

Транспортный упаковочный комплект для радиоактивных отходов на основе радиационно- защитной полимерной матрицы

Р. Н. Ястребинский, Г. Г. Бондаренко, В. И. Павленко

Рассмотрена возможность использования нейтронно-защитной полимерной оболочки для транспортных упаковочных комплектов (контейнеров) отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Подтверждена возможность синтеза высокодисперсных гидрофобных металлоорганосилоксановых порошков, в силоксановой цепи которых содержится химически связанный гадолиний с высокой концентрацией атомов гадолиния в олигомерном объеме. Разработаны научные основы модифицирования структуры и свойств полимерных композитов, предусматривающие направленное регулирование их надмолекулярной структуры путем введения пластифицирующих и модифицирующих добавок. Проведены расчетные и экспериментальные исследования нейтронно-защитных свойств разработанного полимерного композита.

Ключевые слова: транспортный упаковочный комплект, нейтронная защита, полимерный композит, органосилоксан гадолиния, полиалканимидная матрица, получение, свойства.

Введение

Решение проблемы ОЯТ в России, с учетом сложившейся ситуации, технических и экономических возможностей, а также международного опыта наиболее эффективно путем долговременного хранения ОЯТ в контейнерах. Долговременный срок хранения должен быть обеспечен надежностью конструкции контейнера и использованием материалов, позволяющих хранить ОЯТ в течение до 100 и более лет, исключая возможность контакта с биосферой [1, 2].

По принятой Минатомом РФ и ВМФ технологической схеме, транспортировка ОЯТ осуществляется в транспортно-упаковочных комплектах (контейнерах) типа ТУК (ТУК-108/1, ТУК-120), включающих в себя два элемента — собственно защитный контейнер (наружная упаковка) и чехол (внутренняя упаковка), — изготовленных из разных видов стали, высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (контейнеры Castor V19/52). Пространство между чехлами, в зависимости от типа контейнера, может быть заполнено нейтронно-защитным материалом на основе тяжелого бетона или каучуков с теплоотводящими элементами. Использование

стальных контейнеров обусловлено их прочностью и герметичностью. Однако контейнеры типа ТУК, ввиду агрессивности ОЯТ, подвержены химической и радиационной коррозии, имеют слабую защиту от тепловых нейтронов и не обеспечивают достаточного для обслуживающего персонала уровня радиационной безопасности. Большое сечение захвата тепловых нейтронов и значительное сечение неупругого рассеяния быстрых нейтронов приводят к образованию в стали мощных потоков вторичного гамма-излучения. Таким образом, стальные контейнеры после использования сами становятся источниками радиоактивного излучения [3].

Работы по созданию контейнеров, отвечающих нормам безопасности МАГАТЭ при перевозках радиоактивных веществ, проводили в СССР с начала 70-х годов. В период разработки характеристики отечественных контейнеров в основном соответствовали мировому уровню. Однако к настоящему моменту технические параметры отечественных контейнеров для ОЯТ ВВЭР (водо-водяных энергетических реакторов) уступают зарубежным ТУК [3].

Для увеличения нейтронно-защитных свойств ТУК авторами предлагается использование проме-

жуточной полимерной оболочки на основе термостойкой полиалканимидной матрицы, наполненной органосиликанатом гадолиния. Это значительно снизит вторичное гама излучение во внешней стальной оболочке контейнера и увеличит радиационно-химическую стойкость защитной конструкции.

Методика эксперимента

Одним из наиболее перспективных путей при получении полимерных радиационно-защитных композиций является использование высокодисперсных модифицированных наполнителей.

Проведено аппретирование химически осажденного гидроксида гадолиния из водного раствора его хлорида кремнийорганическими соединениями через протекание стадий гидролиза, конденсации, осаждения и полимеризации

Исследован комбинированный способ синтеза высокодисперсного органосиликаната гадолиния посредством золь-гель процесса, путем химического соосаждения гидроксида гадолиния из водного раствора его хлорида с участием кремнийорганических (алкилсиликонатов) олигомеров.

