

УДК 54-76

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОТРУБЧАТЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СИНТЕЗА РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ**Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Демченко О.В.***ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: yrndo@mail.ru*

Рассмотрены различные способы защиты от радиации (ионизирующего излучения). Показаны способы и материалы для защиты от радиации в космосе и на атомных электростанциях. В данной работе представлена возможность использования нанотрубчатых структур для синтеза радиационно-защитных экранов. В качестве нанотрубчатых структур использовали волокна хризотила. При синтезе волокон хризотила использовали добавки с содержанием кристаллизационной воды, в частности, буру и кристаллогидрат двухвалентного железа, а для поглощения тепловых нейтронов – борсодержащие соединения, в частности, борную кислоту. Установлена возможность получения бетонного композиционного материала, обладающего высокими термическими и нейтронно-защитными свойствами в сравнении с обычным тяжелым бетоном на основе волокон хризотила. Бетоны и растворы на основе разработанного нанотрубчатого хризотилового наполнителя способны без существенного ухудшения строительно-технических свойств выдерживать длительное действие радиации с интегральным потоком нейтронов до $5 \cdot 10^{24}$ н/м² при рабочих температурах до 750 °С. При локальных перегревах такие бетоны будут устойчивы до 1150 °С, хотя и потеряют до 35 % исходной прочности.

Ключевые слова: нанотрубки, хризотил, радиационная защита, нейтронная защита, бетоны, растворы

USING NANO TUBE STRUCTURE FOR SYNTHESIZING RADIATION-PROTECTIVE SCREENS**Yastrebinsky R.N., Pavlenko V.I., Demchenko O.V.***Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: yrndo@mail.ru*

Various methods of radiation protection (ionizing radiation). Showing methods and materials for protection against radiation in space and in nuclear power plants. This paper presents the possibility of using nanotube structures for the synthesis of radiation-shielding. As the nanotube structures used chrysotile fibers. In the synthesis of the chrysotile fibers with the additive used crystal-water content, particularly borax and hydrated ferrous iron, and for the absorption of thermal neutrons – boron compounds, particularly boric acid. The possibility of obtaining a concrete composite material, with high thermal and neutron shielding properties compared to conventional heavy concrete on the basis of chrysotile fibers. Concrete and solutions developed on the basis of chrysotile nanotube filler capable without a significant reduction of construction and technical properties to withstand long-term effect of radiation with the integral neutron flux to $5 \cdot 10^{24}$ n / m² at operating temperatures up to 750 °C. When local overheating of such concrete are stable up to 1150 °C, although it will lose up to 35 % of the original strength.

Keywords: nanotubes, chrysotile, radiation protection, neutron shielding, concrete, solution

Существует несколько способов защиты от радиации (ионизирующего излучения): необходимо сокращать длительность облучения, увеличивать расстояние до источника радиации, а также использовать радиационно-защитные экраны. В настоящее время много исследований посвящено созданию таких радиационно-защитных и радиационно-стойких экранов [2, 9, 25, 32].

Они могут быть изготовлены из одного материала, однако применение различных композиционных материалов, которые включают в себя несколько компонентов, позволяет создавать экраны, обладающие наибольшей радиационной стойкостью [1, 13, 20, 21]. Известно, что свойствами композитов можно управлять, изменяя их состав и условия получения, так, например, можно просто увеличивать или уменьшать долю компонентов [5, 22, 23, 31], что позволяет создавать материа-

лы с заданными свойствами для определенной цели.

Обычно используют комбинацию нескольких материалов, поскольку трудно подобрать универсальный материал для всех видов излучения. Так, например, в космосе действуют такие излучения, как электроны, протоны, вакуумный ультрафиолет и др. Соответственно для защиты от каждого из них требуется свой подход. Для защиты от вакуумного ультрафиолета необходимо использовать фотостойкие материалы, особенно если необходимо защитить полимер [3, 4, 16–18, 26]. Для защиты от электронов лучше использовать элементы с малой атомной массой [10, 14, 15, 19, 28]. Кроме того, в космосе еще необходимо защищаться от набегающего потока различных частиц, в особенности от атомарного кислорода. Существует ряд исследований, посвященных этой проблеме [12, 29].

На Земле же необходимо защищаться от других видов излучения. Для создания биологической защиты на атомных электростанциях необходимо создавать защиту от нейтронного излучения. Проникающая способность нейтронов зависит от их энергии и состава атомов вещества, с которыми они взаимодействуют. Слой половинного ослабления лёгких материалов для нейтронного излучения в несколько раз меньше, чем для тяжёлых. Тяжёлые материалы, например металлы, хуже ослабляют нейтронное излучение, чем гамма-излучение. Лучшими для защиты от нейтронного излучения являются водородсодержащие материалы [6, 7, 11, 30]. Обычно применяют воду, парафин, полиэтилен. Кроме того, нейтронное излучение хорошо поглощается бором, бериллием, кадмием, графитом [8, 24, 27].

