

РАСЧЕТ НЕЙТРОНОЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Н.И. Черкашина, А.В. Павленко

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
308012 Россия, Белгород, ул. Костюкова, д. 46*

Р

Представлены данные по оценке нейтронозащитных свойств композиционного материала на основе полиалканимидной матрицы и тонкомолотого гидрида титана, а также данные по основным физико-механическим характеристикам композита: средние значения коэффициента температурного линейного расширения, теплопроводность образцов при нормальных условиях и повышенной температуре, предел прочности при изгибе, термостойкость. По физико-механическим характеристикам оптимальным является состав, который содержит 70% мас. наполнителя гидрида титана. Установлено, что введение в композит гидрида титана решает проблему изменения геометрических параметров материала при воздействии повышенных температур, так как среднее значение коэффициента температурного линейного расширения (КТЛР) композитов составляет от $15 \cdot 10^{-6}$ до $18,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что соизмеримо с КТЛР стальных элементов конструкции транспортно-упаковочных комплектов на АЭС $(10 - 15) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. В качестве нейтронозащитных характеристик разработанных композитов оценивались теоретические сечения выведения и длины релаксации для плотности потока быстрых нейтронов с энергией более 2 МэВ. Установлено, что основным элементом в композите, определяющим сечения выведения для плотности потока быстрых нейтронов и длину релаксации для плотности потока быстрых нейтронов (при $E > 2 \text{ МэВ}$), является водород, несмотря на его малое содержание (менее 5% в композите). Остальные элементы в составе вносят значительно меньший вклад в нейтронозащитные характеристики композита. Анализ полученных рассчитанных характеристик показал высокие нейтронозащитные свойства разработанного композита предлагаемых составов.

Ключевые слова: ядерный реактор, биологическая защита, гидрид титана, полиалканимид, нейтронозащитные характеристики, предел прочности при изгибе, термостойкость, сечение выведения, длина релаксации.

ВВЕДЕНИЕ

Работа ядерного реактора связана с интенсивным радиоактивным излучением, причем наибольшую опасность для персонала, а также для различных приборов и аппаратуры представляют нейтронное и гамма-излучения [1 – 3]. Чтобы снизить

© *Н.И. Черкашина, А.В. Павленко, 2018*

интенсивность излучений до уровня, допускаемого Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [4], создается биологическая защита, материалы для которой подбирают специально исходя из технологических требований. Обычно используют комбинацию нескольких материалов, поскольку трудно подобрать универсальный материал для всех видов излучения. Биологическая защита является неотъемлемой частью реакторной установки.

Для замедления быстрых нейтронов обычно используются вещества с малыми атомными номерами (вода, тяжелая вода, полимеры и др.) [5 – 7]. Для поглощения тепловых нейтронов используют специальные вещества – карбид бора, кадмий, бористую сталь, бораль, бетон и др. [8]. Гамма-излучение эффективно ослабляется веществами, имеющими большой атомный номер и высокую плотность (сталь, свинец, свинцовое стекло и др.). К защитным материалам предъявляются следующие требования: они должны обладать необходимой механической прочностью, иметь высокую радиационную и термическую стойкость, химическую инертность, сохранять стабильные параметры в процессе эксплуатации. Многие материалы, используемые в настоящее время для биологической защиты, в основном, бетоны [9 – 11], полностью не удовлетворяют данным требованиям, поэтому актуальным является направление по разработке специальных композитов, которые могут заменить традиционно используемые материалы биологической защиты ядерного реактора.

Особый интерес представляют материалы на основе гидрида титана, обладающие высокими нейтронозащитными свойствами [12 – 13]. Использование гидрида титана в атомной энергетике обусловлено характерным для него сечением рассеяния нейтронов и высоким содержанием атомов водорода в 1 см³ материала (4,04%).

В работе представлены данные по исследованию радиационно-защитных свойств композиционного материала на основе полиалканимидной матрицы и тонкомолотого гидрида титана.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве матрицы для синтеза композиционного материала использовали полиалканимид. Он относится к классу термопластичных полимеров, обладающих высокой термостойкостью по сравнению с широко используемыми полимерами, такими как полиэтилен, полистирол, полипропилен, для которых температура эксплуатации не превышает 100°C [14]. По радиационной стойкости данный полимер не уступает чисто ароматическим полиамамидам (5 – 10 МГр) [15]. Однако стоимость полиалканимида в несколько раз меньше, чем у дорогостоящих полиамидов.