Для синтеза металлоолигомера выбран растворимый в воде метилсиликонат натрия $(\text{RSi}(\text{OH})_2\text{ONa})$, где $\text{R} = \text{CH}_3$ и водный раствор, содержащий ионы Gd^{3+} .

Полимерный композит получали смешением порошкообразного полиалканимида (ПАИ) и металлоолигомера в смесителе, их механоактивацией в струйной мельнице, последующим смешением композиции с пластифицирующей добавкой синтетической жирной кислотой (СЖК), фракции $\text{C}_{17} - \text{C}_{21}$ в количестве 0,5 масс. % на вальцах при температуре 473 К в течение 10 мин и дальнейшей переработкой методом литья под давлением или горячего прессования. Способ переработки композиций определяли по показателю текучести расплава (ПТР): до 30 % наполнения матрицы ПАИ рекомендовано использование литья под давлением, а свыше 30 % — горячее прессование. Высокая температура плавления и высокая скорость кристаллизации при относительно небольшой термостойкости полимера создают необходимость поддержания температуры прессформы на уровне 200 – 220 °С. Это направлено на предотвращение преждевременного закристаллизовывания полиалканимида при формировании композита.

Вариантные расчёты и пространственно-энергетические распределения потоков нейтронов в материале защиты проводили по программе ANISN [4], реализующей решение одномерного транспортного уравнения методом дискретных ординат с учётом анизотропии рассеяния. Спектр нейтронов рассчи-

тывали для 12-и группового разбиения энергетического интервала.

Для экспериментальных исследований определения защитных характеристик материала был использован точечный полоний-бериллиевый источник быстрых нейтронов активностью $A = 5,67 \cdot 10^6$ нейтр./с.

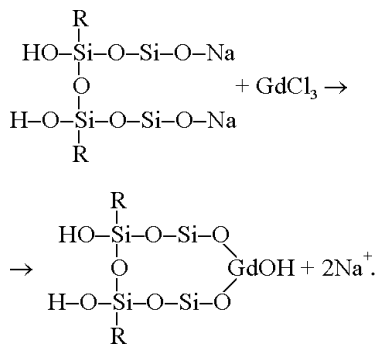
Излучение регистрировали сцинтилляционным счётчиком быстрых нейтронов на основе кристалла $\text{ZnS}(\text{Ag})$ и сцинтилляционным счётчиком тепловых нейтронов на основе кристалла $\text{ZnS}(\text{Ag})$, точнее на основе светосостава СФЛ5-6 (смесь $\text{ZnS}(\text{Ag})$ и лития), диспергированного в диске из оргстекла и притёртого с помощью вазелинового масла к фотокатоду фотоэлектронного умножителя.

Функции ослабления плотности потоков быстрых и тепловых нейтронов были измерены в условиях, когда между источником нейтронов $\text{Po} - \text{Be}$ и слоем исследуемого материала размещали полиэтиленовый замедлитель толщиной 8 см. Быстрые нейтроны $\text{Po} - \text{Be}$ источника при прохождении этого замедлителя создавали на его наружной стороне источник тепловых нейтронов. Детектор на первых слоях регистрировал тепловые нейтроны от этого источника, а затем — тепловые нейтроны, образовавшиеся в материале при замедлении быстрых нейтронов. В процессе этих исследований детектор тепловых нейтронов устанавливали вплотную к исследуемому слою. Фактор геометрического ослабления тепловых нейтронов был принят в виде $1/r$, где r — расстояние между $\text{Po} - \text{Be}$ источником и детектором тепловых нейтронов.

