °С	1,046
100 °С	1,053
150 °С	0,926
200 °С	0,934
250 °С	0,942
300 °С	0,949
КЛТР, м · град <sup>-1</sup>	5,21·10 <sup>-6</sup>

Ослабление плотности потоков нейтронов и мощности дозы  $\gamma$ -излучения измерялись в барьерной геометрии, когда источник излучения и детектор находятся не внутри исследуемой среды (бесконечная геометрия), а по обе стороны слоя защитного барьера заданной толщины. Блоки имели поперечный размер 20×20 см<sup>2</sup> и толщину от 10 до 35 см, что соответствует 2–3 длинам свободного пробега излучения. С боков блоки и детектор были окружены дополнительно блоками из свинца (при  $\gamma$ -облучении) или полиэтилена (при нейтронном облучении), что позволило снизить утечку излучений в поперечных направлениях.

Для измерений использовались точечные изотопные источники быстрых нейтронов Pu- $\alpha$ -

Ве с выходом нейтронов 5,67·10<sup>6</sup> 1/сек (энергия нейтронов – 4,5 МэВ), изотопный источник  $\gamma$ -излучения <sup>137</sup>Cs, активностью 7,95·10<sup>9</sup> Бк (энергия гамма-квантов – 0,661 МэВ) и изотопный источник  $\gamma$ -излучения <sup>60</sup>Co, активностью 4,16·10<sup>8</sup> Бк (средняя энергия  $\gamma$ -квантов – 1,25 МэВ).

**Основная часть.** Измерения радиационных функционалов проводились при условиях, когда расстояние от детектора до источника было постоянным и соответствовало максимальной толщине защиты 35 см. Толщина композита набиралась согласно толщине каждого отдельного защитного блока. Кроме того, учитывалась поправка на геометрический центр детектирования (рис. 1).

При расчетах значение поправки для плотности потока быстрых нейтронов ( $\Phi_b$ ) и мощности дозы  $\gamma$ -квантов ( $P_\gamma$ ) принято 2 см, а для плотности

потока промежуточных и быстрых нейтронов ( $\Phi_{пр+б}$ ) – 7,6 см.

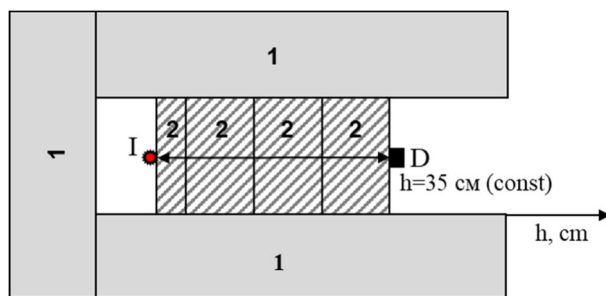


Рис. 1. Барьерная геометрия измерений ослабления нейтронного излучения от источника Pu- $\alpha$ -Be: 1 – экран из полиэтилена, 2 – защитный композит

Для замедления нейтронов, между исследуемым материалом и источником нейтронного излучения Pu- $\alpha$ -Be, размещали 8 см полиэтиленовый слой. Кроме того, проникновение быстрых нейтронов через слой полиэтилена способствует возникновению источника тепловых нейтронов необходимой мощности на его внешней поверх-

ности. На рисунке 2 представлена схема барьерной геометрии для измерения плотности потока тепловых нейтронов ( $\Phi_T$ ). В зависимости от толщины слоя защитного материала изменялось расстояние ( $h$ ) между источником излучения и детектором. При интерпретации результатов учитывался фактор геометрического ослабления тепловых нейтронов ( $1/h$ ).