В качестве наполнителя использовали гидрид титана – химическое соединение бинарной структуры, представляющее собой соединение водорода с металлом TiH₂. Гидрид титана синтезирован из губчатого титана марки ТГ-90 по ГОСТ 17746-79. Для введения в полимер гидрида титана был произведен его помол с использованием шаровой мельницы. Для определения оптимального времени помола его перемалывали различное время. Достижение необходимой дисперсности порошка гидрида титана определяли на лазерном анализаторе размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTecplus.

Для увеличения термостойкости гидрида титана использовали способ нанесения боросиликатного покрытия на его частицы [16]. Нанесенное боросиликатное покрытие препятствует выходу водорода в условиях эксплуатации предлагаемого полимерного композита при нагреве и обеспечивает увеличение начала температуры термического разложения гидрида титана до 585°C.

Гидрид титана является гидрофильным веществом, поэтому введение его в неполярный полимер полиалканимид приведет к сильной агрегации наполнителя. Это не позволит гидриду титана равномерно распределиться в полимере, что приведет к значительному ухудшению конечных свойств композита. Известны способы равномерного распределения наполнителя в полимере путем создания гидрофобной поверхности наполнителя модифицированием гидрофобизирующими средствами [17, 18]. Поэтому гидрид титана с нанесенным боросиликатным покрытием модифицировали жидкостью гидрофобизирующей 136-41 для создания гидрофобной поверхности. Жидкость гидрофобизирующая 136-41 – вязкая бесцветная маслянистая жидкость, легкорастворимая в большинстве органических растворителей, но не растворимая в воде. Ее состав описывается формулой $[C_2H_5SiHO]_n$ (где $n = 10 - 15$), содержание активного водорода 1,3 – 1,45%.

Синтез композита осуществлялся методом твердофазного компактирования компонентов при высоком удельном давлении 1 ГПа с использованием стальной пресс-формы. При использовании такого высокого удельного давления в полимерном композите происходили топохимические реакции между полиалканимидом и тонкомолотым гидридом титана с нанесенным боросиликатным покрытием, что создало прочную связь между этими компонентами и обеспечило высокие прочностные характеристики полимерного композита. Содержание наполнителя в композите варьировалось до 75%.

Термостойкость полученных композитов определяли, согласно ГОСТ 9.715-86, по 5%-ой потере массы композита. Дифференциально-термический анализ определения температуры, соответствующей 5%-ой потере массы композита, проводили на приборе термического синхронного анализа STA 449 F1 Jupiter® фирмы NETZSCH (Германия).

Нейтронозащитные характеристики разработанного полимерного композита для нейтронной защиты определяли посредством нейтронно-физических расчетов по программе ANISN [19], реализующей решение одномерного транспортного уравнения методом дискретных ординат с учётом анизотропии рассеяния. Спектр нейтронов рассчитывали для 12-группового разбиения энергетического интервала. Физические расчеты наиболее часто применяются для оценки радиационно-защитных свойств различных композитов [20 – 23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость значения удельной поверхности гидрида титана от времени помола представлена на рис. 1, откуда видно, что целесообразно проводить помол гидрида титана в течение 30-ти минут, так как при большем времени помола удельная поверхность увеличивается лишь на 10% с 45521 до 50398 $см^2/см^3$, средний диаметр частиц уменьшается на 8% с 5,6 до 5,2 мкм, а диапазон размеров полученных частиц не изменяется.

В таблице 1 представлены данные по физико-механическим характеристикам разработанных полимерных композитов на основе полиалканимидной матрицы и тонкомолотого гидрида титана. Содержание наполнителя в композите варьировалось от 60 до 75% по мас.

Из таблицы видно, что при введении наполнителя гидрида титана с 60 до 70% такой показатель, как предел прочности при изгибе, повышается, а при дальнейшем введении наполнителя до 75% значительно снижается. Поэтому введение наполнителя гидрида титана в количестве 70% является оптимальным, так как при большем введении наполнителя значительно снижаются физико-механические характеристики исследуемого композита.