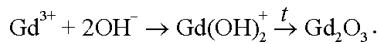
Дифференциальный термический анализ (ДТА) и термогравиметрию (ТГ) полиалканимидной матрицы проводили на дериватографе системы Паулик-Элмер фирмы “МОН” (Венгрия) при скорости нагрева 5 град./мин на воздухе, навеска образцов 0,2 – 1,0 г, чувствительность ДТА — 1/10, ДТГ — 1/5. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) наполнителя осуществляли с помощью ЭПР-спектрометра ESR 70-03 XD/2.

Результаты и их обсуждение

Метилсиликонат натрия в воде состоит из мономерных и димерных молекул. Реакция взаимодействия метилсиликоната натрия с ионами гадолиния в водном растворе протекает по механизму замещения ионов натрия в силонолятной группе $(\text{Si} - \text{ONa})$ алкилсиликоната натрия на ион гадолиния (схема 1). На это указывает отсутствие в ИК-спектре полосы поглощения $\gamma\text{Si} - \text{ONa}$ в синтезированном полиметилсиликонате гадолиния (ПМСГ) при 965 см^{-1} , характерной для полиалкилсиликоната натрия (рис. 1).



Так, как алкилсиликаты натрия в воде гидролизуются с образованием щелочи, при синтезе полиалкилсиликоната гадолиния возможно образование гидроксида гадолиния, который при температуре 250 °С дегидратирует до оксида гадолиния по схеме 2



Вместе с тем, исчезновение полосы поглощения $\gamma\text{Si}-\text{OH}$ при 840 и 810 cm^{-1} для ПМСГ показывает, что в условиях получения металлоолигомера может иметь место также поликонденсация молекул олигомера по схеме (3)

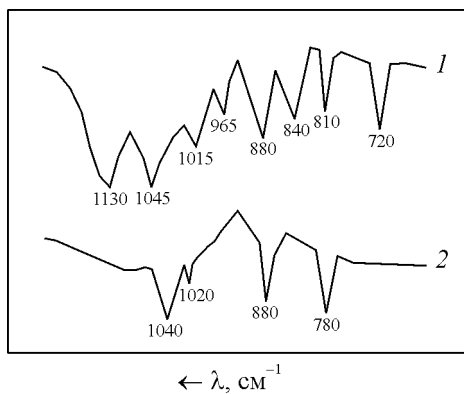
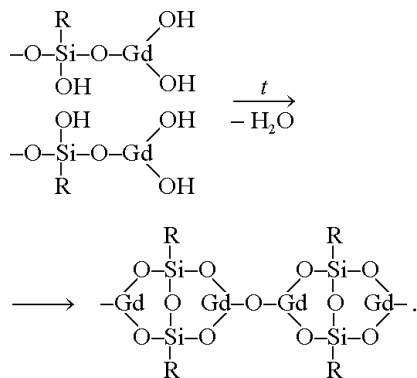
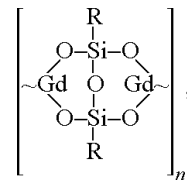


Рис. 1. Фрагменты ИК-спектров: 1 – полиметилсиликонат натрия; 2 – полиметилсиликонат гадолиния.

Происходит образование циклических структур и сшивка олигомерных молекул с увеличением числа силоксановых связей. Полосы поглощения, отвечающие колебаниям группы $\gamma\text{Si}-\text{O}-\text{Gd}$ в ИК-спектрах отчетливо не проявляются. Возможно, это связано с тем, что полоса поглощения связи $\gamma\text{Si}-\text{O}$ в $\text{Si}-\text{O}-\text{Gd}$ лежит в области 950 cm^{-1} , а связи $-\text{O}-\text{Gd}-$ — в области 430 – 660 cm^{-1} , где в спектрах исходных кремнийорганических олигомеров располагаются интенсивные полосы поглощения.

Схема элементарного звена олигомерной цепи образующегося ПМСГ, представляется в следующем виде (схема 4):



где $n = 12$. Молекулярная масса элементарного звена олигомера составляет около 480 а.е.м. Олигомер имеет цепочечную структуру, в силоксановой цепи которой возможно содержание силанольных групп $\equiv\text{Si}-\text{OH}$.

