

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Российский химико-технологический  
университет имени Д. И. Менделеева»**

*На правах рукописи*

**Осташкина Елизавета Евгеньевна**

**НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ОТРАБОТАВШИХ ИОНООБМЕННЫХ  
СМОЛ МЕТОДОМ ВКЛЮЧЕНИЯ В ПОЛИМЕРНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ**

2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва,  
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды» (ФГУП «РАДОН»)

Научный руководитель: доктор технических наук  
**Савкин Александр Евгеньевич**, ведущий инженер-технолог производственно-технического отдела научно-производственного комплекса – Сергиево-Посадского филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды»

Официальные оппоненты: доктор биологических наук  
**Лашенцова Татьяна Николаевна**, ведущий научный сотрудник лаборатории радиометрических и спектрометрических исследований человека и окружающей среды федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства

кандидат химических наук  
**Виданов Виталий Львович**, старший научный сотрудник отдела «Радиохимические технологии и РАО» акционерного общества «ПРОРЫВ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук

Защита состоится «04» июня 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета РХТУ 2.6.04 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125480 г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, корп. 1) в конференц-зале имени академика В.А. Легасова ИМСЭН-ИФХ.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре и на сайте [https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse\\_announcements/](https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
РХТУ 2.6.04. кандидат технических наук

М.А. Варганян

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

На предприятиях отечественной атомной отрасли (атомных станциях, судоремонтных заводах и др.) накоплено большое количество техногенных вторичных радиоактивных отходов (РАО) в виде отработавших ионообменных смол (ОИОС).

Сложности обращения с ОИОС обусловлены их сыпучестью и способностью к рассеянию; транспортировка ОИОС по трубопроводам возможна только в виде пульпы в смеси с транспортной водой. При увлажнении осушенные ОИОС набухают, что может повлиять на безопасность их хранения. Более 70 % ОИОС относится к среднеактивным РАО.

Промышленные методы обращения с ОИОС в России на данный момент не применяются по причине недостаточной технологической готовности и ограничиваются переработкой в небольших количествах на опытных установках. Поиск оптимальных способов утилизации ОИОС является общемировой проблемой. Основным критерием выбора промышленного метода является возможность кондиционирования реальных ОИОС, гетерогенных по типу и характеристикам, наибольший объем которых накоплен на АЭС. Решение этих проблем является необходимой, важной и актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования**

Применяемые в мире промышленные технологии обращения с ОИОС можно разделить на две основные группы – деструктивной переработки и иммобилизации. Недостатки термических деструктивных методов - образование агрессивных газов и большой унос радионуклидов с увеличением нагрузки на газоочистную систему; химические деструктивные методы энергоемки и требуют высокой прочности и герметичности оборудования. Деструкция ОИОС приводит к существенному уменьшению их объема и увеличению удельной активности конечного продукта до превышения уровня требований к сертифицированной упаковке.

В атомной отрасли России развиваются методы иммобилизации с фиксацией радионуклидов в цементную, битумную и полимерную матрицу. Исследования ведутся в направлении повышения процента включения ОИОС, химической и радиационной стойкости конечного продукта. Цементный компаунд обеспечивает надежную иммобилизацию ОИОС. Решение существующей проблемы цементирования

мелкодисперсных ТРО, в том числе ОИОС, демонстрирует запатентованный метод пропитки. Увеличение процента включения ОИОС за счет улучшения реологических характеристик цемента различными добавками изучали в России во ФГУП ПО «Маяк», во Франции, в Канаде, но включение ОИОС в цемент не превышало 20 масс %. Также цементные компаунды могут разрушаться микроорганизмами при хранении. Битумная матрица имеет более высокую степень включения ОИОС, но легкоплавка, пожароопасна и способна к биодеструкции при хранении.

По результатам исследований, наиболее надежным матричным материалом для фиксации ОИОС является полимерный компаунд. Композиции на основе эпоксидных смол радиационно стойки, а модификация добавками снижает их вязкость и замедляет отверждение (желатинизацию).

Промышленное кондиционирование ОИОС в разных странах реализуется методами смешения и пропитки эпоксидными смолами. Технология смешения реализована в установке компании SEA/Technicatome, Франция. Пропитка ОИОС полимерным связующим применяется фирмой DTS, США и проводится непосредственно в контейнере в смешанном виде с помощью патрубка.