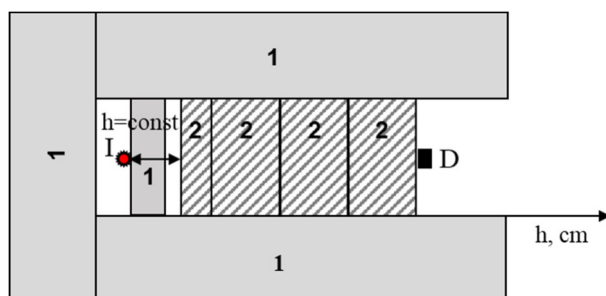


Рис. 2. Барьерная геометрия измерений ослабления плотности потока тепловых нейтронов от источника Pu- $\alpha$ -Be: 1 – экран из полиэтилена, 2 – защитный композит

Экспериментально полученные функции ослабления плотности потоков нейтронов различных энергий в композиционном материале на

основе модифицированной титаномедным покрытием дроби гидроксида титана и глиноземистого цемента представлены на рисунке 3.

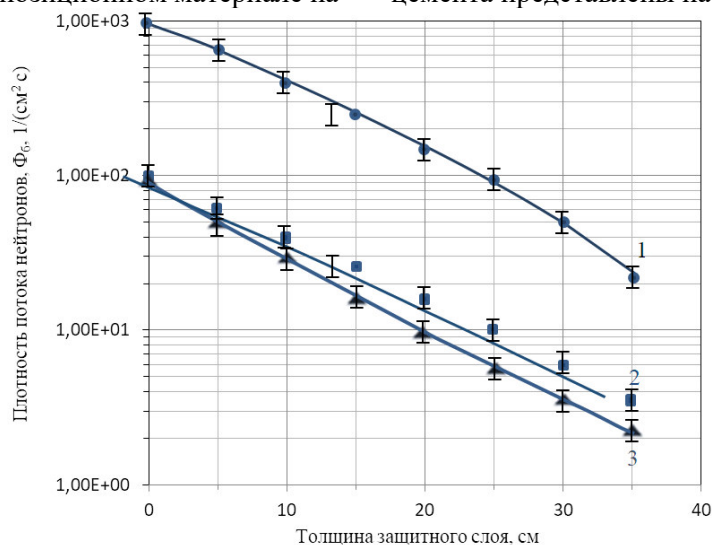


Рис. 3. Функции ослабления плотности потока нейтронного излучения Pu- $\alpha$ -Be источника композиционным материалом на основе модифицированной титаномедным покрытием дроби гидроксида титана: 1 – быстрые нейтроны, 2 – промежуточные и быстрые нейтроны, 3 – тепловые нейтроны

Из представленных данных рисунка 3 следует, что функции ослабления имеют экспоненциальный характер, причем, начиная примерно с 15 см, крутизна их наклона становится практически одинаковой. Такой вид ослабления нейтронов характерен для водородосодержащих сред. Наиболее эффективное ослабление нейтронов на ядрах водорода происходит при их энергии не более  $\sim 2,0\text{--}2,5$  МэВ за счет упругого рассеяния. Наиболее проникающими будут нейтроны с энергией больше 2,0 МэВ, так как чем больше энергия нейтронов, тем меньше сечение их упругого взаимодействия с водородом. При взаимодействии нейтронов данных промежуточных энергий с ядрами водорода происходит их быстрое замедление, так как в этой области энергии сечение взаимодействия нейтронов максимально. На расстоянии от источника превышающем более двух длин релаксации нейтронов источника, устанавливается равновесный спектр нейтронов, слабо изменяющийся с ростом толщины защиты.

В водородосодержащих композитах, начиная с определенной толщины, устанавливается равновесное распределение нейтронов всех энергий, в том числе и тепловых, то есть ослабление нейтронов всех энергетических групп происходит равномерно. При этом содержание водорода в материале влияет на степень ослабления нейтронного излучения. Наиболее интенсивно ослабление происходит с увеличением количества ядер водорода в  $1\text{ см}^3$  вещества. В гидриде титана при этом, в сравнение, например, с водой концентрация ядер водорода на 20 % больше ( $8 \cdot 10^{22}$   $1/\text{см}^3$ , против  $6,5 \cdot 10^{22}$   $1/\text{см}^3$  для воды) [8]. При этом за счет более высокой плотности материала и наличия металлической составляющей, ослабление нейтронов происходит не только на водороде, но и на ядрах атома

титана. Причем сечение взаимодействия нейтронов на титане и водороде практически сопоставимо при энергии нейтронов около 3 МэВ [8-13].

