

УДК 678.046.3

ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Павленко З.В.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: yrndo@mail.ru

Авторами разработаны способы переработки и утилизации жидких радиоактивных отходов посредством их включения в бетонные матрицы с железоксидными наполнителями с последующей контейнеризацией твердых радиоактивных отходов. Использование железоксидной матрицы обеспечивает снижение мощности экспозиционной дозы объекта переработки, снижает альфа-загрязненность поверхности компаунда и обеспечивает минимизацию объема вторичных отходов за счет перевода жидких радиоактивных отходов в твердые. Для прогнозирования возможных изменений в железоксидной матрице изучены механизмы и кинетика взаимодействия высокоэнергетических пучков различной физической природы на структуру и свойства полученных материалов. Изучены защитные свойства железобетонных материалов при воздействии на них точечных и объемных гамма-источников. Подтверждена адекватность разработанных физических моделей геометрии радиационной защиты контейнеров с консервированными в них твердыми радиоактивными отходами.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, переработка, оксиды железа, утилизация, контейнеры, композиты, излучение

BURIAL OF RADIOACTIVE WASTE WITH USE OF IRON ORE MINERAL RAW MATERIALS

Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Pavlenko Z.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: yrndo@mail.ru

Authors developed ways of processing and utilization of liquid radioactive waste by means of their inclusion in concrete matrixes with zhelezooksidny fillers with the subsequent konteynerization of solid radioactive waste. Use of a zhelezooksidny matrix provides deceleration of power of an exposition dose of object of processing will reduce alpha impurity of a surface of a compound and provides minimization of volume of secondary waste for the account transfers of liquid radioactive waste to the firm. For forecasting of possible changes in a zhelezooksidny matrix mechanisms and kinetics of interaction of high-energy bunches of various physical nature on structure and properties of the received materials are studied. Protective properties of ferroconcrete materials at impact on them of dot and volume gamma sources are studied. Adequacy of the developed physical models of geometry of radiation protection of containers with the solid radioactive waste preserved in them is confirmed.

Keywords: radioactive waste, processing, iron oxides, utilization, containers, composites, radiation

В настоящее время наиболее актуально создание единой технологии переработки и кондиционирования радиоактивных отходов, обеспечивающей химическую, тепловую и радиационную устойчивость, пониженную радиационную активность, взрывобезопасность, механическую прочность получаемого продукта, концентрирование радионуклидов в меньшем объеме, отсутствие газовой выделенности, а также высокие экономические показатели [1–16].

Для сбора, переработки и долговременной локализации радиоактивных отходов в России создана централизованная система, включающая территориальные спецкомбинаты и пункты захоронения (ПЗРО). Однако для реакторов типа РБМК АЭС учет поступающих на долговременное хранение отходов, оценка качества их подготовки и захоронению на большинстве ПЗРО не отвечают современным научно-техническим требованиям. В связи с этим возникает необходимость разработки новых научно-технических подходов не про-

сто к захоронению твердых радиоактивных отходов (ТРО), а переводу их из класса повышенной радиоактивности к малоактивным или даже нерадиоактивным объектам путем их консервирования в универсальные безопасные высокопрочные контейнеры [17–34].

Авторами предлагается использование безопасной технологии кондиционирования, переработки и утилизации РАО посредством включения их в бетонные матрицы с железоксидными наполнителями с последующей контейнеризацией твердых радиоактивных отходов.

Цель исследования

Разработать технологию, позволяющую минимизировать и кондиционировать жидкие радиоактивные отходы АЭС путем переводы их в твердые радиоактивные отходы пониженной активности с соблюдением действующих норм и правил по обращению с радиоактивными или токсичными промышленными отходами.

Материалы и методы исследования

Радиационно-защитные компаунды с включенными в них жидкими радиоактивными отходами получены с использованием природных высокожелезистых магнетитовых концентратов и цементного вяжущего марки М500 методом полусухого прессования с последующей термовлажностной обработкой прессованного композита. В качестве исходного железорудного сырья использовали высококачественные магнетитовые концентраты КМА с содержанием общего железа 68,5% масс.

Контейнеры для радиоактивных отходов получены на основе магнетитового концентрата и кремнийорганического связующего, подвергнутых совместной механоактивации в струйной мельнице с последующим прессованием и термической обработкой в атмосфере водяного пара. Оболочка контейнера выполнена из высокопрочной ферритной стали 400 серии.