Для защиты от нейтронов применяют бетонные конструкции, а задача проектировщиков состоит в правильном выборе толщины и состава бетонной защиты, которая могла бы обеспечить ослабление потоков ионизирующих излучений до безопасного уровня при минимальных затратах на сооружение реакторной установки.

В данной работе рассмотрена возможность применения нанотрубчатых волокон хризотила для синтеза радиационно-защитных бетонов.

Цель исследования

Изучить возможность создания волокнистых материалов из волокон хризотила и радиационно-защитных бетонов с их использованием, обладающих высокой стойкостью к нейтронному облучению.

Материалы и методы исследования

При синтезе волокон хризотила использовали добавки с содержанием кристаллизационной воды, в частности, буру ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) и кристаллогидрат двухвалентного железа ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – железный купо-

рос), а для поглощения тепловых нейтронов – борсодержащие соединения, в частности, борную кислоту.

Для получения радиационно-защитного бетона в качестве вяжущего использовали глинозёмистый цемент марки ГЦ 50, в качестве заполнителя – чугунную дробь ($\rho = 7400 \text{ кг/м}^3$) и разработанные синтезированные нанотрубчатые волокна хризотила. Для сокращения В/Ц применялись специальные модифицирующие добавки.

Результаты исследования и их обсуждение

Волокнистые кристаллы получены из шихты, состоящей из исходных компонентов в соотношении $\text{MgO}:\text{SiO}_2:\text{B}_2\text{O}_3 = 2,4:0,1:1,5$, при давлении $9,81 \cdot 10^6 \text{ Па}$ и температуре 423 К. При этой температуре для завершения процесса серпентинизации требуется трое суток, ввиду того что растворимость кремнезёма очень мала. Транспортирующим агентом для кремнезёма в гидротермальных условиях служат как вода, так и пар, следовательно, чем больше воды в реакционном объёме автоклава при данной температуре, тем больше в ней растворено кремнезёма, но увеличение количества воды приводит к увеличению давления. При увеличении температуры реакции до 573 К (давление $9,81 \cdot 10^6 \text{ Па}$) реакция завершается за два часа.

Физико-механические свойства разработанного бетона представлены в таблице. Содержание связанной воды после сушки ($T = 110^\circ\text{C}$) – 2,3 %, после нагрева до рабочей температуры эксплуатации – 1,1 %.

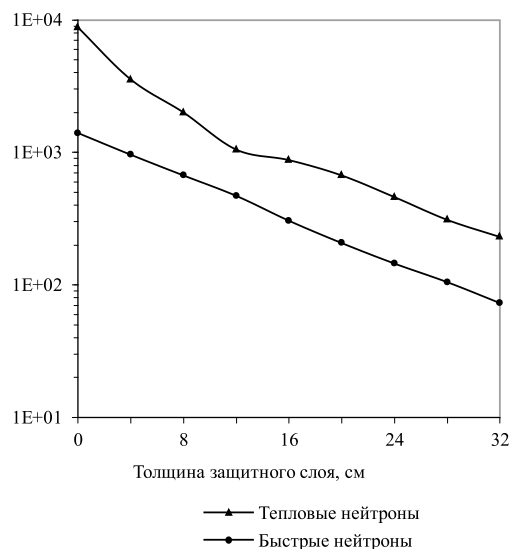
Исследованы нейтронно-защитные свойства бетонного композита, наполненного нанотрубчатыми хризотилowymi волокнами.

На рисунке приведены экспериментальные функции ослабления плотности потоков тепловых и быстрых нейтронов в радиационно-защитном бетоне.

Плотность потока быстрых нейтронов уменьшается по экспоненциальному закону с длиной релаксации $\lambda = (9,3 \pm 0,2) \text{ см}$.

Физико-механические свойства радиационно-защитного бетона

№ п/п	Параметр	Значение
1	Средняя плотность бетона, ρ , кг/м^3	5200
2	Предел прочности при сжатии, МПа	65
3	Предел прочности при изгибе, МПа	11
4	Рабочая температура эксплуатации, $^\circ\text{C}$	750
5	Максимальная температура эксплуатации, $^\circ\text{C}$	1150
6	Содержание кристаллизационной воды после нагрева до рабочей температуры эксплуатации, %	1,1



Функции распределения плотности потоков тепловых (1) и быстрых (2) нейтронов в разработанном радиационно-защитном бетоне

Плотность потока тепловых нейтронов в первых слоях (~ до 12 см) материала изменяется более резко по сравнению с быстрыми нейтронами. При толщине защиты более 12 см ослабление плотности потока тепловых нейтронов происходит одинаково с быстрыми нейтронами с длиной релаксации $\lambda_{т.н.} = (8,3 \pm 0,2)$ см, т.е. в материале не происходит накопление тепловых и промежуточных нейтронов.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлена возможность получения бетонного композиционного материала, обладающего высокими термическими и нейтронно-защитными свойствами в сравнении с обычным тяжелым бетоном. Бетоны и растворы на основе разработанного нанотрубчатого хризотилового наполнителя способны без существенного ухудшения строительно-технических свойств выдерживать длительное действие радиации с интегральным потоком нейтронов до $5 \cdot 10^{24}$ н/м² при рабочих температурах до 750 °С. При локальных перегревах такие бетоны будут устойчивы до 1150 °С, хотя и потеряют до 35 % исходной прочности.

