

УДК 621.039.531

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРИДСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ОТ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**Ястребинская А.В., Матюхин П.В., Павленко З.В., Карнаухов А.В., Черкашина Н.И.***ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: karanna1@mail.ru*

Авторами рассмотрена возможность получения композиционного материала на основе дробы гидрида титана с целью его использования для биологической защиты транспортных ядерных энергетических установок. Проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования характеристик ослабления нейтронного и гамма излучения композициями на основе гидрида титана. Дана оценка влияния спектров нейтронов и гамма-квантов, падающих со стороны активной зоны на защиту из исследуемого материала, на формирование в нем нейтронных и гамма полей и распределений мощности дозы. Рассчитаны величины длин релаксации для плотности потока быстрых нейтронов и мощности дозы гамма-квантов в исследуемых материалах для областей с установившимся равновесным спектром. Кратности ослабления нейтронного и гамма-излучений зависят от их спектров на передней границе исследуемого материала. Эти спектры формируются материалами конструкций, находящимися перед исследуемыми материалами.

Ключевые слова: гидрид титана, дробь, композит, нейтронная защита, кратность ослабления**USE HYDRIDE OF THE CONTAINING COMPOSITES FOR PROTECTION OF NUCLEAR REACTORS AGAINST NEUTRON RADIATION****Yastrebinskaya A.V., Matiukhin P.V., Pavlenko Z.V., Karnaukhov A.V., Cherkashina N.I.***Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: karanna1@mail.ru*

Authors considered possibility of receiving composite material on the basis of fraction of hydride of the titan for the purpose of his use for biological protection of transport nuclear power stations. Theoretical calculations and pilot studies of characteristics of easing neutron and scale of radiation by compositions on the basis of hydride of the titan are carried out. The assessment of influence of ranges of neutrons and the gamma quanta falling from the party of an active zone on protection from the studied material on formation in it neutron and scale of fields and distributions of power of a dose is given. Sizes of lengths of a relaxation for density of a stream of fast neutrons and power of a dose of gamma quanta in the studied materials for areas with the established equilibrium range are calculated. Frequency rates of easing neutron and gamma radiations depend on their ranges on forward border of the studied material. These ranges are formed by the materials of designs which are before the studied materials.

Keywords: hydride of the titan, fraction, composite, neutron protection, frequency rate of easing

Гидрид титана является наиболее перспективным материалом биологической защиты корабельных ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) нового поколения благодаря высоким защитным характеристикам по отношению к нейтронному излучению. В сравнении с наполненными полимерами гидрид титана имеет более высокие температуры эксплуатации и допустимый флюенс нейтронов [1-16].

На основе гидрида титана в настоящее время разработаны и внедрены в промышленность четыре материала: брикетированный гидрид титана, порошок гидрида титана, крошка гидрида титана и компактный гидрид титана. Брикетированный гидрид титана и крошка гидрида титана имеют низкую температуру эксплуатации (до 200 °С), что ограничивает их использование в защите ЯЭУ. Применяемый компактный гидрид титана (ГТК), получаемый методом сквозного насыщения титановых заготовок водородом, имеет более высокую термическую и радиационную стойкость. Однако он не поддается механической обработке, в результате чего

при формировании блоков защиты возникает необходимость в заполнении образующихся зазоров и полостей материалом на основе крошки гидрида титана и связующего портландцемента. Образующаяся композиция (ГТК-ПЦ) содержит до 5% мелкой пылевидной фракции (менее 0,2 мм), которая является пожаро- и взрывоопасной, а также основным источником выделения водорода при высоких рабочих температурах эксплуатации.

В связи с этим авторами разработан высококонструкционный материал на основе дробы гидрида титана (ДГТ), позволяющий упростить технологию монтажа защиты ЯЭУ, улучшить ее качество и снизить стоимость. Проведенные испытания показали, что гидрид титана в виде дробы более прочен, не имеет микротрещин, не растрескивается в процессе работы, не образует мелкой взрывоопасной фракции и имеет более высокую температуру эксплуатации. Термостойкость дробы позволит использовать материалы на ее основе в защите, в условиях температурного режима, непосредственно после корпуса реактора [17-25].

Полученные на основе дробы с использованием связующего портландцемента композиционные материалы (КДГТ), найдут широкое применение в конструкции биологической защиты транспортных ЯЭУ от нейтронного излучения. Модифицирование дробы путем введения борсодержащих материалов, с возможным их остекловыванием на поверхности, позволит повысить термическую устойчивость и улучшить защитные свойства композита (КМДГТ) [26-34].