Элементарный состав и молекулярная масса синтезированного металлоолигомера приведены в табл. 1. Насыпная плотность ПМСГ составляет 2124 kg/m^3 , а максимальная плотность при уплотнении достигает 4513 kg/m^3 .

Таблица 1

Элементарный состав и молекулярная масса (\bar{M}) олигомерного порошка ПМСГ

Олигомер	Элементарный состав, масс. %					\bar{M}
	Si	Gd	O	H	C	
ПМСГ	11,67	65,41	16,67	1,25	5,0	5760

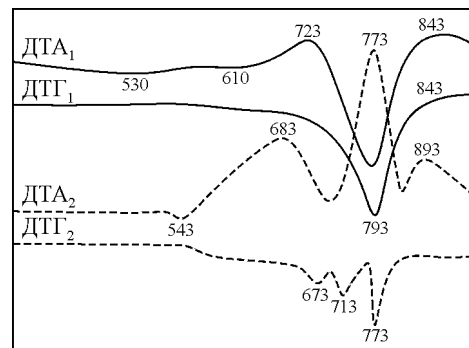


Рис. 2. Кривые ДТА: ДТА 1, ДТГ 1 – исходного ПАИ, ДТА 2, ДТГ 2 – подвергнутого активации в струйной мельнице.

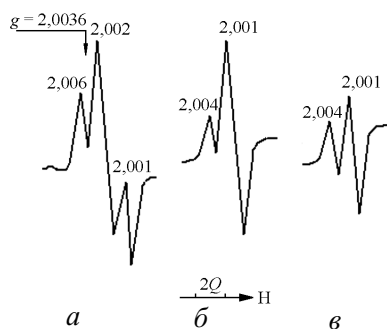


Рис. 3. ЭПР-спектры механоактивированного ПМСГ: *а* – полиметилсиликат натрия, *б* – полиметилсиликат гадолиния, *в* – полиметилсиликат гадолиния в присутствии порошкообразного полиакриламида.

Таким образом, появляется возможность осуществить направленную модификацию наполнителя в процессе совместного синтеза металлоолигомера и гадолиниевого наполнителя, то есть получить гидрофобный наполненный (краевой угол смачивания ПМСГ составляет 110 – 120 град.) металлоолигомер в гомогенной среде.

Механоактивация порошкообразной смеси (ПАИ – ПМСГ) в мельницах струйного типа обеспечивает аккумуляцию значительной величины внутренней энергии в материалах. Механоактивация ПАИ приводит к снижению интенсивности эндотермического эффекта термодеструкции полимера на 20 – 25 % (по данным ДТА в области температур 773 – 793 К, рис. 2), по сравнению с не активируемым ПАИ. Данный факт подтверждается и термовесовым анализом (ДТГ, рис. 2).

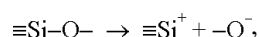
По данным ДТА для чистого ПАИ максимальная термодеструкция, сопровождающаяся интенсивным эндотермическим эффектом ($\Delta H = 195$ кДж/моль), наблюдается при 793 К. В этой же области температур для ПМСГ на кривой ДТА наблюдается экзотермический эффект ($\Delta H = -201$ кДж/моль, по данным калориметрии). Таким образом, в процессе механоактивации бинарной системы (ПАИ – ПМСГ) происходит в значительной степени взаимная компенсация термических эффектов в температурной области около 793 К.

При разрушении ПМСГ и композиций на его основе с помощью метода ЭПР зарегистрировано образование парамагнитных центров (ПМЦ) свободно-радикального (нейтральных дефектов с неспаренными электронами) и ионного типов (рис. 3). Стрелкой на спектрах ЭПР показано положение линии ДФПГ (эталонного образца А,А-Дифенил-В-пикрил-гидрида) ($\gamma = 2,0036$).

