

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ РАСТВОРОВ

Ю. А. Похитонов

АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 20 марта 2019 г.

В статье приведен обзор литературных данных по опыту использования полимерных материалов в технологии обращения с жидкими радиоактивными отходами. Представлены данные по использованию полимерных материалов фирмы «Ночар» («Nochar») и результаты экспериментов, проведенных в АО «Радиевый институт». Главным достоинством полимеров является возможность проводить процесс иммобилизации непосредственно в емкостях и в случаях возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), методы обращения с жидкими радиоактивными отходами, иммобилизация ЖРО, полимерные материалы.

Введение

В процессе развития ядерной энергетики важной задачей была и остается проблема безопасного обращения с радиоактивными отходами (РАО). Любые сценарии этого процесса должны учитывать необходимость сокращения объемов РАО и, как следствие, снижения затрат при их захоронении. Среди многочисленных видов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) наиболее значимыми являются отходы, которые образуются:

- при производстве электроэнергии на АЭС и при переработке отработавшего ядерного топлива;
- при эксплуатации и снятии с эксплуатации предприятий ядерного топливного цикла, кораблей военно-морского и гражданского флотов с ядерными энергетическими установками.

Примем как аксиому, что конечной целью обращения с любой категорией отходов (не только радиоактивных) является максимальное

сокращение объемов, подлежащих специальному хранению, с одновременной минимизацией выхода загрязняющих компонентов в окружающую среду. С этой точки зрения наиболее серьезную проблему представляет обращение именно с жидкими радиоактивными отходами, объем и общая активность которых значительно превосходят объем твердых отходов, а мобильность биологически опасных компонентов несет наибольшую угрозу в случае несанкционированного контакта с экосистемой.

Первые работы, посвященные использованию полимерных материалов для иммобилизации РАО, были опубликованы 30–40 лет назад. Но после внедрения в промышленном масштабе процессов цементирования и остекловывания, интерес к полимерным материалам резко снизился. Тем не менее с появлением на рынке новых продуктов, в том числе полимерных

материалов фирмы «Ночар» (США), был проведен ряд успешных исследований по отверждению ЖРО различного состава.

Главным преимуществом полимерных материалов является возможность их использования без предварительной подготовки перерабатываемых отходов. Среди других преимуществ следует отметить простоту реализации процесса, что позволяет осуществлять иммобилизацию ЖРО с помощью полимеров при возникновении аварийных разливов.

Опыт использования полимерных материалов для отверждения ЖРО

Как уже было отмечено, успешное внедрение в промышленном масштабе цементирования при переработке ЖРО категорий НАО и САО явилось главной причиной ослабленного внимания к полимерным материалам. Что касается отходов категорий ВАО, то здесь доминирующую позицию заняла технология остекловывания, успешно внедренная на радиохимических заводах по переработке топлива АЭС.

За последние десятилетия резко возросли и требования к материалам, используемым для захоронения отходов. Вполне очевидно, что любые органические полимерные материалы во многом уступают стеклу и даже цементу по таким показателям, как химическая и радиационная устойчивость.

В связи с вышесказанным возникает очевидный вопрос: надо ли рассматривать полимерные материалы только как страницу истории или эти материалы все же могут на определенном этапе конкурировать с известными, хорошо освоенными технологиями.

Использование полимерных композиций в технологии переработки отходов впервые было подробно описано в техническом обзоре МАГАТЭ [1].

На самых ранних стадиях развития данного направления было предложено использовать ряд композиций на основе эпоксидных смол, полиэтилена, стирол дивинилбензола и метилметакрилата [1].

В Центре ядерных исследований в Кадараше для изоляции отработанных ионообменных смол и концентратов с испарительных установок применялся так называемый СЕА-процесс [1, 2] с использованием эпоксидной смолы с диамино-дифенол-метаном в качестве отвердителя.

Эпоксидные смолы редко используются поодиночке, поскольку необходимость обеспечения нужных свойств, как правило, требует введения нескольких добавок. Отвердители, необходимые

для получения термореактивных составов, должны тщательно подбираться, так как они могут существенно повлиять на свойства продукта и скорость отверждения.