Проблемы с технологией связаны в основном с неравномерностью распределения полимерного связующего в контейнере с ОИОС и отсутствием оборудования для точного дозирования и равномерной подачи, что приводит к неоднородности и ухудшению характеристик конечного продукта.

В России (ФГУП «РАДОН») разработана технология включения ОИОС в полимерное связующее на основе эпоксидных смол, решающая перечисленные проблемы. Создана опытно-промышленная установка, конструкция и принцип действия которой обеспечивают однородность получаемой матрицы, точность дозирования ее компонентов и равномерность пропитки.

Для промышленного внедрения кондиционирования ОИОС методом включения в полимерное связующее необходимо провести научно-технологическое обоснование возможности усовершенствования установки с целью ее применения для кондиционирования реальных ОИОС АЭС, для чего необходимо обосновать соответствие получаемых полимерных компаундов требованиям к размещению в контейнеры для хранения в условиях пункта приповерхностного захоронения.

**Цель работы:** научно-технологическое обоснование кондиционирования ОИОС методом включения в полимерное связующее.

Для достижения этой цели были поставлены и решены **следующие задачи:**

1. Обосновать метод предварительной обработки ОИОС перед включением в полимерный компаунд.

2. Выявить изменения свойств полимерного компаунда на основе ОИОС, обеспечивающие безопасность при размещении в условиях приповерхностного хранения.

3. Обосновать отсутствие газовыделения полимерного компаунда на основе ОИОС, обезвоженных до остаточной влажности 50 - 53 масс. %.

4. Разработать схему опытно-промышленной установки для кондиционирования реальных ОИОС, на примере Калининской АЭС.

**Объектом исследования** являются отработавшие ионообменные смолы разного состава, в том числе реальные отходы с АЭС.

**Предметом исследования** являются технологические параметры контроля ОИОС и полимерных компаундов на основе ОИОС при иммобилизации: влажность, радиационная и термическая стойкость, механическая прочность, водостойчивость, отсутствие газовыделения.

### **Научная новизна**

1. Показано, что предварительная обработка ОИОС методом обезвоживания до остаточной влажности 50 - 53 масс. % позволяет получить полимерный компаунд, хранение которого безопасно в условиях приповерхностного размещения;

2. Установлено увеличение механической прочности и водостойчивости при облучении дозой до  $10^4$  Гр и циклическом температурном воздействии в диапазоне от 0 до 100 °С полимерного компаунда на основе ОИОС с предварительной обработкой методом обезвоживания до остаточной влажности 50 - 53 масс. %;

3. Установлено, что в полимерном компаунде на основе обезвоженных ОИОС с остаточной влажностью 50-53 % не происходят процессы деструкции, вызывающие газовыделение и увеличение объема.

### **Теоретическая и практическая значимость**

- показано, что полимерный компаунд с иммобилизованными ОИОС РАО 3 класса, с предобработкой методом обезвоживания до остаточной влажности

50 - 53 масс. % и удельной активностью в интервале  $10^7$  -  $10^8$  Бк/кг при размещении в пункты приповерхностного захоронения характеризуется увеличением механической прочности и химической водостойчивости за счет сшивки и доотверждения полимерного компаунда при хранении;

- установлено, что при размещении полимерного компаунда на основе обезвоженных ОИОС с остаточной влажностью 50-53 % в условиях пункта приповерхностного захоронения не происходит газовыделения и увеличения объема за счет отсутствия химических и радиационных процессов деструкции;

- показана возможность отделения мелких фракций и переработки реальных ОИОС с АЭС путем добавления технологической операции промывки ОИОС и узла отделения мелкой фракции для реализации пропитки ОИОС в контейнере полимерным связующим;

– разработаны и аттестованы методики определения характеристик полимерного компаунда МИ-206-2022 (ФР.1.28.2022.44467), МИ-207-2022 (ФР.1.28.2022.44463), МИ-208-2022 (ФР.1.28.2022.44465), МИ-209-2022 (ФР.1.38.2022.44462), позволяющие выполнить подтверждение соответствия компаунда нормативным требованиям;

– технология и установка кондиционирования адаптирована и апробирована для переработки реальных ОИОС АЭС и принята к применению на Калининской АЭС (Решение АО «Концерн «Росэнергоатом» от 06.08.2019 1.2.2.06.001.0526-2019), что позволило выполнить переработку реальных ОИОС АЭС в количестве 33,2 м<sup>3</sup>. Разработан проект привязки установки на Калининской АЭС, что позволит выполнить переработку всего объема смол, накопленных за годы ее эксплуатации.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Обоснование предварительной обработки ОИОС методом обезвоживания до остаточной влажности 50 - 53 масс. %, которое не приводит к увеличению объема полимерного компаунда при колебаниях влажности в условиях пункта приповерхностного захоронения.