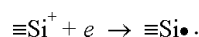
Дуплетный характер кислородных ПМЦ вызван разрывами связей по типу: $\text{Si} - \text{ONa} \rightarrow \text{Si} - \text{O} + \text{Na}^+$ и

$\text{Si} - \text{OH} \rightarrow \text{Si} - \text{O} \cdot + \text{H}$. Наблюдается линия пониженной интенсивности с $g = 2,001$ от ПМЦ $\equiv \text{Si} \cdot$. Невысокая концентрация кремниевых центров в ПМСГ, по-видимому, вызвана влиянием щелочного катиона (Na^+) в силонолятной группировке $\equiv \text{Si} - \text{ONa}$ органосилоксана, так как в ПМСГ возрастает роль уже кремниевых ПМЦ. Две линии ПМЦ: слабой $g = 2,004$ и интенсивной $g = 2,001$, относятся соответственно к Gd^{3+} и $\equiv \text{Si} \cdot$ с преобладанием последних ПМЦ.

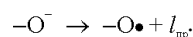
Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что при диспергировании ПМСГ-наполнителя связи $\text{Si} - \text{O}$ разрываются по гетеролитическому механизму:



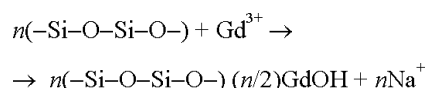
а ПМЦ $\equiv \text{Si} \cdot$ образуются в результате захвата электронов ионами кремния:



ПМЦ – О \cdot и электроны проводимости ($l_{\text{пр}}$) могут зародиться по схеме:



Подобные переходы являются следствием наиболее сильной деформации структуры силоксанов под действием механических напряжений. Учитывая, что в ПМСГ преобладают кислородные ПМЦ, можно вполне обоснованно считать, что при замещении в силонолятной группе ионов Na^+ на ионы Gd^{3+} по схеме



образуется более жесткий металлосилоксановый каркас. В результате ПМЦ в ПМСГ имеют свободно-радикальный кремниевый характер.

Таблица 2

Основные физико-механические характеристики композиционных материалов на основе высоконаполненной полиакриламидной матрицы

Показатель	Значение
Плотность, кг/м ³	4100
Прочность на сжатие, МПа	120
Прочность на изгиб, МПа	140
Прочность на растяжение, МПа	90
Модуль упругости, МПа	7·10 ³
Ударная вязкость, кДж/м ²	15
Термостойкость, °С	-100 – 400
Температура плавления, °С	500
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,535
Относительное удлинение при разрыве, %	5

Полученные экспериментальные данные по ЭПР-спектроскопии указывают на взаимодействие ПАИ с ПМСГ при их совместной механодеструкции в струйной мельнице. Об этом свидетельствует резкое снижение интенсивности ПМЦ кремниевого типа в композите ПАИ – ПМСГ (рис. 3в).

Таким образом, механодеструкция ПМСГ и ПАИ является эффективным средством получения высокодисперсной капсулированной системы (в которой дисперсной фазой является ПМСГ), экранируемой внешней полиалканимидной оболочкой; механодеструкция сопровождается физико-химическим взаимодействием данных фаз за счет образования при механоактивации активных химических центров различной природы [5].

Основные физико-механические характеристики полимерных композитов на основе ПАИ – ПМСГ, полученных методом горячего прессования с 70 %-м наполнением полиалканимидной матрицы металло-олигомером, представлены в табл. 2.

По программе ANISN в плоской геометрии в композициях с исследуемыми материалами были рассчитаны пространственно-энергетические рас-

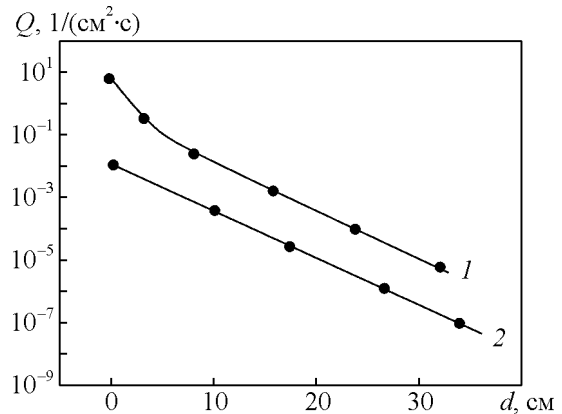


Рис. 4. Функции распределения плотности потоков тепловых (1) и быстрых (2) нейтронов в материале ПАИ – ПМСГ.