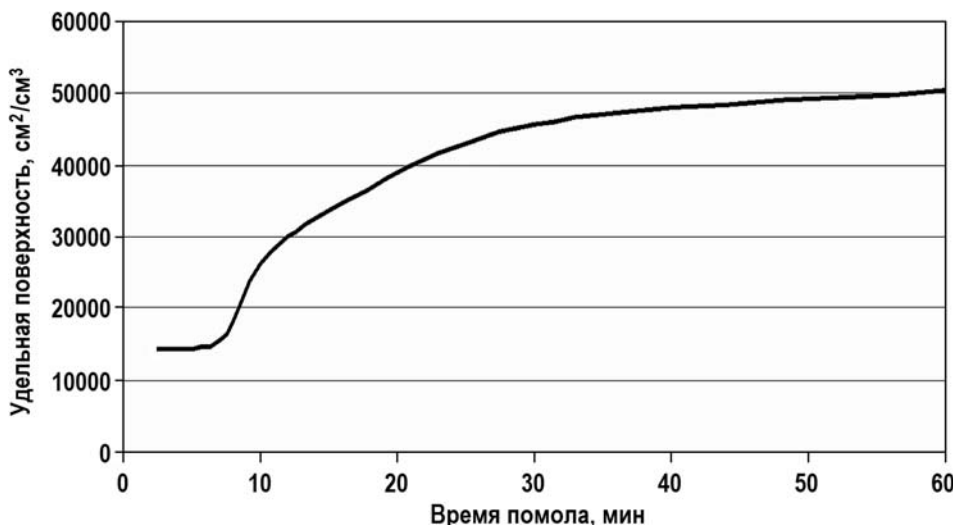


Рис. 1. Зависимость величины удельной поверхности гидрида титана от времени помола

Таблица 1

Физико-механические характеристики разработанных полимерных композитов

Показатель	Исследуемые составы		
	Содержание наполнителя, %		
	60	70	75
Среднее значение КТЛР · 10 ⁶ , К ⁻¹	15,3	17,3	18,8
Теплопроводность образцов – при нормальных условиях	0,353	0,378	0,395
– при 250°С, Вт/(м·К)	0,575	0,591	0,624
Предел прочности при изгибе, МПа	171	182	126
Термостойкость до °С	380	400	400

Известно, что недостатком нейтронной защиты на основе чистых полимеров без наполнителей является то, что при воздействии повышенных температур они изменяют свои геометрические параметры и подвергаются частичной деструкции с выделением газов и ростом давления в занимаемом ими объеме до величин, опасных для конструкции наружной оболочки транспортно-упаковочных комплектов (ТУК). Введение гидрида титана в полиалканимид полностью решает эту проблему. Среднее значение коэффициента температурного линейного расширения (КТЛР) композитов составляет от $15 \cdot 10^{-6}$ до $18,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что соизмеримо с КТЛР стальных элементов конструкции транспортно-упаковочных комплектов (ТУК) на АЭС ($10 - 15$) · 10⁻⁶ К⁻¹ по ГОСТ 26996-86.

Как видно из данных таблицы, значительное влияние на теплофизические характеристики и формирование надмолекулярной структуры полиалканимида оказывает наполнитель. Введение гидрида титана в полимер значительно увеличивает теплопроводность образцов как при нормальных условиях, так и при повышенной температуре (250°С)

Высокая термостойкость композита до 380 – 400°С объясняется термостойкостью составляющих его компонентов – полиалканимида и гидрида титана. На увеличение термостойкости разработанного композита направлено повышение

его теплопроводности за счет использования в качестве наполнителя гидрида титана. Отведение тепла от отработавшего ядерного топлива стабилизирует его постоянную температуру хранения, не дает контейнеру, в котором хранится отработавшее ядерное топливо, саморазогреться и от этого разрушаться.

Для расчета нейтронозащитных характеристик композита по программе ANISN был рассчитан его элементный атомарный химический состав с различным содержанием наполнителя. В таблице 2 представлен атомарный химический состав исследуемых материалов.

Таблица 2

Элементный химический состав полимерного композита с различным содержанием наполнителя

Элемент	Содержание, мас. %		
	Содержание гидрида титана в композите, мас. %		
	60	70	75
H	4,895	4,739	4,582
C	25,972	21,589	17,206
O	6,380	5,282	4,183
Ti	60,096	66,240	72,384
N	2,126	1,772	1,418
Si	0,531	0,378	0,227

Для сравнения ослабляющих свойств разработанных композитов рассчитаны теоретические сечения выведения и длины релаксации для плотности потока быстрых нейтронов с энергией более 2 МэВ (табл. 3).