Исходя из характера кривых рисунка 3, ослабление нейтронов починается экспоненциальному закону:

$$\Phi(d) = \Phi_0 \cdot e^{-d/\lambda}, \quad (1)$$

где  $\Phi_0$  – плотность потока нейтронов без защиты,  $\Phi(d)$  – плотность потока нейтронов за слоем защиты толщиной  $d$ ;  $d$  – толщина защиты, см;  $\lambda$  – длина релаксации нейтронов, см.

Длина релаксации  $\lambda$  является величиной, характеризующей эффективность материала защиты. С физической точки зрения длина релаксации  $\lambda$  равна толщине слоя защиты, ослабляющей плотность потока нейтронов в  $e$  раз. То есть, чем меньше  $\lambda$  для соответствующего функционала, тем эффективнее защитные свойства материала.

На толщине слоя  $\Delta h$  длина релаксации определяется выражением:

$$\lambda = \frac{h_2 - h_1}{\ln \Phi_1(h_1) / \ln \Phi_2(h_2)}, \quad (2)$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – плотность потока нейтронов на толщине композита  $h_1$  и  $h_2$ .

Таким образом, представленные данные показывают, что быстрые нейтроны при прохождении через композиционный материал защиты, состоящий из модифицированной дроби гидрида титана и глиноземистого цемента, способствуют пространственно-энергетическому распределению нейтронного излучения.

В таблице 3 приведены данные по длинам релаксации плотности потоков тепловых ( $\Phi_T$ ), промежуточных плюс быстрых ( $\Phi_{\text{пр+б}}$ ) и быстрых ( $\Phi_6$ ) нейтронов на толщине защиты 20–35 см.

Таблица 3

### Длины релаксации нейтронов в композите на основе дроби гидрида титана модифицированной титановомедным покрытием

Функционалы, $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	$\Phi_T$	$\Phi_{\text{пр+б}}$	$\Phi_6$
$\lambda$ , см	$6,52 \pm 0,18$	$6,53 \pm 0,18$	$6,58 \pm 0,18$

Как видно из таблицы 3, значения длин релаксации для всех групп нейтронов близки и в среднем составляют  $6,5 \pm 0,2$  см. Для сравнения, длина релаксации быстрых нейтронов для воды равна  $\sim 10$  см, а для серпентинитового бетона  $\sim 11,5$  см.

Следует отметить, что измерения проводились на композите после сушки до постоянной массы при  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , плотностью  $3,28\text{ г/см}^3$ . Кроме того, средняя энергия нейтронов спектра Pu-a-Be источника – 4,5 МэВ, а спектр нейтронов деления  $\sim 2$  МэВ, и, следовательно, для реакторного

спектра значения длин релаксации будут несколько меньше, приведенных в таблице 3.

На рисунке 4 приведен график зависимости ослабления мощности эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения точечных источников (цезий-137 и кобальт-60) от толщины защиты. Измерения функционалов проводили при постоянном расстоянии от источника до детектора равным 35 см с учетом геометрического центра детектирования (рисунок 5). Для функции ослабления мощности дозы  $\gamma$  излучения  $P_\gamma$  поправка на геометрический центр составляла 2 см.