Цель исследования

Для оценки возможности применения разработанных материалов в биологической защите ядерных реакторов провести теоретические расчеты и экспериментальные исследования характеристик ослабления нейтронного и гамма излучения композициями на основе гидрида титана.

Материалы и методы исследования

В работе используется дробь гидрида титана плотностью $3,8 \text{ г/см}^3$ и содержанием водорода 3,6% масс., полученная путем сквозного насыщения расплава гидрида титана водородом в аппарате с прямым нагревом.

Исходя из предположения, что в реальных компоновках защиты водородосодержащим материалам обычно, чаще всего, предшествуют такие, как сталь или свинец, рассматривалось два типа композиций.

В композициях первого типа перед исследуемым материалом располагается сталь. Состав композиций: активная зона (85 см), железобетонный отражатель (20 см), стальной корпус реактора (12,5 см), исследуемый материал (150 см).

В композициях второго типа перед исследуемым материалом располагается свинец. До корпуса реактора включительно состав композиций второго типа аналогичен составу композиций первого типа. Далее после корпуса реактора размещается водяной бак (15 см) и защита из свинца (30 см), а затем исследуемый материал (150 см).

Результаты исследования и их обсуждение

На основании полученных нейтронных и гамма полей были рассчитаны величины длин релаксации для плотности потока быстрых нейтронов и мощности дозы гамма-квантов в исследуемых материалах для областей с установившимся равновесным спектром.

Результаты расчета представлены в табл. 1 и табл. 2.

Длина релаксации быстрых нейтронов зависит от содержания в композиционном материале дробы гидрида титана. Величины $\lambda_{\text{он}}$ для материалов КДГТ и КМДГТ (плотность, соответственно, $3,325$ и $3,320 \text{ г/см}^3$) с максимальным содержанием дробы гидрида титана (соответствующим уплотненному

состоянию дробы) на 3-8% больше по сравнению с материалами ГТК и ГТК-ПЦ большей плотности (плотностью $3,8$ и $3,4 \text{ г/см}^3$).

В исследуемых материалах водород присутствует за счет основы – гидрида титана. Добавка водорода за счет затворенной воды, которая может остаться в смеси после сушки, по меньшей мере, на порядок ниже и играет второстепенную роль. Поэтому композиционные материалы ГТК-ПЦ после термообработки при 300°C (в предположении, что вся затворенная вода уходит), по своим свойствам не уступают материалам КДГТ и КМДГТ, в которых некоторая часть затворенной воды остается.

Как можно заметить, с увеличением толщины расчетного слоя исследуемого материала возрастает величина $\lambda_{\text{он}}$. Это происходит вследствие ужесточения нейтронного спектра по толщине. А несколько меньшие значения $\lambda_{\text{он}}$ для композиций со сталью можно объяснить тем, что после стали формируется более мягкий спектр для нейтронов в интервале энергий выше 2 МэВ по сравнению со спектром после свинца, поэтому групповое сечение выведения быстрых нейтронов будет больше, а длина релаксации, соответственно, меньше.

Что касается гамма-квантов, то величина $\lambda_{\text{г}}$ в материалах в композициях со сталью и со свинцом практически одинакова. Это говорит о том, что характер распределения мощности дозы гамма-квантов ($M_{\text{г}}$) по толщине и величину $M_{\text{г}}$ за защитой определяют натекающие на переднюю стенку и захватные гамма-кванты в начальном слое материала, толщиной несколько сантиметров. Причем в данном случае первая составляющая меньше второй, за исключением материала КМДГТ (за слоем стали).

В пользу такого заключения говорит следующее. Поскольку в рассматриваемых материалах гамма-кванты ослабляются меньше, чем тепловые нейтроны ($\lambda_{\text{г}} > \lambda_{\text{т}}$), то по мере увеличения толщины материала убыль первоначальных гамма-квантов (натекающих или образовавшихся в начальном слое) будет меньше, чем прибыль новых захватных гамма-квантов за счет тепловых нейтронов, которые ослабляются более сильно и не в состоянии давать заметную добавку в суммарную величину $M_{\text{г}}$. Поэтому величина $M_{\text{г}}$ за материалом определяется источником гамма-квантов, находящимся либо в начальном его слое, либо перед ним, и образование собственных захватных гамма-квантов в остальной части материала, а для материала КМДГТ (после стали) вообще во всем материале, роли не играет.