Таблица 3

Нейтронно-защитные свойства полимерного композита

Показатель	Содержание гидрида титана в композите, мас. %		
	60	70	75
Сечение выведения для плотности потока быстрых нейтронов ($E > 2$ МэВ), см ⁻¹	0,1091	0,1069	0,1046
Длина релаксации для плотности потока быстрых нейтронов ($E > 2$ МэВ), см	4,57	4,67	4,81

Длина релаксации – параметр, часто применяемый для расчета ослабления защитой потока нейтронов и γ -излучения. Она характеризует уменьшение величины потока, плотности энергии, биологической дозы и мощности дозы. Зная длину релаксации можно найти изменение плотности потока нейтронов за защитой заданной толщины x по формуле

$$\varphi(x) = \varphi_0 \cdot \exp(-x/L), \quad (1)$$

где φ_0 – характеристика поля (плотность потока или дозы) нейтронов в точке детектирования без защиты; x – толщина защиты; L – длина релаксации нейтронов в среде.

Длина релаксации определяется для отдельных участков защиты, в пределах которых ослабление нейтронов может быть описано экспоненциальной зависимостью с постоянным значением длины релаксации.

Закон ослабления нейтронов заданного спектра набором пластин различных материалов можно представить в виде

$$D(x, \sum_{i=1}^m d_i) = D_H(x - \sum_{i=1}^m d_i) \cdot \exp(-\sum_{i=1}^m (\Sigma_{\text{ret}, i} d_i)), \quad (2)$$

где m – число пластин из различных материалов; $\Sigma_{\text{ret}, i}$ и d_i – сечение выведения и толщина слоя вещества i -го компонента соответственно. Так как исследуемый композит состоит из атомов разных элементов (H, C, O, Ti, N, Si), то сечение выведения рассчитывали по формуле

$$\Sigma_{\text{ret}, i} = \sum_{j=1}^m n_j \cdot \sigma_{\text{ret}, j}, \quad (3)$$

где n_j – массовая доля элементов в композите; $\sigma_{\text{ret}, j}$ – микроскопическое сечение выведения элементов; m – число элементов в композите.

Физический смысл сечения выведения состоит в том, что процессы взаимодействия нейтронов с ядрами тяжелых элементов, помещенных в водородсодержащую среду (неупругое рассеяние, сопровождающееся большим сбросом энергии, и упругое рассеяние, кроме рассеяния нейтронов на малые углы), рассматриваются как поглощение нейтронов. Такое представление прохождения нейтронов через защиту вполне справедливо, так как из-за большого сечения последующего взаимодействия нейтронов с водородом и увеличения сечения с уменьшением энергии нейтронов маловероятно, что нейтрон, рассеянный в слое тяжелого элемента, может пройти через водородсодержащую среду до детектора.

Основным элементом в композите, определяющим сечение выведения и длину релаксации для плотности потока быстрых нейтронов при $E > 2$ МэВ, является водород, несмотря на его малое содержание (менее 5% в композите). Остальные элементы в составе вносят значительно меньший вклад в нейтронозащитные характеристики композита.

Анализ данных, представленных в табл. 3, показал высокие нейтронозащитные характеристики разработанного композита предлагаемых составов.

ВЫВОДЫ

В работе представлены данные по оценке нейтронозащитных свойств композиционного материала на основе полиалканимидной матрицы и тонкомолотого гидрида титана.

Установлено, что по физико-механическим характеристикам оптимальным является состав, который содержит 70% мас. наполнителя гидрида титана. При введении более 70% гидрида титана предел прочности при изгибе значительно снижается.

Введение в композит гидрида титана решает проблему изменения геометрических параметров материала при воздействии повышенных температур, так как среднее значение коэффициента температурного линейного расширения (КТЛР) композитов составляет от $15 \cdot 10^{-6}$ до $18,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что соизмеримо с КТЛР стальных элементов конструкции транспортно-упаковочных комплектов (ТУК) на АЭС ($10 - 15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Введение гидрида титана в полимер значительно увеличивает теплопроводность образцов как при нормальных условиях, так и при повышенной температуре (250°C). Рассматриваемый композит обладает достаточно высокой термостойкостью (до 400°C).