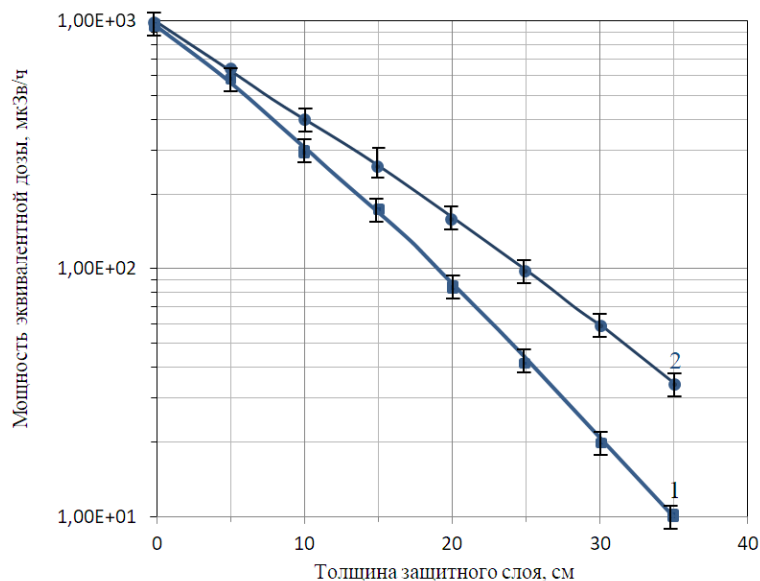


Рис. 4. Функции ослабления мощности эквивалентной дозы  $\gamma$  излучения изотопных источников на основе Cs-137 (1) и Co-60 (2) композита, наполненного модифицированной титановомедным покрытием дробью гидрида титана

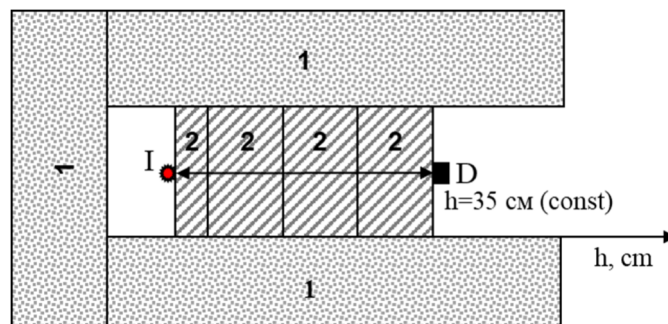


Рис. 5. Барьерная геометрия измерений ослабления  $\gamma$  излучения Cs-137 и Co-60 композитом на основе модифицированной титановомедным покрытием дробью гидрида титана:  
1 –свинцовый экран, 2 – защитный композит

Из представленных на рисунке 4 данных видно, что оба распределения, как и для нейтронов, ослабляются по экспоненциальному закону, с сохранением монотонного наклона по всей толщине композита. Ослабление мощности эквивалентной дозы характеризуется постоянным значением длины релаксации ( $\lambda_\gamma$ ):  $6,13 \pm 0,18$  см (источника Cs-137,  $E_\gamma = 0,661$  МэВ) и  $7,81 \pm 0,18$  см (источник Co-60,  $E = 1,25$  МэВ).

Таким образом, при плотности композиционного материала  $3,2-3,3$  г/см<sup>3</sup> длина релаксации  $\gamma$ -излучения для энергии 1,0–1,25 МэВ составляет 7,5–7,8 см, а для энергии нейтронов 4,5 МэВ – 6,5 см. Аналогичные данные для бетона, наполненного серпентинитом, который используется в защитных конструкциях реакторов на тепловых нейтронах, в 1,6–1,7 раз выше [14–15]. Следовательно, для достижения одинаковой кратности ослабления нейтронного излучения толщина защиты из композита на основе моди-

фицированной дробью гидрида титана и глиноземистого цемента будет в  $\sim 1,7$  раз меньше, чем из серпентинитового бетона.

Использование композитов, состоящих из глиноземистого бетона, наполненного модифицированной дробью гидрида титана, позволит существенно упростить технологию монтажа защиты, снизит ее массогабаритные характеристики, стоимость и повысит надежность.

**Выводы.**

1. Описана технология получения композита, наполненного модифицированной дробью гидрида титана, и исследованы его физико-механические свойства.

2. Представлены экспериментальные результаты по определению функции ослабления нейтронного и  $\gamma$ - излучения композитным материалом на основе модифицированной титановомедным покрытием дробью гидрида титана и глиноземистого цемента.