2. Изменение свойств полимерного компаунда с иммобилизованными ОИОС РАО 3 класса, с предобработкой методом обезвоживания до остаточной влажности 50 - 53 масс. % и удельной активностью в интервале  $10^7$  -  $10^8$  Бк/кг в условиях хранения в пунктах приповерхностного захоронения, характеризующееся:

– увеличением механической прочности и химической водоустойчивости за счет сшивки и доотверждения полимерного компаунда;

– отсутствием газовыделения и увеличения объема за счет исключения химических и радиационных процессов деструкции.

3. Технологическое обоснование схемы опытно-промышленной установки кондиционирования реальных ОИОС на примере Калининской АЭС, которая включает узел отделения мелких фракций, узел предварительной обработки ОИОС методом обезвоживания, узел кондиционирования обезвоженных ОИОС в полимерный компаунд, узел кондиционирования мелкой фракции методом цементирования.

**Методология и методы исследования.** Методическая часть диссертации представлена описанием методов определения параметров контроля радиационной, химической и термической стойкости обезвоженных ОИОС и полимерного компаунда. Исследования физико-химических свойств РАО включали определение содержания свободной влаги, скорости выщелачивания, механической прочности, изменения объема.

Исследования химического и радионуклидного состава РАО и состава газовой фазы проводили методами альфа-, бета-, гамма-спектрометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии, пламенной фотометрии, ионной хроматографии и т.д.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью в процессе набора статистики, применением аттестованных методик измерений для определения физико-химических характеристик РАО и их радионуклидного состава, применением разработанных и аттестованных методик для определения показателей качества и критериев приемлемости полимерного компаунда, определением показателей пожароопасности полимерного компаунда в аккредитованной лаборатории.

**Личный вклад автора.** Работа представляет собой исследования, выполненные в течение 10 лет лично автором или при его непосредственном участии. Вклад автора состоял в подборе, систематизации и анализе литературных данных, планировании и проведении лабораторных экспериментов по разработке технологий обращения с ОИОС и оценке показателей качества и критериев приемлемости для захоронения получаемых упаковок полимерного компаунда, обработке, обобщении, анализе и интерпретации результатов экспериментов, подготовке материалов к публикации,

представлении полученных результатов на конференциях. При непосредственном участии автора выполнялась подготовка отчетов о НИР и НИОКР по теме исследования, разработка и доработка установки кондиционирования отработавших ионообменных смол и технической документации на нее.

**Апробация работы.** Результаты работы представлены на следующих семинарах и конференциях: Российская конференция «Радиохимия», г. Санкт-Петербург (2018 г., 2022 г.); Международная научно-практическая конференция ФГУП «РАДОН» (2019 г., 2022 г., 2023 г.); International conference on radioactive waste management. Solution for a Sustainable on future. IAEA (2021 г.); научно-технический семинар «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов», г. Санкт-Петербург (2021 г., 2022 г., 2023 г.) и др.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, из них 9 статей, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 2 – в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций и 12 работ в материалах всероссийских и международных конференций. Получено 2 патента РФ. Все работы опубликованы в соавторстве.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 118 наименований, 1 приложения. Работа изложена на 157 страницах печатного текста, включает 48 рисунков и 37 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и определены задачи работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Представлена информация о личном вкладе автора и апробации результатов.

**В первой главе** выполнен обзор мировых литературных данных по достоинствам и недостаткам методов переработки ОИОС с точки зрения сложности технологического оборудования, количества вторичных РАО и объема конечного продукта. Выводы по главе обосновывают актуальность, цель и задачи работы.

Во **второй главе** представлено описание объектов исследования, параметров и методов их контроля и используемого оборудования.

## Результаты исследования

**Выбор метода предварительной обработки** перед иммобилизацией ОИОС имеет целью удаление влаги, которая может привести к разделению фаз, негомогенности и ухудшению качества конечного продукта. Методы обработки - обезвоживание, т. е. удаление свободной жидкости до общей влажности 50-53 масс. %, и сушка, т.е. удаление свободной и связанной влаги до влажности менее 3 масс. %.