Нейтронозащитные характеристики разработанного полимерного композита

для нейтронной защиты определяли посредством нейтронно-физических расчетов по программе ANISN, реализующей решение одномерного транспортно уравнения методом дискретных ординат с учётом анизотропии рассеяния. Спектр нейтронов рассчитывали для 12-группового разбиения энергетического интервала.

Для сравнения ослабляющих свойств разработанных композитов рассчитаны теоретические сечения выведения и длины релаксации для плотности потока быстрых нейтронов с энергией более 2 МэВ.

Основным элементом в композите, определяющим сечение выведения и длину релаксации для плотности потока быстрых нейтронов (при $E > 2$ МэВ), является водород, несмотря на его малое содержание (менее 5% в композите). Остальные элементы в составе вносят значительно меньший вклад в нейтронозащитные характеристики композита. Анализ полученных рассчитанных характеристик показал высокие нейтронозащитные свойства разработанного композита предлагаемых составов.

Литература

1. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Matyukhin P.V., Voronov D.V. Interaction of fast electrons and gamma-quanta with radiation protection ferric oxide composites // Russian Physics Journal. – 2008. – Vol. 51. – PP. 1188-1194.
2. Лелеков В.И. Защита персонала атомной электростанции от излучений ядерного реактора. – М.: МГОУ, 2010. – 52 с.
3. Samarina A. Use of concrete as a biological shield from ionizing radiation // Energy and Environmental Engineering. – 2013. – No. 1(2). – PP. 90-97.
4. СанПиН 2.6.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009», 2009.
5. Медведев Ю.А., Метелкин Е.В., Труханов Г.Я. Замедление нейтронов при наличии неупругого рассеяния // Атомная энергия. – 1976. – Т. 41. – № 1. – С. 105-107.
6. Куликов Г.Г., Шмелёв А.Н. Тяжелые замедлители нейтронов для ядерных реакторов: об их нейтронно-физическом потенциале // Ядерная физика и инжиниринг. – 2015. – Т. 6. – № 3-4. – С. 117.
7. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Федоренко А.В., Шейченко М.С., Вишневецкая Я.Ю. Современные тенденции развития радиационно-защитного материаловедения. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 4. – С. 20-25.
8. Ганн А.В., Ганн В.В., Пугачев Г.Д., Шаповал И.И. Расчет биологической защиты нейтронного источника, управляемого ускорителем электронов // ВАНТ. Сер «Ядерно-физические исследования» – 2012. – №4(80). – С. 199-201.
9. Batten A.W.C. Effects of Irradiation on the Strength of Concrete. United Kingdom Atomic Energy Authority, Harwell, 1960.
10. Bashter I.I. Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concrete // Annals of nuclear energy. – 1997. – Vol. 24. – No. 17. – PP. 1389-1401.
11. Pavlenko V.I., Matyukhin P.V. Metal-concrete composite material on basis of highly dispersed oxide of iron and metallic aluminium // Stroitel'nye Materialy. – 2005. – Iss. 8. – PP. 46-48.
12. Iida T., Taniuchi H., Fujisawa K. Highly effective neutron shielding for transport/storage packaging // International Journal of Radioactive Materials Transport. – 1991. – Vol. 2. – No. 1-3. – PP. 79-85.
13. Muta H., Tanaka T., Ohishi Y., Kurosaki K., Hishinuma K., Yamanaka S., Muroga T. Properties of cold-pressed metal hydride materials for neutron shielding in a D-T fusion reactor // Plasma and Fusion Research: Regular Articles. – 2015. – Vol. 10. – PP. 3405021-1-3405021-4.
14. Калугина Е.В., Гумаргалиева К.З., Заиков Г.Е. Полиалканимиды. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 262 с.
15. Боровков В.В., Брискман Б.А., Дубровина А.С. Радиационная стойкость органических

материалов. Справочник. / Под ред. В.К. Милинчука и В.И. Тупиковой – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.

16. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Куприева О.В., Ястребинская А.В., Матюхин П.В. Способ нанесения боросиликатного покрытия на частицы гидрида титана. Патент РФ № 2572271, 2015.