Таблица 1

Длины релаксации плотности потока быстрых нейтронов ($\lambda_{\text{он}}$, см) с энергией $E > 2$ МэВ в исследуемых материалах в зависимости от толщины слоя (h , см)

Материал	$\lambda_{\text{он}}(h)$ за слоем стали, см			$\lambda_{\text{он}}(h)$ за слоем свинца, см		
	$h = 0-30$	$h = 30-60$	$h = 60-100$	$h = 0-30$	$h = 30-60$	$h = 60-100$
ГТК	4,2	5,3	6,2	4,3	5,7	6,4
ГТК-ПЦ	4,6	5,8	6,8	4,7	6,2	7,0
ДГТ	6,7	7,9	9,2	6,7	8,4	9,7
КДГТ	5,0	6,0	7,0	5,1	6,4	7,2
КМДГТ	5,0	6,0	6,9	5,0	6,3	7,1

Таблица 2

Длины релаксации мощности дозы гамма-квантов (λ_r , см) в исследуемых материалах в зависимости от толщины слоя (h , см)

Материал	$\lambda_r(h)$ за слоем стали		$\lambda_r(h)$ за слоем свинца	
	$h = 30-60$	$h = 60-100$	$h = 30-60$	$h = 60-100$
ГТК	8,7	9,2	8,7	9,2
ГТК-ПЦ	9,6	10,2	9,6	10,2
ДГТ	13,5	14,8	13,5	14,9
КДГТ	9,9	10,6	9,9	10,7
КМДГТ	10,3	10,6	10,1	10,7

Длина релаксации мощности дозы гамма-квантов в водородсодержащих материалах также изменяется в зависимости от содержания в них дроби гидрида титана, но в установившейся области спектра уже не зависит от впереди стоящего материала. Величины λ_r для материалов КДГТ и КМДГТ больше по сравнению с материалами ГТК и ГТК-ПЦ на 5%.

Заключение

Таким образом, кратности ослабления нейтронного и гамма-излучений зависят от их спектров на передней границе исследуемого материала. Эти спектры формируются материалами конструкций, находящимися перед исследуемыми материалами.

Работа выполнена при поддержке проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 11.2034.2014/К и гранта РФФИ, проект № 14-41-08059.

Список литературы

1. Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Соколенко И.В., Ястребинская А.В. Нанонаполненные полимерные композиционные радиационно-защитные материалы авиационно-космического назначения // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 128.
 2. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Композиционный материал, стойкий к воздействию высокоэнергетических излучений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 2. – С. 25–27.
 3. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Бондаренко Ю.М. Перспективы создания современных

высококонструкционных радиационно-защитных металлокомпозиций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 27–29.

4. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Бондаренко Ю.М. Композиционный материал для радиационной защиты // Патент РФ №2470395, 20.12.2010.

5. Матюхин П.В., Ястребинский Р.Н. Исследование механизмов модифицирования поверхности природных железорудных минералов алкилсиликонатами // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2005. – Т. 48. – № 4. – С. 140.

6. Огрель Л.Ю., Ястребинская А.В., Бондаренко Г.Н. Полимеризация эпоксидного связующего в присутствии добавки полиметилсилоксана // Строительные материалы. – 2005. – № 9. – С. 82–87.

7. Огрель Л.Ю., Ястребинская А.В. Структурообразование и свойства легированных эпоксидных композитов // Строительные материалы. – 2004. – № 8. – С. 48–49.

8. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Полимерные радиационно-защитные композиты / Монография. – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 199 с.

9. Павленко В.И., Епифановский И.С., Ястребинский Р.Н., Куприева О.В. Термопластичные конструкционные композиционные материалы для радиационной защиты // Перспективные материалы. – 2010. – № 6. – С. 22–28.

10. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Черкашина Н.И. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 113–116.

11. Павленко В.И., Ястребинская А.В., Павленко З.В., Ястребинский Р.Н. Высокодисперсные органосвинцеилосановые наполнители полимерных матриц // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2010. – № 2. – С. 99–103.

12. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Ястребинская А.В. Полимерные диэлектрические композиты

- с эффектом активной защиты // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 62–66.
13. Павленко В.И., Липканский В.М., Ястребинский Р.Н. Расчеты процессов прохождения гамма-квантов через полимерный радиационно-защитный композит // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77, № 1. – С. 12–15.
14. Павленко В.И., Епифановский И.С., Ястребинский Р.Н. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // Перспективные материалы. – 2006. – № 3. – С. 22.
15. Павленко В.И., Воронов Д.В., Ястребинский Р.Н. Радиационно-защитный тяжелый бетон на основе железорудного минерального сырья // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 4. – С. 40–42.
16. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Смоликов А.А., Дегтярев С.В., Воронов Д.В. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // Перспективные материалы. – 2006. – № 2. – С. 47–50.
17. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронов Д.В. Тяжелый бетон для защиты от ионизирующих излучений // Строительные материалы. – 2007. – № 8. – С. 48–49.
18. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронов Д.В. Исследование тяжелого радиационно-защитного бетона после активации быстрыми нейтронами и гамма-излучением // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81. – № 4. – С. 661–665.
19. Павленко В.И., Смоликов А.А., Ястребинский Р.Н., Дегтярев С.В., Панкратьев Ю.В., Орлов Ю.В. Радиационно-защитный бетон для АЭС с РБМК на основе железо-серпентинитовых композиций с цементным связующим // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2004. – № 8. – С. 66.
20. Павленко В.И., Куприева О.В., Черкашина Н.И., Ястребинский Р.Н. Дефектность кристаллов модифицированного гидроксида титана, подвергнутого термической обработке // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 125–129.
21. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Куприева О.В., Самойлова Ю.М. Радиационно-защитные транспортные контейнеры отработавшего ядерного топлива на основе высоконаполненной полимерной матрицы и железорудного сырья КМА // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого РФФИ и Правительством Белгородской области. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 320–330.
22. Соколенко И.В., Ястребинский Р.Н., Крайний А.А., Матюхин П.В., Тарасов Д.Г. Моделирование прохождения высокоэнергетических электронов в высоконаполненном полимерном композите // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 145–148.
23. Ястребинская А.В., Огрель Л.Ю. Разработка и применение композиционного материала на основе эпоксиановой смолы для строительных конструкций и теплоэнергетики // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 173.
24. Ястребинская А.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Коррозионно-стойкие полимеркомпозиты на основе эпоксидных и полиэфирных олигомеров для строительства // Перспективы развития строительного комплекса. – 2012. – Т. 1. – С. 243–247.
25. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Ястребинская А.В., Матюхин П.В. Структурообразование металло-олигомерных водных дисперсий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 2. – С. 121–123.
26. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В., Воронов Д.В., Павленко З.В., Самойлова Ю.М. Конструкционные радиационно-защитные композиционные материалы на основе модифицированных железорудных пород КМА // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого РФФИ и Правительством Белгородской области. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 491–499.
27. Ястребинская А.В., Павленко В.И., Матюхин П.В., Воронов Д.В. Механическая активация полимерных диэлектрических композиционных материалов в непрерывном режиме // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 74–77.
28. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В., Четвериков Н.А. Композиционный материал для защиты от гамма-излучения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 17–20.
29. Ястребинская А.В. Модифицированный конструкционный стеклопластик на основе эпоксидных олигомеров для строительных изделий: Автореф. дис. канд. техн. наук. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород. Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – 19 с.
30. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Ястребинская А.В., Черкашина Н.И. Модифицированные железоокисные системы – эффективные сорбенты радионуклидов // Перспективные материалы. – 2013. – № 5. – С. 39–43.
31. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И. Транспортный упаковочный комплект для радиоактивных отходов на основе радиационно-защитной полимерной матрицы / Перспективные материалы. – 2015. – № 6. – С. 25–31.
32. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Kuprieva O.V., Epifanovskii I.S. Thermoplastic constructional composite material for radiation protection // Inorganic Materials: Applied Research. – 2011. – Т. 2, № 2. – С. 136–141.
33. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Lipkanskii V.M. Simulation of the processes of gamma-radiation transport through shielding containers for radioactive waste // Russian Physics Journal. – 2003. – Т. 46, № 10. – С. 1062–1065.
34. Pavlenko V.I., Yastrebinskij R.N., Degtyarev S.V. Modeling of processes of interaction of high-energy radiations with radiation-protective oxide of iron composites // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2005. – Т. 10, № 1–2. – С. 46–51.