3. Показано, что, начиная с 15 см толщины защиты ослабление быстрых, промежуточных и

тепловых нейтронов происходит с одинаковой интенсивностью, то есть наступает равновесное состояние нейтронов. Длина релаксации для нейтронного излучения, не зависимо от мощности дозы, в среднем составляет  $6,5 \pm 0,2$  см, а для  $\gamma$ -излучения на 25–35 см слое защиты составляет  $6,13 \pm 0,18$  см (для  $E_\gamma = 0,661$  МэВ) и  $7,81 \pm 0,18$  см (для  $E_\gamma = 1,25$  МэВ). Это в 1,6–1,7 раза меньше, чем в бетоне с серпентинитовым наполнителем, то есть при одинаковой толщине материала эффективность защиты от нейтронного излучения разработанным композитом на основе электрохимически модифицированной дроби гидрида титана будет в 1,7 раз выше.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № FZWN-2020-0011 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергоблок БН-800 Белоярской АЭС после планового ремонта полностью перешёл на МОКС-топливо [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rosenergoatom.ru/stations\\_projects/sayt-beloyarskoj-aes/press-tsentr/novosti/41946](https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-beloyarskoj-aes/press-tsentr/novosti/41946) (дата обращения: 13.10.2022).
2. Шейченко М.С., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю. Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 15–19.
3. Неклюдов И.М., Воеводин В.Н. Современный статус радиационного материаловедения // X Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» Сборник трудов. Минск, Беларусь. 2013 г. С. 128–130.
4. Павленко З.В., Черкашина Н.И. К вопросу использования численного моделирования в разработке радиационно-защитных материалов // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 79–83.
5. Черкашина Н.И. Использование метода рентгенофазового анализа для изучения свойств модифицированного гидрида титана, подвергнутого термообработке // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 117–120.
6. Матюхин П.В. Неорганический радиационно-защитный металлокомпозиционный материал строительного назначения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 9. С. 35–39.
7. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И., Карнаухов А. А. Диффузионно-термические фазовые превращения в гидриде титана, содержащем многобарьерную систему ловушек водорода // Перспективные материалы. 2021. №6. С. 5–15.
8. Leys J.M., Zarins A., Cipa J., Baumann L., Kizane G., Knitter R. Radiation-induced effects in neutron- and electron-irradiated lithium silicate ceramic breeder pebbles // Journal of Nucl Mater. 2020. № 540. Pp. 152347. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2020.152347
9. Bonny G., Konstantinovic M. J., Bakaeva A., Yin C., Castin N., Mergia K., Chatzikos V., Dellis S., Khvan T., Bakaev A., Dubinko A., Terentyev D. Trends in vacancy distribution and hardness of high temperature neutron irradiated single crystal tungsten // Journal of Acta Materialia. 2020. № 198. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.07.047
10. Holmes-Siedle A., Van Lint A.J. Radiation Effects in Electronic Materials and Devices // Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition). 2003. Pp. 523–559. DOI: 10.1016/B0-12-227410-5/00644-X
11. Шульпеков А.М., Лепаква О.К., Радищевская Н.И. Фазо- и структурообразование в системе TiO<sub>2</sub>-Al-C в процессе CBC // Chemical Bulletin. 2018. № 1. Т. 1. С. 4–11.
12. Larionov V.V., Varlachev V.A., Shupeng Xu. Accumulation of hydrogen in titanium exposed to neutron irradiation // Journal of Hydrogen Energ. 2020. № 45. Vol. 30. Pp. 15294–15301. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.014
13. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Смоликов А.А. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // Перспективные материалы. 2006. № 2. С. 47–50.
14. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронов Д.В. Радиационно-защитный тяжелый бетон на основе железорудного минерального сырья // Известия вузов. Строительство. 2007. № 4. С. 40–42.
15. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронов Д.В. Тяжелый бетон для защиты от ионизирующих излучений // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 2–4.

*Информация об авторах*

**Ястребинский Роман Николаевич**, доктор технических наук, директор химико-технологического института. E-mail: [yrndo@mail.ru](mailto:yrndo@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Карнаухов Александр Алексеевич**, младший научный сотрудник кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: gamma.control@ya.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Павленко Вячеслав Иванович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Городов Андрей Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: gorodov-andreyu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Акименко Анастасия Владиславовна**, аспирант. E-mail: nastya-akimenko.2602@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Фанина Евгения Александровна**, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: evgenia-@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.10.2022 г.