17. Zemfira T., Milanovskiy E. The contact angle of wetting of the solid phase of soil before and after chemical modification. // Eurasian Journal of Soil Science. – 2008. – Vol. 4. – PP. 191-197.

18. Marinova K.G., Christova D., Tcholakova S., Efremov E., Denkov N.D. Hydrophobization of Glass Surface by Adsorption of Poly(dimethylsiloxane). // Langmuir. – 2005. – Vol. 21. – PP. 11729-11737.

19. Программа ANISN. Руководство пользователя. – М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1981. – 36 с.

20. Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Noskov A.V., Yastrebinskii R.N., Sokolenko I.V. Calculation of gamma photon propagation processes in a composite material. // Russian Physics Journal. – 2016. – Vol. 59. – No. 8. – PP. 1192-1197.

21. Черницов А.М., Тамаров В.А., Баранников Е.А. Оценивание вероятности столкновения астероида с Землей методом Монте-Карло // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 84-91.

22. Pavlenko V.I., Edamenko O.D., Cherkashina N.I., Noskov A.V. Total energy losses of relativistic electrons passing through a polymer composite // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2014. – Vol. 8. – No. 2. – PP. 398-403.

23. Matyukhin P.V., Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Cherkashina N.I. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // Middle East Journal of Scientific Research. – 2013. – Vol. 17. – No. 9. – PP. 1343-1149.

Поступила в редакцию 19.06.2017 г.

Авторы

Черкашина Наталья Игоревна, доцент каф. теоретической и прикладной химии, к.т.н.

E-mail: natalipv13@mail.ru

Павленко Алексей Вячеславович, соискатель

E-mail: belpavlenko@mail.ru

UDC 538.971

THE CALCULATION OF THE NEUTRON-PROTECTIVE CHARACTERISTICS OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL

Cherkashina N.I., Pavlenko A.V.

Belgorod State Technological University n. a. V.G. Shukhov

46 Kostyukov str., Belgorod, 308012 Russia

ABSTRACT

The paper presents data on the evaluation of neutron shielding properties of composite material based on polyalkaneimide matrix and fine titanium hydride. Data on the principal physical mechanical characteristics of the composite, on the average values of temperature coefficient of linear expansion, on thermal conductivity of samples under normal conditions and at elevated temperatures and flexural strength at bending temperature are provided. It was established that composition containing 70% by mass of titanium hydride filler is optimal according to its physical mechanical characteristics. It was demonstrated that introduction of titanium hydride in the composite solves the problem of changing geometrical parameters of the material when exposed to elevated

temperatures, because the average value of thermal linear expansion factor of the composites ranges from $15 \cdot 10^{-6}$ to $18.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, which is comparable with the values of thermal linear expansion factor equal to $(10 - 15) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ for steel elements of structure of transportation packaging sets used at nuclear power plants. Neutron removal cross-sections and relaxation lengths theoretically calculated for flux density of fast neutrons with neutron energies exceeding 2 MeV were evaluated as the neutron-shielding characteristics of the developed composites. It was established that the main element in the composite determining the neutron removal cross-section and relaxation length for fast neutron flux density (with neutron energies $E > 2 \text{ MeV}$) is hydrogen despite its low concentrations (less than 5% in composite). Remaining elements in the composition make much smaller contribution in the neutron-shielding properties of the composite. Analysis of the calculated results showed high neutron-absorbing properties of the proposed formulas of the developed composite.

Key words: nuclear reactor, biological protection, titanium hydride, polyalkaneimide, neutron shielding characteristics, flexural strength, heat resistance, shearing cross section, relaxation length.