Заключение

В ходе проведенных исследований был разработан способ получения термостойкого нанотрубчатого наполнителя с высокой способностью замедления нейтронов.

Полученный нанотрубчатый наполнитель на основе хризотила может быть ре-

комендован для получения термостойких бетонов с повышенными нейтронно-защитными свойствами. Благодаря высокой температуре эксплуатации бетона (до 750 °С), и максимальных локальных перегревах до 1150 °С, полученный жаростойкий бетон может эффективно применяться при конструировании биологической защиты атомных реакторов.

Работа выполнена при поддержке проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 11.2034.2014/К.

Список литературы

1. Матюхин П.В. Жаропрочный радиационно-защитный композиционный материал конструкционного назначения / П.В. Матюхин, В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, Н.И. Черкашина, В.А. Дороганов, Е.И. Евтушенко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 10. – С. 32–36.
2. Матюхин П.В. Термостойкие радиационно-защитные композиционные материалы, эксплуатируемые при высоких температурах / П.В. Матюхин, В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, В.А. Дороганов, Н.И. Черкашина, Е.И. Евтушенко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 7–8. – С. 23–25.
3. Павленко В.И. Влияние вакуумного ультрафиолета на микро- и наноструктуру поверхности модифицированных полистирольных композитов / В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, Н.И. Черкашина, О.Д. Едаменко // Перспективные материалы. – 2013. – № 3. – С. 14–19.
4. Павленко В.И. Влияние вакуумного ультрафиолета на поверхностные свойства высоконаполненных композитов / В.И. Павленко, В.Т. Заболотный, Н.И. Черкашина, О.Д. Едаменко // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 2. – С. 19–24.
5. Павленко В.И. Влияние содержания кремнийорганического наполнителя на физико-механические и поверхностные свойства полимерных композитов / В.И. Павленко, Н.И. Черкашина, В.В. Сухорослова, Ю.М. Бондаренко // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 95.
6. Павленко В.И. Дефектность кристаллов модифицированного гидрида титана, подвергнутого термической обработке / В.И. Павленко, О.В. Куприева, Н.И. Черкашина, Р.Н. Ястребинский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. № 5. – С. 125–129.
7. Павленко В.И. Изучение коэффициентов ослабления фотонного и нейтронного пучков при прохождении через гидрид титана / В.И. Павленко, О.Д. Едаменко, Н.И. Черкашина, О.В. Куприева, А.В. Носков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 6. – С. 21.
8. Павленко В.И. Модифицирование поверхности гидрида титана боросиликатом натрия / В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, О.В. Куприева, Р.Н. Ястребинский, Н.И. Черкашина // Перспективные материалы. – 2014. – № 6. – С. 19–24.
9. Павленко В.И. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы / В.И. Павленко, О.Д. Едаменко, Р.Н. Ястребинский, Н.И. Черкашина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 113–116.
10. Павленко В.И. Расчет ионизационных и радиационных энергетических потерь быстрых электронов в полистирольном композите / В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, Н.И. Черкашина // Перспективные материалы. – 2015. – № 8. – С. 5–11.
11. Павленко В.И. Повышение эффективности антикоррозионной обработки ядерного энергетического оборудования путем пассивации в алюминийсодержащих растворах / В.И. Павленко, В.В. Прозоров, Л.Л. Лебедев, Ю.И. Слепов

конь, Н.И. Черкашина // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56. № 4. – С. 67–70.

12. Павленко В.И. Экспериментальное и физико-математическое моделирование воздействия набегающего потока атомарного кислорода на высоконаполненные полимерные композиты / В.И. Павленко, Л.С. Новиков, Г.Г. Бондаренко, В.Н. Черник, А.И. Гайдар, Н.И. Черкашина, О.Д. Едаменко // Перспективные материалы. – 2012. – № 4. – С. 92–98.

13. Павленко В.И. Эффективный способ получения термостойкого кристаллического нанопорошка вольфрама свинца для жаростойких радиационно-защитных материалов / В.И. Павленко, Р.Н. Ястребинский, В.А. Дороганов, И.В. Соколенко, Н.И. Черкашина, Е.И. Евтушенко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 7–8. – С. 32–36.