© Ястребинский Р.Н., Карнаухов А.А., Павленко В.И., Городов А.И., Акименко А.В., Фанина Е.А., 2022

**Yastrebinsky R.N., Karnaukhov A.A., Pavlenko V.I., \*Gorodov A.I., Akimenko A.V., Fanina E.A.**  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
\*E-mail: gorodov-andreyu@mail.ru

## RADIATION-PROTECTIVE CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE BASED ON A HEAT-RESISTANT MODIFIED FRACTION OF TITANIUM HYDRIDE

**Abstract.** The article describes the technology of obtaining a highly effective composite radiation-protective material based on titanium-coated fraction of titanium hydride and alumina cement binder. The physical and mechanical properties of the resulting composite are investigated. The results of an experimental study of the radiation-protective properties of a composite material based on a titanium-coated titanium hydride and alumina cement fraction with respect to gamma and neutron radiation are presented. Point isotopic sources of fast neutrons Pu- $\alpha$ -Be (neutron energy - 4.5 MeV), isotopic source of gamma radiation Cs-137 (gamma-ray energy - 0.661 MeV) and isotopic source of gamma radiation Co-60 (average energy of gamma-quanta - 1.25 MeV) are used for measurements. The paper compares the effectiveness of protection based on composite and concrete. It is shown that with the same attenuation multiplicity of neutron radiation, the thickness of the protection from a composite based on a modified fraction of titanium hydride and alumina cement will be in  $\sim 1.7$  times less than that of concrete. The use of composite materials based on a modified fraction of titanium hydride and alumina binder will significantly simplify the technology of mounting protection, reduce its weight and size characteristics, cost and increase reliability.

**Keywords:** titanium hydride, composite, radiation-protective properties, alumina cement, neutron radiation, gamma radiation.

### REFERENCES

1. The BN-800 power unit of the Beloyarsk NPP after scheduled repairs has completely switched to MOX fuel [Energoblok BN-800 Beloyarskoj AES posle planovogo remonta polnost'yu pereshyol na MOKS-toplivo]. URL: [https://www.rosenergoatom.ru/stations\\_projects/sayt-beloyarskoy-aes/press-tsentr/novosti/41946](https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-beloyarskoy-aes/press-tsentr/novosti/41946) (date of treatment: 13.10.2022).
2. Sheichenko M.S., Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu. Modern composite radiation-protective materials for construction purposes [Sovremennye kompozicionnye radiacionno-zashchitnye materialy stroitel'nogo naznacheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 5. Pp. 15–19. (rus)
3. Neklyudov I.M., Voevodin V.N. The modern status of radiation materials science [Sovremennyy status radiacionnogo materialovedeniya]. X

Mezhdunarodnaya konferenciya «Vzaimodejstvie izluchenij s tverdyim telom» Sbornik trudov. Minsk, Belarus. 2013. Pp. 128–130. (rus)

4. Pavlenko Z.V., Cherkashina N.I. On the use of numerical modeling in the development of radiation-protective materials [K voprosu ispol'zovaniya chislennogo modelirovaniya v razrabotke radiacionno-zashchitnyh materialov]. V sbornike: Energo-i resursosbergayushchie ekologicheski chistye himiko-tekhnologicheskie processy zashchity okruzhayushchej sredy Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. 2015. Pp. 79–83. (rus)

5. Cherkashina N.I. Using the method of X-ray phase analysis to study the properties of modified titanium hydride subjected to heat treatment [Ispol'zovanie metoda rentgenofazovogo analiza dlya izucheniya svoystv modificirovannogo gidrida titana, podvergnutogo termoobrabotke]. V sbornike: Energo-i resursosbergayushchie ekologicheski

chistye himiko-tehnologicheskie processy zashchity okruzhayushchej sredy Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya. 2015. Pp. 117–120. (rus)