**Исследование сушки ОИОС** проводили потоком воздуха при температуре 40 - 80 °С, определяли изменение общей влажности ОИОС, время сушки (рисунок 1а) и расход нагретого воздуха. Объем ОИОС при сушке уменьшался в 1,5–2 раза (рисунок 1б).

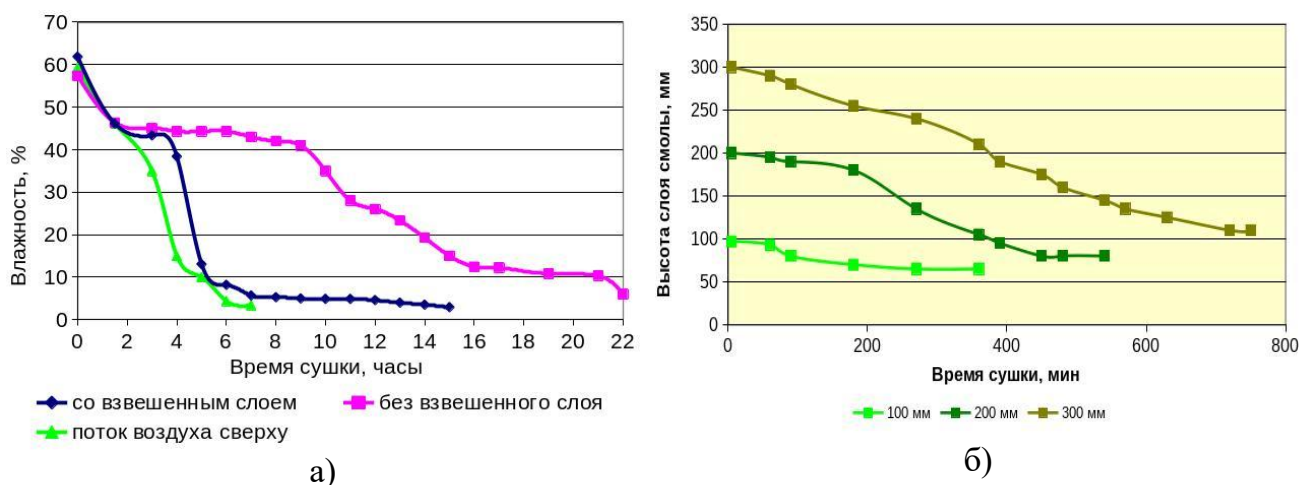


Рисунок 1 — Параметры сушки катионита потоком воздуха

а - зависимость влажности от продолжительности сушки при температуре 40 °С при различных режимах подачи воздуха и высоте слоя 100 мм;

б - уменьшение объема при температуре 80 °С и высоте слоя 100-300 мм

Время сушки пробы ОИОС в оптимальном режиме подачи воздуха сверху составило от 4,5 до 24 ч в зависимости от температуры, что говорит о низкой производительности. Расход воздуха на сушку пробы массой 200-600 г составлял 2-10 м<sup>3</sup>, что требует значительных энергозатрат на нагрев.

Водоустойчивость ОИОС, высушенных до влажности менее 10 % масс., по показателю увеличения объема может превышать 48 % (таблица 1).

Таблица 1 - Увеличение объема ОИОС при увлажнении, об. %

Добавлено воды, % от объема исходных ОИОС	Катионит		Анионит	
	Конечная влажность ОИОС, масс. %	Увеличение объема, % от исходного	Конечная влажность ОИОС, масс. %	Увеличение объема, % от исходного
15	14,6	15,2	26,9	1,5
30	25,5	21,2	42,3	1,5
45	33,9	33,3	52,3	3,0
60	40,6	48,5	59,4	12,1

При исследовании водоустойчивости ПК увеличение объема наблюдалось уже при минимальном включении высушенных ОИОС 3 класса и достигало 40,3 об. % (таблица 2).

Таблица 2 – Увеличение объема ПК с включенными сухими ОИОС при выдержке в воде, об. %

Содержание сухой ИОС в ПК, масс. %	Увеличение объема ПК, об. %	
	ПК на основе ЭС марки КДА	ПК на основе ЭС марки К-153
10	8,2	6,9
20	17,3	7,1
30	20,2	11,5
40	22,4	15,9
50	36,8	21,8
60	40,3	29,7

Образцы с включенными высушенными ОИОС в количестве 40 - 60 масс. % при выдержке в воде разрушились.