Исследование радиационно-защитных свойств разработанных материалов моделировалось методом Монте-Карло.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные методом полусухого прессования бетонные композиты на основе железоксидного минерального сырья с включенными в них радиоактивными отходами обладают следующими характеристиками: предел прочности на сжатие после 28 суток твердения 140 кг/см²; плотность материала 2900 кг/м³; водопоглощение 8 масс%; ослабление мощности

экспозиционной дозы 12,0 крат.; выщелачиваемость по ¹³⁷Cs (среднегодовая) не более 0,0001 (г/см²)/сут; альфа-загрязненность поверхности материала не более 2 (расп/см)/мин; содержание сухого ила в 1 м³ при кратности ослабления МЭД равной 2 находится в пределах 900–1100 кг.

Разработанный универсальный защитный контейнер обладает следующими физико-механическими и радиационно-защитными характеристиками: плотность бетона 3800 кг/м³; предел прочности на сжатие 120 МПа; предел прочности на изгиб 65 МПа; марка бетона по водонепроницаемости W12; марка бетона по морозостойкости F300; линейный коэффициент ослабления γ -излучения по ¹³⁷Cs (E = 0,66 МэВ) 0,28 см⁻¹, по ⁶⁰Co (E = 1,2 МэВ) 0,20 см⁻¹.

Изучены защитные свойства железоксидных материалов при воздействии на них точечных (ТГИ) и объемных (ОГИ) гамма-источников.

Теоретически рассчитанные значения линейных коэффициентов ослабления для ТГИ, выполненные по методу Монте-Карло в исследованном энергетическом интервале (табл. 1) близки к экспериментальным, что дает основание использовать их на практике.

Значения линейного коэффициента ослабления μ (см⁻¹) для ОГИ показано в табл. 2.

Таблица 1

Линейный коэффициент ослабления (μ) ТГИ защитного контейнера

Тип материала	ρ , кг/м ³	μ , см ⁻¹ для энергий (кэВ) ТГИ					
		60	122	166	392	511	661
Защитный контейнер	3800	7,16	3,21	2,01	0,55	0,42	0,31

Таблица 2

Линейный коэффициент ослабления (μ) ОГИ защитного контейнера

Тип материала	ρ , кг/м ³	μ , см ⁻¹ для энергий (кэВ) ОГИ					
		59	168	350	605	847	1811
Защитный контейнер	3800	9,02	2,85	1,05	0,33	0,21	0,11

Таблица 3

Кратность ослабления и числовой фактор накопления защитного контейнера для ТГИ и ОГИ с E ≈ 60 кэВ

h , см	0	1,0	1,6	2,2	3,2
$K_{\text{ТГИ}}$, отн.ед.	1,00	$7,82 \cdot 10^5$	$8,01 \cdot 10^9$	$9,44 \cdot 10^{13}$	$3,88 \cdot 10^{19}$
$K_{\text{ОГИ}}$, отн.ед.	1,00	$1,77 \cdot 10^6$	$3,11 \cdot 10^{10}$	$5,77 \cdot 10^{14}$	$4,01 \cdot 10^{20}$
B_{Ny} , отн.ед.	1,00	2,48	3,94	6,12	11,22

Практический интерес представляло исследование защитных характеристик контейнера по отношению к двум типам источников: на базе ТГИ и ОГИ с примерно с одинаковыми энергиями (60 кэВ). Установлено, что кратность ослабления ОГИ больше кратности ослабления ТГИ (табл. 3), что связано с числовым фактором накопления который в случае ОГИ больше 1 (числовой фактор накопления B_N равен $K_{ОГИ}/K_{ТГИ}$ для данного фиксированного значения E_γ).

Таким образом результаты анализа радиационно-защитных свойств защитного контейнера на основе магнетитового концентрата и кремнийорганического связующего на базе двух типов источников: точечного и объемного, практически совпадают, т.е. не зависят от применяемого γ -источника. Использование ОГИ – это моделирование реальной ситуации взаимодействия γ -излучения с защитными стенками контейнера с РАО.

Заключение

Таким образом, разработаны способы переработки и утилизации жидких радиоактивных отходов посредством включения их в бетонные матрицы с магнетитовым наполнителем и последующей контейнеризацией твердых радиоактивных отходов. Изучены защитные свойства железобетонных материалов при воздействии на них точечных (ТГИ) и объемных (ОГИ) гамма-источников. Установлено, что кратность ослабления ОГИ больше кратности ослабления ТГИ. Использование ОГИ – это моделирование реальной ситуации взаимодействия γ -излучения с защитными стенками контейнера с РАО.

Работа выполнена при поддержке проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 11.2034.2014/К и гранта РФФИ, проект. № 14-41-08067.

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 органосвинцеилосилановые 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 гидрида 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. Ради-

ционно-защитные транспортные контейнеры обработавшего 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. Коррозионностойкие 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 железоксидные 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. – P. 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. – P. 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. – P. 46–51.