6. Matyukhin P.V. Inorganic radiation-protective metal-composite material for construction purposes [Neorganicheskiy radiacionno-zashchitnyj metallokompozicionnyj material stroitel'nogo naznacheniya]. News of higher educational institutions. Construction. 2007. No. 9. Pp. 35–39. (rus)

7. Yastrebinsky R.N., Bondarenko G.G., Pavlenko V.I., Karnaukhov A. A. Diffusion-thermal phase transformations in titanium hydride containing a multi-quality system of hydrogen traps [Difuzionno-termicheskie fazovye prevrashcheniya v gidride titana, sodержashchem mnogobar'ernuyu sistemu lovushek vodoroda]. Perspektivnye materialy. 2021. No. 6. Pp. 5–15. (rus)

8. Leys J.M., Zarins A., Cipa J., Bauman L., Kizane G., Knitter R. Radiation-induced effects in neutron- and electron-irradiated lithium silicate ceramic breeder pebbles. Journal of Nucl Mater. 2020. No. 540. 152347. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2020.152347

9. Bonny G., Konstantinovic M. J., Bakaeva A., Yin C., Castin N., Mergia K., Chatzikos V., Dellis S., Khvan T., Bakaev A., Dubinko A., Terentyev D. Trends in vacancy distribution and hardness of high temperature neutron irradiated single crystal tungsten. Journal of Acta Materialia. 2020. No. 198. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.07.047

10. Holmes-Siedle A., Van Lint A.J. Radiation Effects in Electronic Materials and Devices. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition). 2003. Pp. 523–559. DOI: 10.1016/B0-12-227410-5/00644-X

11. Shulpekov A.M., Lepakova O.K., Radishevskaya N.I. Phase- and structural formation in the TiO<sub>2</sub>-Al-C system in the SHS process [Fazovoe i strukturoobrazovanie v sisteme TiO<sub>2</sub>-Al-C v processe SVS]. Chemical Bulletin. 2018. No. 1. Vol. 1. Pp. 4–11. (rus)

12. Larionov V.V., Varlachev V.A., Shupeng Xu. Accumulation of hydrogen in titanium exposed to neutron irradiation. Journal of Hydrogen Energ. 2020. No. 45. Vol 30. Pp. 15294–15301. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.014

13. Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Smolnikov A.A. Radiation-protective concrete for biological protection of nuclear reactors [Radiacionno-zashchitnyj beton dlya biologicheskoy zashchity yadernyh reaktorov]. Perspektivnye materialy. 2006. No. 2. Pp. 47–50. (rus)

14. Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Voronov D.V. Radiation-protective heavy concrete based on iron ore mineral raw materials [Radiacionno-zashchitnyj tyazhelyj beton na osnove zhelezorudnogo mineral'nogo syr'ya]. News of universities. Construction. 2007. No. 4. Pp. 40–42. (rus)

15. Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Voronov D.V. Heavy concrete for protection from ionizing radiation [tyazhelyj beton dlya zashchity ot ioniziruyushchih izluchenij]. Building materials. 2007. No. 8. Pp. 2–4. (rus)

#### Information about the authors

**Yastrebinsky, Roman N.** DSc. E-mail: yrndo@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

**Karnaukhov, Alexander A.** Junior researcher. E-mail: gamma.control@ya.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

**Pavlenko, Vyacheslav I.** DSc. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

**Gorodov, Andrey I.** PhD. E-mail: gorodov-andrey@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

**Akimenko, Anastasia V.** PhD student. E-mail: nastya-akimenko.2602@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

**Fanina, Evgenia A.** DSc. E-mail: evgenia@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Received 13.10.2022

#### Для цитирования:

Ястребинский Р.Н., Карнаухов А.А., Павленко В.И., Городов А.И., Акименко А.В., Фанина Е.А. Радиационно-защитные характеристики композита на основе термостойкой модифицированной дроби гидроксида титана // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 86–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-86-93

#### For citation:

Yastrebinsky R.N., Karnaukhov A.A., Pavlenko V.I., Gorodov A.I., Akimenko A.V., Fanina E.A. Radiation-protective characteristics of a composite based on a heat-resistant modified fraction of titanium hydride. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 86–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-86-93