**Исследование обезвоживания ОИОС** проводили гравитационным методом и вакуумированием в течение 5-30 мин. Полное удаление свободной влаги до влажности ОИОС 50-53 масс. % не достигается при гравитационной обработке и достигается при вакуумировании в течение 30 минут, выбранном в качестве способа обезвоживания с минимальной длительностью и энергоемкостью.

Исследовали водоустойчивость, термическую и радиационную стойкость обезвоженных ОИОС по скорости выщелачивания  $Cs^{137}$ , составившей от  $3,4 \cdot 10^{-5}$  до  $2,0 \cdot 10^{-7}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), после облучения - от  $3,6 \cdot 10^{-5}$  до  $3,1 \cdot 10^{-7}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), после температурного воздействия - от  $4,9 \cdot 10^{-5}$  до  $4,0 \cdot 10^{-7}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), что соответствует требованиям НП-019-15.

ПК с обезвоженными ОИОС после выдержки в воде в течение 90 суток не имел признаков увеличения объема и разрушения (рисунок 2).

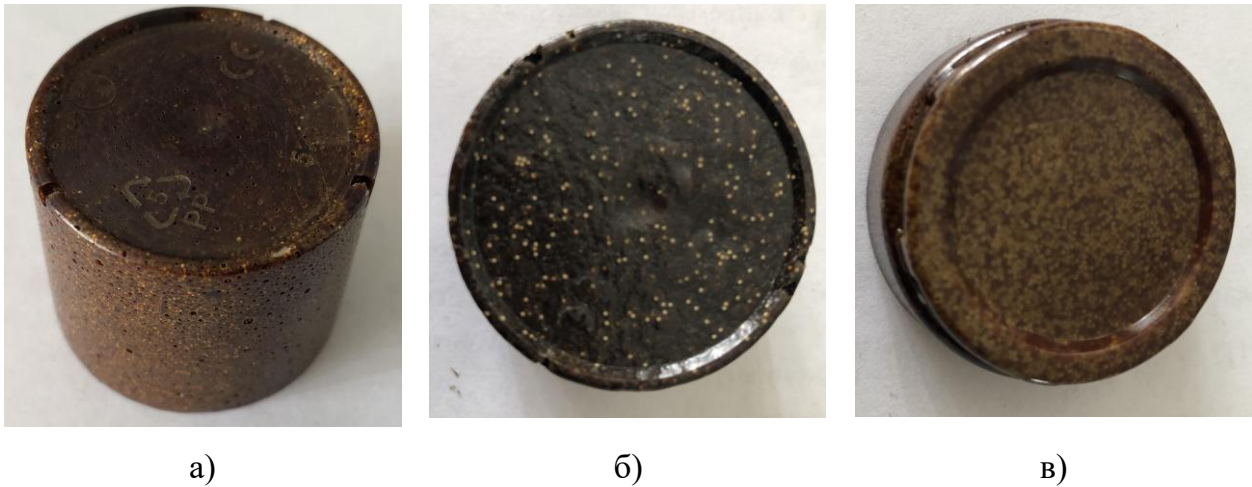


Рисунок 2 – Внешний вид образцов ПК с включенными обезвоженными ОИОС (60 масс. %) после выдержки в воде

а – образец с ОИОС СВО ФГУП «РАДОН»; б - образец с ОИОС КлнаЭС;  
в - образец с ОИОС СмаЭС

По результатам исследований обезвоживание выбрано в качестве метода предварительной обработки ОИОС перед включением в ПК.

**Выявление изменений свойств ПК на основе обезвоженных ОИОС при размещении в условиях приповерхностного хранения** проводили с использованием ПК следующего оптимального состава:

- марка ЭС – ЭТАЛ-247 SL, ОТ – ЭТАЛ-45М/ЭТАЛ 247SL;
- массовое соотношение ОТ/ЭС — 0,6-0,8;
- содержание ОИОС в компаунде, масс. % — 55-60;
- влажность обезвоженных ОИОС, масс. % — 45-55.

Для моделирования дозовых и температурных нагрузок в условиях ППЗРО образцы подвергали облучению дозой до  $10^6$  Гр и циклическому температурному воздействию в диапазоне от 0 до 100 °С.