Целый ряд технологических процессов иммобилизации радиоактивных отходов был разработан с использованием полиэфирных смол [3–5]. Основными ингредиентами ненасыщенных полиэфирных смол являются линейная полиэфирная смола, мономер, образующий поперечные связи, и ингибиторы (гидрохинон, хинон и т-бутил катехин), которые замедляют процесс образования поперечных связей во время транспортировки и хранения. К обычным мономерам, образующим поперечные связи, относятся стирол, винил толуол, метилметакрилат, альфа-метилстирол и диаллилфталат. Полиэфирные полимеры могут обладать широким диапазоном физических свойств. Полимеры могут быть хрупкими и жесткими, твердыми или мягкими и пластичными.

Процесс иммобилизации радиоактивных отходов (сточных вод) с полимерами был разработан канадской компанией «Онтарио Гидро» и заключался в формировании водомасляной эмульсии сточных вод с полимером. Эмульсия отверждается с помощью комбинаций катализаторов и активаторов. При этом образуется дисперсная система, состоящая из сферических частиц жидкости (в виде мелких капель), в сплошной матрице затвердевшего связующего [5]. Данный процесс иммобилизации был выбран как один из способов обработки отходов на ряде атомных станций [1, 6].

В качестве другого полимерного материала использовалась мочевиноформальдегидная смола (МФ-смола), представляющая собой водную эмульсию мочевины и формальдегида, которая полностью смешивается с водой, но не смешивается с неполярными растворителями. При добавлении катализатора происходит образование поперечных связей благодаря процессу конденсации. В процессе полимеризации полимерная матрица захватывает побочную воду. При использовании МФ-смолы в процессе отверждения ЖРО необходимо корректировать значение величины рН смеси водного раствора и полимера до значений 1–2 путем добавления катализатора в виде слабой кислоты или кислой соли (фосфорная кислота, бисульфат натрия).

МФ-смолы не вступают в химические реакции с отходами: они полимеризуются в микроструктуру, подобную сотовым ячейкам, в пустотах которых и изолируются отходы, поэтому объем полученного продукта представляет собой сумму объемов отходов и смолы. МФ-смолы могут

быть использованы для изоляции различных РАО (обезвоженных осадков с фильтров или отработанных ионообменных материалов установок деминерализации) [1, 7].

В России для иммобилизации жидких радиоактивных отходов было предложено использовать органо-кремниевый эластомер, так называемый ЭКОР [8]. По своим свойствам ЭКОР отличается от других известных эластомеров и может быть получен в двух модификациях (пенного эластомера и твердого компаунда), но примеров применения полимерных материалов для переработки ЖРО АЭС в отечественной практике нами не найдено.

Сравнительно недавно был разработан новый класс полимерных материалов, которые выпускаются компанией «Ночар» в США. Позднее были проведены испытания высокотехнологичных полимеров третьего поколения с целью отверждения ЖРО [9]. На первом этапе программа работ была сфокусирована главным образом на маслах, загрязненных тритием [10]. Многие марки полимерных материалов компании «Ночар» были испытаны с целью иммобилизации различных типов ЖРО, в том числе и реальных РАО [11–14].

Результаты экспериментов, проведенных в АО «Радиевый институт»

Радиевый институт и американская компания «Pacific World Trade» начали исследования по использованию полимеров для отверждения ЖРО различных типов более 15 лет назад.

В ходе экспериментальных исследований мы рассчитывали получить ответы на два простых вопроса:

1. Действительно ли полимеры, предлагаемые фирмой «Ночар», обладают настолько большой универсальностью, что их можно использовать для отверждения любых по составу водных растворов.

2. Важно было установить, как поведут себя уже отвержденные продукты при дальнейшей выдержке на воздухе (сушке) и при контакте с водой.

Ассортимент растворов, использованных в опытах, был достаточно широким: от щелочных растворов до концентрированных растворов азотной кислоты, в том числе и с высоким содержанием. При проведении экспериментов в работе использовали полимер № 960 и смеси полимеров № 960 и № 910 (если в растворах присутствовали органические примеси). Результаты экспериментов, полученные с использованием модельных растворов, прошли

проверку на реальных продуктах. Для проведения опытов были использованы отходы цеха дезактивации и отходы из рабочих помещений Радиевого института. Далеко не полный перечень отходов, которые были использованы в экспериментах, и их удельная активность представлены в табл. 1. Внешний вид образцов после отверждения представлен на рис. 1, 2.