14. Павленко В.И. Явления электризации диэлектрического полимерного композита под действием потока высокоэнергетических протонов / В.И. Павленко, А.И. Акишин, О.Д. Едаменко, Р.Н. Ястребинский, Д.Г. Тарасов, Н.И. Черкашина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12. № 4–3. – С. 677–681.

15. Павленко В.И. Суммарные потери энергии релятивистского электрона при прохождении через полимерный композиционный материал / Павленко В.И., Едаменко О.Д., Черкашина Н.И., Носков А.В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. – № 4. – С. 101–106.

16. Черкашина Н.И. Воздействие вакуумного ультрафиолета и кислородной плазмы на структуру и устойчивость полистирольного композита с органосилоксановым наполнителем: диссертация ... кандидата технических наук. – Белгород, 2013.

17. Черкашина Н.И. Исследование влияния вакуумного ультрафиолета на морфологию поверхности нанонаполненных полимерных композиционных материалов в условиях, приближенных к условиям околоземного космического пространства / Черкашина Н.И., Павленко В.И., Едаменко А.С., Матюхин П.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 130.

18. Черкашина Н.И. Воздействие вакуумного ультрафиолета на полимерные нанокompозиты // Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения): Материалы Межд. научно-практич. конференции. – 2010. – С. 246–249.

19. Черкашина Н.И. Моделирование воздействия космического излучения на полимерные композиты с применением программного комплекса GEANT4 // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – С. 122.

20. Черкашина Н.И. Перспективы создания радиационно-защитных полимерных композитов для космической техники в Белгородской области / Н.И. Черкашина В.И. Павленко / Белгородская область: прошлое, настоящее, будущее. Материалы областной научно-практической конференции в 3-х частях. – 2011. – С. 192–196.

21. Черкашина Н.И. Разработка наноструктурированных вяжущих на основе местного сырья Белгородской области для штукатурных растворов // В сборнике: Материалы

I Международной научно-практической конференции «Проблемы строительного производства и управления недвижимостью». – Кемерово, 2010. – С. 67–70.

22. Черкашина Н.И. Синтез высокодисперсного гидрофобного наполнителя для полимерных матриц / Н.И. Черкашина, А.А. Карнаухов, А.В. Бурков, В.В. Сухорослова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 156–159.

23. Ястребинский Р.Н. Модифицированные железокислородные системы – эффективные сорбенты радионуклидов / Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, Г.Г. Бондаренко, А.В. Ястребинская, Н.И. Черкашина // Перспективные материалы. – 2013. – № 5. – С. 39–43.

24. Ястребинский Р.Н. Структурно-фазовая характеристика боросиликатного покрытия // Р.Н. Ястребинский, О.В. Куприева, Н.И. Черкашина // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57. – № 9. – С. 20–23.

25. Matyukhin P.V. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material / P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebinsky, N.I. Cherkashina // Middle East Journal of Scientific Research. – 2013. – Т. 17. № 9. – P. 1343–1349.

26. Pavlenko V.I. Effect of vacuum ultraviolet on the surface properties of high-filled polymer composites / V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, O.D. Edamenko, V.T. Zabolotny // Inorganic Materials: Applied Research. – 2014. – Т. 5. № 3. – P. 219–223.

27. Pavlenko V.I. Modification of titanium hydride surface with sodium borosilicate / V.I. Pavlenko, O.V. Kuprieva, R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina, G.G. Bondarenko // Inorganic Materials: Applied Research. – 2014. – Т. 5. № 3. – P. 219–223.

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

29. Pavlenko V.I. Using the high-dispersity $[\alpha]\text{-Al}_2\text{O}_3$ as a filler for polymer matrices, resistant against the atomic oxygen / V.I. Pavlenko, N.I. Cherkashina, A.V. Yastrebinskaya, P.V. Matyukhin, O.V. Kuprieva // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Т. 25. № 12. – P. 1740–1746.

30. Pavlenko V.I. Study of the attenuation coefficients of photon and neutron beams passing through titanium hydride / V.I. Pavlenko, O.D. Edamenko, N.I. Cherkashina, O.V. Kuprieva, A.V. Noskov // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2015. – Т. 9. № 3. – P. 546–549.

31. Slyusar' O.A. Effect of additives on dispersed system structure formation / O.A. Slyusar', R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina, V.A. Doroganov, A.V. Yastrebinskaya // Refractories and Industrial Ceramics. – 2015.

32. Yastrebinsky R.N. Modifying the surface of iron-oxide minerals with organic and inorganic modifiers / R.N. Yastrebinsky, V.I. Pavlenko, P.V. Matyukhin, N.I. Cherkashina, O.V. Kuprieva // Middle East Journal of Scientific Research. – 2013. – Т. 18. № 10. – P. 1455–1462.