пределения плотностей потоков быстрых и тепловых нейтронов (табл. 3). Для сравнения приведены данные по материалу на основе силоксанового каучука, используемому в качестве нейтронной защиты в транспортных упаковочных комплектах ТУК-137 [6].

Рассчитаны теоретические сечения выведения и длины релаксации (как обратные значения величинам сечений выведения) для функционалов (табл. 4). Для тепловых нейтронов сечения выведения и длины релаксации определены для области установления стационарного состояния, когда кривая ослабления плотности потока выходит на экспоненту. В данном случае это происходит, начиная, примерно, с толщины 6 см.

Как видно из данных, приведенных в табл. 4, разработанный материал по своим защитным свойствам заметно превосходит материал на основе силоксанового каучука. При этом длина релаксации плотности потока тепловых нейтронов в материале ПАИ – ПМСГ на 37,5 % ниже, чем в силоксановом каучуке.

На рис. 4 приведены экспериментальные функции ослабления плотности потоков тепловых (кривая 1) и быстрых (кривая 2) нейтронов в материале ПАИ – ПМСГ.

Плотность потока быстрых нейтронов в материале ПАИ – ПМСГ уменьшается по экспоненциальному закону с длиной релаксации $\lambda = 4,3 \pm 0,2$ см.

Таблица 3

Ослабление потока быстрых и тепловых нейтронов ($E > 2$ МэВ) в материалах защиты ПАИ – ПМСГ и силоксановом каучуке

Толщина слоя, см	Плотность потока нейтронов, 1/(см ² ·с)			
	Быстрые нейтроны		Тепловые нейтроны	
	ПАИ – ПМСГ	Силоксановый каучук	ПАИ – ПМСГ	Силоксановый каучук
0	3,34·10 ⁶	3,30·10 ⁶	2,19·10 ⁸	2,25·10 ⁸
1	2,01·10 ⁶	2,11·10 ⁶	3,69·10 ⁶	5,53·10 ⁷
2	1,19·10 ⁶	1,34·10 ⁶	7,50·10 ⁵	1,50·10 ⁷
3	7,00·10 ⁵	8,47·10 ⁵	2,21·10 ⁵	4,75·10 ⁶
4	4,11·10 ⁵	5,34·10 ⁵	1,05·10 ⁵	2,01·10 ⁶
5	2,41·10 ⁵	3,37·10 ⁵	6,49·10 ⁴	1,13·10 ⁶
6	1,42·10 ⁵	2,12·10 ⁵	4,31·10 ⁴	7,42·10 ⁵
8	4,85·10 ⁴	8,42·10 ⁴	1,96·10 ⁴	3,76·10 ⁵
10	1,66·10 ⁴	3,34·10 ⁴	8,67·10 ³	1,95·10 ⁵
12	5,68·10 ³	1,32·10 ⁴	3,72·10 ³	9,94·10 ⁴
14	1,94·10 ³	5,23·10 ³	1,56·10 ³	4,94·10 ⁴
16	6,63·10 ²	2,07·10 ³	6,36·10 ²	2,41·10 ⁴
18	2,26·10 ²	8,19·10 ²	2,55·10 ²	1,15·10 ⁴
20	7,74·10 ¹	3,25·10 ²	2,01·10 ¹	5,42·10 ³