Таблица 1. Перечень отходов, которые были использованы в экспериментах

Наименование продукта	Удельная активность, МБк/л
Водный раствор (кубовый остаток) из выпарного аппарата	$A_{\Sigma\alpha} - 2,5, A_{\Sigma\beta} - 73$
Водный раствор из выпарного аппарата	$A_{\Sigma\alpha} - 0,075, A_{\Sigma\beta} - 11$
Донный осадок из бака-накопителя ЖРО	$A_{\Sigma\alpha} - 6,6, A_{\Sigma\beta} - 11$
Отработанный жидкий сцинтиллятор (ЖС-8), содержащий воду с тритием	Анализ не проводился
Перлитная пульпа	$A_{\Sigma\beta} - 0,011$
Органические сливы (содержание водной фазы от 3 до 10 %)	$A_{\Sigma\beta} - 3,6$
Кислотные сливы, концентрация HNO_3 2–3 моль/л	$A_{\Sigma\beta} - 0,4$
Нейтрализованный сильнозасоленный раствор, (концентрация солей более 100 г/л)	Анализ не проводился

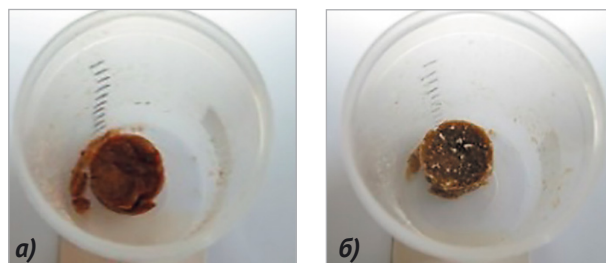


Рис. 1. Внешний вид образцов после отверждения кубового остатка из выпарного аппарата: а) использовался полимер № 960, отношение массы полимера к массе жидкости (Т:Ж) 1:5; б) использовалась смесь полимеров (№ 960 90%, № 910 10%), отношение Т:Ж:1:5.

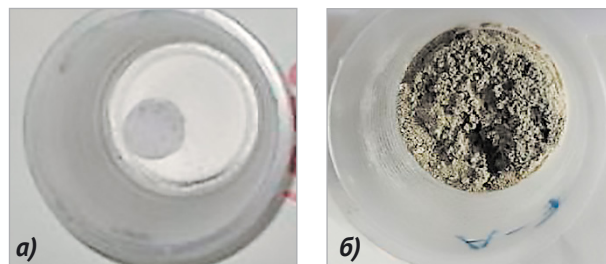


Рис. 2. Внешний вид образцов после отверждения растворов (полимер № 960) с добавкой кремнезоля (а) и цеолита (б); отношение Т:Ж:1:5

Во всех экспериментах отверждение прошло успешно и был сделан вывод, что, действительно, процессу отверждения с использованием указанных полимеров не мешают высокая кислотность и концентрация солей в растворе.

Отметим, что отверждение жидких отходов можно проводить с добавками пористых материалов и сорбентов (шлак, песок, пемза, туф и другие) [15]. Внешний вид двух образцов после отверждения модельного раствора представлен на рис. 2.

На рисунке видно, что при добавлении кремнезоля удаление влаги проходило равномерно, без разрушения образца. Плотность полученной таблетки составила 1,19 г/см³.

При попытке определить химическую устойчивость полученных продуктов мы столкнулись с серьезной проблемой — отвержденные (высушенные) образцы снова поглощали воду.

Были проведены эксперименты, в которых мы попытались добиться увеличения химической устойчивости отвержденных материалов, для чего использовали смесь полимера и цемента в разных соотношениях, но эти опыты закончились неудачей.

Таким образом, одновременно с рядом достоинств, полимерные материалы не позволяют получить продукт, соответствующий требованиям, предъявляемым при подготовке отходов к долговременному хранению и (или) захоронению.