REFERENCES

1. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Matyukhin P.V., Voronov D.V. Interaction of fast electrons and gamma-quanta with radiation protection ferric oxide composites. *Russian Physics Journal*. 2008, v. 51, pp. 1188-1194.
2. Lelekov V.I. Protection of personnel of the nuclear power plant from the emissions of the nuclear reactor. Moscow. MGOU Publ., 2010, 52 p. (in Russian).
3. Samarin A. Use of concrete as a biological shield from ionising radiation. *Energy and Environmental Engineering*. 2013, no. 1(2), pp. 90-97.
4. SanPiN 2.6.2523-09 Norms of radiation safety NRB-99/2009, 2009 (in Russian).
5. Medvedev Yu.A., Metelkin E.V., Truhanov G. Ya. The deceleration of neutrons in the presence of inelastic scattering. *Atomnaya energiya*. 1976, v. 41, no 1, pp. 105-107 (in Russian).
6. Kulikov G.G., Shmelev A.N. Heavy neutron moderators for nuclear reactors: about their neutron-physical potential. *Yadernaya fizika i inzhiniring*. 2015, v. 6, no 3-4, pp. 117 (in Russian).
7. Alfimova N.I., Pirieva S.Y., Fedorenko A.V., Sheychenko M.S., Vishnevskaya Ya. Yu. Current trends in the development of radiation-protective materials science. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2017, no. 4, pp. 20-25 (in Russian).
8. Gann A.V., Gann V.V., Pugachev G.D., Shapoval I.I. Calculation of the biological protection of a neutron source controlled by an electron accelerator. VANT, Ser. «Yaderno-fizicheskie issledovaniya». 2012, no. 4(80), pp. 199-201 (in Russian).
9. Batten A.W.C. *Effects of Irradiation on the Strength of Concrete*, United Kingdom Atomic Energy Authority, Harwell, 1960.
10. Bashter I.I. Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concrete. *Annals of nuclear energy*, 1997, v. 24, no. 17, pp. 1389-1401.
11. Pavlenko V.I., Matyukhin P.V. Metal-concrete composite material on basis of highly dispersed oxide of iron and metallic aluminium. *Stroitel'nye Materialy*. 2005, iss. 8, pp. 46-48.
12. Iida T., Taniuchi H., Fujisawa K. Highly effective neutron shielding for transport/storage packaging. *International journal of radioactive materials transport*. 1991, v. 2, no. 1-3, pp. 79-85.
13. Muta H., Tanaka T., Ohishi Y., Kurosaki K., Hishinuma K., Yamanaka S., Muroga T. Properties of cold-pressed metal hydride materials for neutron shielding in a D-T fusion reactor. *Plasma and Fusion Research: Regular Articles*. 2015, v. 10, pp. 3405021-1 – 3405021-4.

14. Kalugina E.V., Gumargalieva K.Z., Zaikov G.E. *Polyalkanimides*. St. Petersburg. Scientific foundations and technologies Publ., 2008. 262 p. (in Russian).
15. Borovkov V.V., Briskman B.A., Dubrovina A.S. *Radiation resistance of organic materials*. Handbook. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986. 272 p. (in Russian).
16. Pavlenko V.I., Jastrebinskij R.N., Kuprieva O.V., Jastrebinskaja A.V., Matjuhin P.V. Method of applying borosilicate coating on titanium hydride. Patent RF, no. 2572271, 2015 (in Russian).
17. Zemfira T., Milanovskiy E. The contact angle of wetting of the solid phase of soil before and after chemical modification. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2008, v. 4, pp. 191-197.
18. Marinova K.G., Christova D., Tcholakova S., Efremov E., Denkov N.D. Hydrophobization of Glass Surface by Adsorption of Poly (dimethylsiloxane). *Langmuir*. 2005, v. 21, pp. 11729-11737.
19. Program ANISN. User's Guide. Moscow. IAYe im. I.V. Kurchatova Publ., 1981, 36 p. (in Russian).
20. Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Noskov A.V., Yastrebinskij R.N., Sokolenko I.V. Calculation of gamma photon propagation processes in a composite material. *Russian Physics Journal*. 2016, v. 59, no. 8, pp. 1192-1197.
21. Chernicov A.M., Tamarov V.A., Barannikov E.A. Estimation of the probability of collision of an asteroid with ground by the Monte Carlo method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Fizika*. 2016, v. 59, no. 5, pp. 84-91 (in Russian).
22. Pavlenko V.I., Edamenko O.D., Cherkashina N.I., Noskov A.V. Total energy losses of relativistic electrons passing through a polymer composite. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2014, v. 8, no. 2, pp. 398-403.
23. Matyukhin P.V., Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Cherkashina N.I. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material. *Middle East Journal of Scientific Research*. 2013, v. 17, no. 9, pp. 1343-1149.

Authors

Cherkashina Natal'ya Igorevna, Assistant Professor, Cand. Sci. (Chemistry)

E-mail: natalipv13@mail.ru

Pavlenko Alexey Vyacheslavovich, PhD Student

E-mail: belpavlenko@mail.ru