Таблица 4

Сечения выведения для функционалов, см⁻¹

Функционал	Сечения выведения для функционалов, см ⁻¹		Длины релаксации для функционалов, см	
	ПАИ – ПМСГ	Силоксановый каучук	ПАИ – ПМСГ	Силоксановый каучук
Плотность потока быстрых нейтронов ($E > 2$ МэВ), 1/(см ² ·с)	0,1069	0,0924	4,67	5,43
Плотность потока тепловых нейтронов (по толщине образца 6 – 20 см), 1/(см ² ·с)	0,0966	0,0703	4,45	7,12

Плотность потока тепловых нейтронов в первых слоях (~до 4 см) материала изменяется более резко, по сравнению с быстрыми нейтронами. При толщине защиты более 4 см ослабление плотности потока тепловых нейтронов происходит одинаково с быстрыми нейтронами с длиной релаксации $\lambda_{\text{тн}} = 4,1 \pm 0,2$ см, то есть в материале не происходит накопление тепловых и промежуточных нейтронов.

Таким образом, экспериментальные испытания материала ПАИ – ПМСГ полностью подтвердили его высокие нейтронно-защитные свойства, предсказанные расчётным методом.

Выводы

Рассмотрена возможность использования нейтронно-защитной полимерной оболочки для транспортных упаковочных комплектов (контейнеров) отработанного ядерного топлива.

Подтверждена возможность синтеза высокодисперсных гидрофобных металлоорганосилоксановых порошков, в силоксановой цепи которых содержится химически связанный гадолиний с высокой концентрацией атомов гадолиния в олигомерном объеме.

Совместная механодеградация металлоолигомерного наполнителя и термопластичной полиалканимидной матрицы позволила заметно улучшить технологические и эксплуатационные характеристики разработанного композита за счет образования при механоактивации активных химических центров различной природы и физико-химического взаимодействия фаз.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать разработанный композиционный материал на основе наполненной полиметилсилеканатом гадолиния полиалканимидной матрицы в качестве нейтронно-защитного материала для транспортных упаковочных комплектов отработанного ядерного топлива.

Работа выполнена в рамках реализации проектной части государственного задания Минобрнауки РФ № 11.2034.2014/К и гранта РФФИ №14-41-08067.

Литература

1. Вопросы утилизации АПЛ. 2010, Бюл. №1 (12), 97 с.
2. Григорьев А. История и состояние системы обращения с ОЯТ и РАО на Северо-Западе Российской Федерации. Доклад на семинаре КЭГ “Обращение с РАО ядерного наследия перед захоронением: переработка, кондиционирование и хранение”, 2011, Херингсдорф –

Остров Узедом, Германия. М.: ООО “Риф-Терминал”, 2011, 96 с.

3. Кашка М.М. Комплексная утилизация плавучей технической базы “Лепсе”. Доклад на семинаре КЭГ “Утилизация судов атомного технологического обслуживания и надводных кораблей ядерными энергоустановками”, 2005, Мурманск, Россия. URL: www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/documents/ws052005_11R.pdf, 2005.
4. Программа ANISN. Руководство пользователя. М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1981, 120 с.
5. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Едаменко О.Д. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2011, № 3, с. 113 – 116.
6. Блохина Е.В., Долбищев С.Ф., Кожаев Л.Н., Тюрин М.В., Лисин Д.А., Кладов П.В. Транспортный упаковочный комплект ТУК-137 для безопасного транспортирования ОТВС реакторов ВВЭР-1000/1200 с увеличенной массой и глубиной выгорания ядерного топлива. ФГУП “Российский Федеральный Ядерный Центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики” (ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”), 2012, 7 с.