Для окончательной изоляции отвержденных продуктов были проведены эксперименты,

лимитирующие процесс цементирования твердых отходов на ЛСК «Радон». Полимер № 960 и ЖРО смешивались в соотношении 1:10. (Состав ЖРО: $A_{\Sigma\alpha} = 3,6 \cdot 10^5$ Бк/л, $A_{\Sigma\beta} = 9,5 \cdot 10^6$ Бк/л, $c/o = 59$ г/л, $pH = 12,6$, $XPK = 160$ мгО/л.) Отвержденный компаунд герметизировали в полиэтилене и заливали раствором цемента. После 5-дневной выдержки монолит помещали в емкость с водой и проводили измерение активности выщелата. Скорость выщелачивания ¹³⁷Cs из образцов составила $2,6 \cdot 10^{-8} - 3,7 \cdot 10^{-9}$ г/см²-сут, что на несколько порядков ниже требования ГОСТ Р 51883-2002.

В ходе экспериментов проводился контроль изменения массы отвержденных образцов в процессе выдержки на воздухе. Исследование процессов обезвоживания (сушки) отвержденных отходов представляет интерес по двум причинам. Во-первых, необходимо ясно представлять, что же за материал (с какой влажностью) будет получен, а во-вторых, какие меры следует предпринять для его окончательной изоляции.

Вместе с тем, если в процессе сушки происходит сокращение массы твердых отходов, почему тогда нельзя повторять операции отверждения следующих порций ЖРО и таким образом сократить объем твердых отходов, направляемых в хранилище?

Условия проведения экспериментов по сокращению массы ЖРО путем добавления новой порции раствора к уже отвержденной и высушенной композиции представлены в табл. 2.

Таблица 2. Фактор концентрирования при повторном добавлении новой порции раствора [15]

№ цикла (операция отверждения и сушки на воздухе)	Объем раствора и соотношение Т:Ж при отверждении	Потеря массы образца после отверждения и сушки на воздухе, %		Достигнутый фактор концентрирования по отношению к исходному объему раствора
		через 10 дней	через 56 дней	
Полимер № 960				
1-й цикл	Объем раствора 50 мл, масса полимера 10 г (Т:Ж=1:5)	43,7	93,2	≈ 5,0
2-й цикл		35,0	64,0	≈ 10,0
Смесь полимеров № 960 (95%) и № 910 (5%)				
1-й цикл	Объем раствора 50 мл, масса полимера 10 г (Т:Ж=1:5)	43,6	93,0	≈ 5,0
2-й цикл		33,4	61,9	≈ 10,0

Количество операций по включению растворов, относящихся к НАО и САО может быть достаточно большим. Лимитирующими факторами, определяющими максимальный объем раствора, который можно включить в полимер, являются только их солесодержание и активность.

Экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии обусловлен сокращением объема отходов, поступающих в хранилище, и снижением стоимости их перевозки [16].

В ходе проведенных исследований были поставлены опыты по определению уноса радиоактивных аэрозолей в процессе сушки отвержденных образцов. В стакан помещали навеску полимера, заливали порцию раствора ($A_{уд.\beta} = 1,5 \cdot 10^8$ Бк/л; $A_{уд.\alpha} = 1,3 \cdot 10^6$ Бк/л, солесодержание 27,0 г/л) и закрывали фильтром. Через 1, 3, 7, 15, 30 суток проводилось взвешивание и анализировали бета- и альфа-активность фильтра. Степень уноса определяли в процентном

отношении к исходному содержанию радионуклидов в порции ЖРО, взятой на отверждение. Как показали результаты экспериментов, присутствие полимера позволяет значительно снизить концентрацию радиоактивных аэрозолей в воздухе. Уносы составили (в % от исходной активности в образце): $1,3 \cdot 10^{-4}$ – $1,5 \cdot 10^{-5}$ альфа-активных радионуклидов; $5,0 \cdot 10^{-4}$ – $6,4 \cdot 10^{-6}$ бета-активных, уносы ^{241}Am составили не более $8,9 \cdot 10^{-3}\%$.

Поскольку многие результаты оказались на уровне погрешности измерений, решили поставить эксперименты по определению уноса аэрозолей не путем анализа фильтров, а прямым определением активности конденсата паровой фазы, который выделяется из отвержденных образцов в процессе сушки. Высушивание отвержденного образца проводилось при температуре 95°C . Реальный раствор имел следующие характеристики: суммарная α -активность — $5,7 \cdot 10^6$ Бк/л, β -активность — $4,5 \cdot 10^6$ Бк/л, значение pH — 9,9, содержание солей около 100 г/л.

Эксперимент проводили 9 дней, и во всех отобранных пробах активность была не выше предела чувствительности определения: ^{137}Cs — 0,5 Бк/л и ^{241}Am — 2,8 Бк/л.

Здесь следует указать на одно перспективное направление использования полимерных материалов. Речь идет о применении полимерных материалов как одного из средств, используемых при ликвидации аварийных ситуаций, когда возникает необходимость снизить содержание радиоактивных аэрозолей в воздухе и предотвратить их распространение в помещениях и окружающей среде [17]. По нашему мнению, данное направление требует очень внимательного и взвешенного подхода и заслуживает отдельного рассмотрения.

Предлагаемые материалы и технологии могут использоваться и на этапе вывода АЭС из эксплуатации, когда штатные системы для переработки ЖРО (например, выпарные аппараты) уже не будут функционировать. В этом случае представляется перспективным использование полимерных материалов в качестве средства для отверждения вторичных ЖРО.

В завершение следует отметить, что использование полимеров не ограничивается их применением исключительно в атомной промышленности. Возможность отверждения растворов разного состава, включая водно-органические и различные типы осадков, позволяет использовать их в процессах переработки химических (нерадиоактивных) отходов.

Сегодня довольно трудно предсказать все возможные сферы использования полимерных

материалов в будущем, но можно предположить, что возможность переработки промышленных отходов (включая отходы гальванического производства, высокотоксичные вещества и многие другие) может сыграть весьма важную роль в решении проблемы контроля и защиты окружающей среды.

Заключение

Во многих научных центрах ведутся работы по поиску материалов, пригодных в качестве матрицы для включения в них ЖРО с целью длительного контролируемого хранения и/или захоронения. Тем не менее использование какой-то одной технологии не может решить все проблемы, связанные с переработкой любых видов ЖРО, образующихся на различных объектах. Именно поэтому нельзя забывать о преимуществах полимеров, которые могут быть успешно использованы в тех случаях, когда традиционные технологии оказываются менее эффективными и более затратными.

Переработка жидких отходов путем изоляции внутри полимерной матрицы дает возможность избежать хранения жидких опасных продуктов на различных объектах. Предлагаемая технология не требует специального оборудования или подачи энергии.

Направление дальнейших работ должно быть связано с получением химически стойких компаундов, пригодных для захоронения и не требующих мер по их дополнительной изоляции.

Благодарность

Автор выражает признательность сотрудникам Института ядерной физики Леонову В. В., Капустину В. К. и сотрудникам Радиевого института Аляпышеву М. Ю. и Бабаину В. А. за помощь в проведении работы и подготовке публикации.

Литература

1. Management of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes with Polymers. Technical report series No. 289. International Atomic Energy Agency, Vienna (1988).
2. Tassigny C. et al. Decisive progress in thermosetting resin embedding // Paper presented at ANS Winter Meeting, Washington, DC, 11–16 Nov. 1984.
3. Moreno A. et al. Immobilization of low and medium level radioactive wastes in polyester resins // Paper presented at IAEA Technical Committee Meeting on Immobilization of Low and Intermediate Level

Radioactive Wastes with Polymers, Rome, 14–18 April 1986.

4. Mixed Waste Encapsulation in Polyester Resins. Treatment for Mixed Wastes Containing Salts. OST Reference #1685. Mixed Waste Focus Area. Prepared for U.S. Department of Energy, office of environmental management, office of science and technology. September 1999.

5. *Williamson A. S., Husain A.* A plant for immobilizing low-level aqueous waste in water extendible polymer // Paper presented at ANS Int. Top. Mtg Niagara Falls, NY, Sep. 1986.

6. *Haller P. et al.* Experience d'exploitation industrielle du poste d'enrobage des déchets radioactifs dans les résines thermodurcissables & la Centrale nucléaire des Ardennes // Conditioning of Radioactive Wastes for Storage and Disposal (Proc. Symp. Utrecht, 1982), IAEA, Vienna (1983) 101.