References

1. *Voprosy utilizacii APL — NPS dismantling issues*, 2010, no. 1 (12), 97 p.
2. Grigoriev A. Istoriya i sostoyanie sistemy obrashcheniya s OYAT i RAO na Severo-Zapade Rossijskoj Federacii [Istoriya and a condition of system of the treatment of SNF and Russian joint stock company in the Northwest of the Russian Federation]. Doklad na seminare KEHG “Obrashchenie s RAO yadernogo naslediya pered zahoroneniem: pererabotka, kondicionirovanie i hranenie” — The report at KEG seminar “The address with Russian joint stock company of nuclear heritage before burial: processing, conditioning and storage”, 2011, Heringsdorf — the Island Uzed, Germany. M.: “Rif-Terminal”, 2011, 96 p.
3. Kashka M.M. Kompleksnaya utilizaciya plavuchej tekhnicheskoy bazy “Lepse” [Complex utilization of floating technical base to “Lepsa”]. Doklad na seminare KEHG “Utilizaciya sudov atomnogo tekhnologicheskogo obsluzhivaniya i nadvodnyh korablej yadernymi ehnergoustanovkami” — Report of KEG Utilization of courts of nuclear technological service and surface ships nuclear power stations, 2005, Murmansk, Russia. www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/documents/ws052005_11R.pdf, 2005.
4. Programma ANISN. Rukovodstvo pol’zovatelya [ANISN program. User’s guide]. M.: IAE of I.V. Kurchatov, 1981, 120 p.
5. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Edamenko O.D. Radiacionno-zashchitnyj kompozicionnyj material na osnove polistirolnoj matricy [Radiation protective

composite material on polystyrene matrix basis]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova — Bulletin of Belgorod state technological university named after V. G. Shukhov*, 2011, no. 3, pp. 113 – 116.

6. Blokhina Ye.V., Dolbishchev S.F., Kozhayev L.N., Tyurin M.V., Lisin D.A., Kladov P.V. *Transportnyj*

upakovochnyj komplekt TUK-137 dlya bezopasnogo transportirovaniya OTVS reaktorov VVEHR-1000/1200 s uvelichennoj massoj i glubinoj vygoraniya yadernogo topliva [Transport packing set TUK-137 for safe transportation of OTVS of VVER-1000/1200 reactors with the increased weight and depth of burning out of nuclear fuel]. Federal State unitary enterprise RFNC-VNII of Experimental Physics, 2012, 7 p.

Статья поступила в редакцию 26.01.2015 г.

Ястребинский Роман Николаевич — Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46), кандидат физико-математических наук, доцент, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: yrndo@mail.ru.

Бондаренко Геннадий Германович — Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией “Радиационная физика твердого тела”, специалист в области радиационной физики твердого тела, космического материаловедения. E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.

Павленко Вячеслав Иванович — Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46), доктор технических наук, профессор, директор Института Строительного материаловедения и техносферной безопасности, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: belpavlenko@mail.ru.

Transport packing set for radioactive waste on the basis of the radiation- protective polymeric matrix

R. N. Yastrebinskii, G. G. Bondarenko, V. I. Pavlenko

In the article possibility of use of a neutron-protective polymeric cover for transport packing sets (containers) of the fulfilled nuclear fuel has been considered. Possibility of synthesis of high-disperse hydrophobic metalloorganosiloksan powders has been achieved. In oligomerny volume of siloksan chain of the powder chemically connected gadolinium with high concentration of atoms of gadolinium was contained. On the basis of this investigation its have been developed the scientific fundamentals of modifying of both structure and properties of polymeric composites. This modifying provides the directed regulation of their supramolecular structure by injection of both plasticizing and modifying additives. Settlement and experimental investigations of neutron-protective properties of the developed polymeric composite were conducted.

Keywords: transport packing set, neutron protection, polymeric composite, organosilikonat gadolinium, polialkanimidny matrix, receiving, properties

Yastrebinskii Roman — Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, Kostyukov St., 46), Ph.D. E-mail: yrndo@mail.ru.

Bondarenko Gennady — National Research University Higher School of Economics (101000, Moscow, Myasnitskaya St., 20), Dr.Sci. (Phys-Math), professor. E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.

Pavlenko Vyacheslav — Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, Kostyukov St., 46), Dr.Sci. (Eng), professor. E-mail: belpavlenko@mail.ru.