7. *Colombo P., Neilson R. M. Jr.* Critical Review of the Properties of Solidified Radioactive Waste Packages Generated by Nuclear Power Reactors. Rep. BNL-NUREG-50591, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, and Brookhaven National Laboratory, Upton, NY (1976).

8. *Беляев С. Т., Швецов И. К., Калиниченко Б. С. и др.* Новый материал для обращения с радиоактивными отходами // Радиохимия–2006: тезисы докл. пятой Росс. конф. по радиохимии. 23–27 октября 2006, Дубна. 352 с.

9. Nochar Petrobond Absorbent Polymer, Tritiated Oil Solidification. Innovative Technology Summary Report, DOE/EM-0598, U.S. Department of Energy, September, 2001.

10. Deployment of Nochar Petrobond Technology to Solidify TRU Oil at Rocky Flats. Rocky Flats, Colorado, Environmental Technology Site,

PRO-1582-POP/PQP, United States Department of Energy, Office of Environmental Management, October 23, 2001.

11. *Kelley D., Cambell D., Pokhitonov Yu., et al.* Innovative Technology for Liquid Radwaste Treatment for Use in Newly Designed Applications // 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM'05, 4–8 September, 2005, Glasgow, Scotland, UK.

12. *Kelley D., Campbell D.* Proven Technologies for the Treatment of Complex Radioactive Liquid Waste Streams; U.S. Department of Energy and International Case Studies // 29th International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management MRS, 2005.

13. *Liangin B., Meiqiong L., Kelley D.* China's Scientific Investigation for Liquid Waste Treatment Solutions // 15th Pacific Basin Nuclear Conference, 15–20 October, 2006, Sydney, Australia.

14. *Romanovsky V., Pokhitonov Yu., Kelley D.* Prospects on Immobilization of Liquid Organic Radwaste with the Use of High Technology Polymers // Proceedings of Waste Management Conference, March 2–6, 2014, Phoenix, Arizona, USA.

15. *Pokhitonov Yu., Kelley D.* The Polymers for LLW Solidification: A Lost Chapter in the History of Engineering or a Step Forward? // Proceedings of Waste Management Conference, Feb 24–28, 2013, Phoenix, Arizona, USA.

16. *Похитонов Ю. А., Келли Д.* Способ иммобилизации жидких радиоактивных отходов: Патент РФ № 2518501. 2014. Бюл. № 16.

17. *Похитонов Ю. А., Чугунов А. С., Белозуб А. Н., Келли Д.* Способ ликвидации аварии при разливе радиоактивных растворов: Патент РФ № 2632924. 2017. Бюл. № 15.

Информация об авторах

Похитонов Юрий Алексеевич, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Радиовый институт имени В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28), e-mail: yropkh@khlopin.ru.

Библиографическое описание статьи

Похитонов Ю. А. Перспективы использования полимерных материалов для переработки жидких радиоактивных растворов // Радиоактивные отходы. 2019. № 3(8). С. 53–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-53-60.

PERSPECTIVES OF USING POLYMER MATERIALS FOR LIQUID RADIOACTIVE SOLUTIONS TREATMENT PURPOSES

Pokhitonov Yu. A.

V. G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg, Russia

Article received on March 20, 2019

The article provides an overview of published data on the use of polymer materials for liquid radioactive waste management purposes. It presents the data on the use of polymer materials by Nochar company and the results of experiments carried out in V.G. Khlopin Radium Institute. The possibility for waste immobilization directly in the containers and in emergency cases is seen as the main advantage of Nochar's polymer materials.

Keywords: liquid radioactive waste (LRW), liquid radioactive waste handling techniques, LRW immobilization, polymer materials.

Acknowledgments

The author is grateful to the staff of The Institute of Nuclear Physics, Leonov V. V., Kapustin V. K., and the staff of the Radium Institute Alyapyshev M. Yu. and Babain V. A. for the work assistance and the paper preparation.

References

1. Management of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes with Polymers. *Technical report series No. 289*. International Atomic Energy Agency, Vienna (1988).
2. Tassigny C. et al. Decisive progress in thermosetting resin embedding. Paper presented at *ANS Winter Meeting*, Washington, DC, 11–16 Nov. 1984.
3. Moreno A. et al. Immobilization of low and medium level radioactive wastes in polyester resins. Paper presented at *IAEA Technical Committee Meeting on Immobilization of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes with Polymers*, Rome, 14–18 April 1986.
4. Mixed Waste Encapsulation in Polyester Resins. Treatment for Mixed Wastes Containing Salts. OST Reference #1685. Mixed Waste Focus Area. Prepared for U.S. Department of Energy, office of environmental management, office of science and technology. September 1999.
5. Williamson A. S., Husain A. A plant for immobilizing low-level aqueous waste in water extendible polymer. Paper presented at *ANS Int. Top. Mtg Niagara Falls*, NY, Sep. 1986.
6. Haller P. et al. Experience d'exploitation industrielle du poste d'enrobage des déchets radioactifs dans les résines thermodurcissables & la Centrale nucléaire des Ardennes. *Conditioning of Radioactive Wastes for Storage and Disposal* (Proc. Symp. Utrecht, 1982), IAEA, Vienna (1983) 101.
7. Colombo P., Neilson R. M. Jr. Critical Review of the Properties of Solidified Radioactive Waste Packages Generated by Nuclear Power Reactors. *Rep. BNL-NUREG-50591*, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, and Brookhaven National Laboratory, Upton, NY (1976).
8. Belyaev S. T., Shvetsov Y. K., Kalinichenko B. S. i dr. Novyy material dlya obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami [New material for radioactive waste management]. *Tezisy dokladov. Pyataya Rossiyskaya konferentsiya po radiokhimi "Radiokhimiya" — 2006* [Proc. 5th Ros. Conf. "Radiochemistry" — 2006].
9. Nochar Petrobond Absorbent Polymer, Tritiated Oil Solidification. *Innovative Technology Summary Report*, DOE/EM-0598, U.S. Department of Energy, September, 2001.
10. *Deployment of Nochar Petrobond Technology to Solidify TRU Oil at Rocky Flats*. Rocky Flats, Colorado, Environmental Technology Site, PRO-1582-POP/PQP, United States Department of Energy, Office of Environmental Management, October 23, 2001.
11. Kelley D., Cambell D., Pokhitonov Yu., et al. Innovative Technology for Liquid Radwaste Treatment for Use in Newly Designed Applications. *10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM'05*, 4–8 September, 2005, Glasgow, Scotland, UK.
12. Kelley D., Campbell D. Proven Technologies for the Treatment of Complex Radioactive Liquid Waste Streams; U.S. Department of Energy and International Case Studies. *29th International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management MRS*, 2005.

13. Liangin B., Meiqiong L., Kelley D. China's Scientific Investigation for Liquid Waste Treatment Solutions. *15th Pacific Basin Nuclear Conference*, 15–20 October, 2006, Sydney, Australia.
14. Romanovsky V., Pokhitonov Yu., Kelley D. Prospects on Immobilization of Liquid Organic Radwaste with the Use of High Technology Polymers. *Proceedings of Waste Management Conference*, March 2–6, 2014, Phoenix, Arizona, USA.
15. Pokhitonov Yu., Kelley D. The Polymers for LLW Solidification: A Lost Chapter in the History of Engineering or a Step Forward? *Proceedings of Waste Management Conference*, Feb 24–28, 2013, Phoenix, Arizona, USA.
16. Pokhitonov Yu. A., Kelli D. Sposob immobilizatsii zhidkih radioaktivnykh othodov [Conditioning of liquid radioactive wastes]. *Patent RF*, no. 2518501, 2014. Bull. 16.
17. Pokhitonov Yu., Chugunov A. S., Belozub A. N., Kelli D. Sposob likvidatsii avarii pri razlive radioaktivnykh rastvorov [Method of liquidation of accident at spill of radioactive solutions]. *Patent RF*, no. 2632924, 2017. Bull. 15.

Information about the authors

Pokhitonov Yuri Alekseevich, Ph.D., Leading Researcher Fellow, V. G. Khlopin Radium Institute (28, 2nd Murinsky Ave., St. Petersburg, 194021, Russia), e-mail: ypokh@khlopin.ru.

Bibliographic description

Pokhitonov Yu. A. Perspectives of Using Polymer Materials for Liquid Radioactive Solutions Treatment Purposes. *Radioactive Waste*, 2019, no. 3 (8), pp. 53–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-53-60. (In Russian).