Механическая прочность ПК превышала 18 МПа, а после термического и радиационного воздействия - 12,6 МПа, что соответствует нормативным требованиям для цементного компаунда (таблица 3).

Таблица 3 — Определение механической прочности, термической и радиационной стойкости ПК с включенными обезвоженными ОИОС 3 класса, МПа, количество образцов  $n = 10 - 18$  шт

Тип предварительного воздействия	n	Механическая прочность, МПа			
		мин.	макс.	средн.	изменение, %
Без воздействия	18	18,1	23,4	20,3	-
После термического воздействия	10	20,2	22,8	21,2	+4,3
После облучения дозой 10 кГр	18	12,9	27,5	22,7	+11,8
После облучения дозой 1 МГр	12	12,6	26,8	21,0	+3,5

При термическом воздействии и облучении среднее значение механической прочности увеличивалось, что объясняется доотверждением (сшивкой) эпоксидной основы ПК по радикальному механизму.

Исследовали водоустойчивость, термическую и радиационную стойкость ПК с обезвоженными ОИОС 3 класса по скорости выщелачивания, соответствующей нормативным значениям для  $Cs^{137}$  в первые сутки и далее и составляющей  $(7,0-1,1) \cdot 10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), после температурного воздействия —  $(7,2-0,3) \cdot 10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), после облучения —  $(4,8-0,5) \cdot 10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут). (рисунок 3).

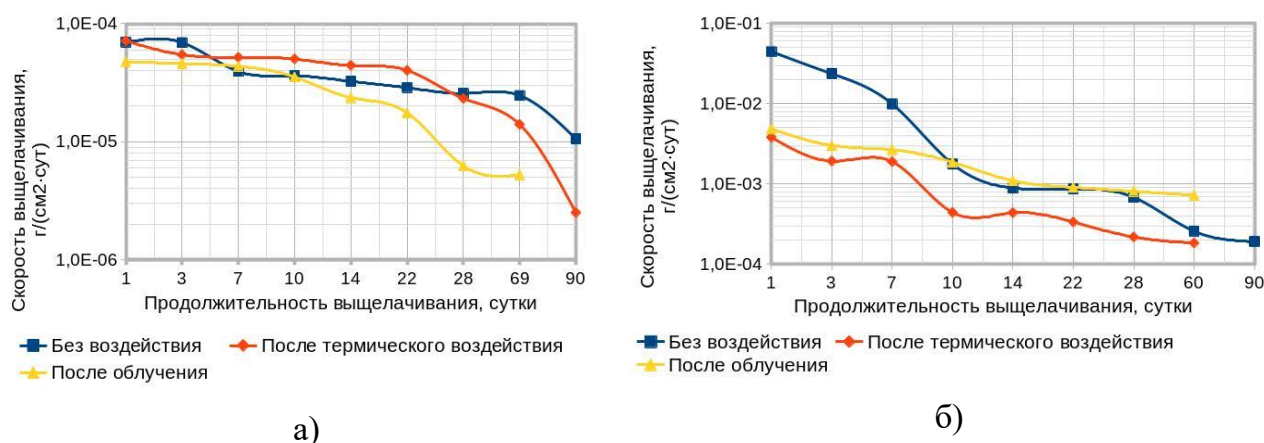


Рисунок 3 — Скорость выщелачивания радионуклидов из образцов ПК с ОИОС

КурАЭС: а —  $Cs^{137}$ ; б —  $H^3$

Скорость выщелачивания  $H^3$  достигла нормативного значения по НП-019-15 на 1-3 сутки испытания и составляла  $(9,9-0,2) \cdot 10^{-3}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), после температурного воздействия —  $(3,8-0,2) \cdot 10^{-3}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), после облучения —  $(4,8-0,7) \cdot 10^{-3}$  г/(см<sup>2</sup>·сут).

Исследовали свойства ПК после 2 лет временного хранения в условиях ППЗРО (рисунок 4) и 5-8 лет лабораторного хранения.



а)



б)

Рисунок 4 – Внешний вид образцов ПК из контейнера после 2 лет хранения в ППЗРО

а – отобранные образцы; б – поверхность ПК в контейнере после отбора образцов

После хранения в ППЗРО ПК не имел визуальных дефектов. Водоустойчивость и радиационная стойкость по скорости выщелачивания после облучения дозой 10 кГр достигла нормативного значения на 4 сутки испытаний.

После лабораторного хранения ПК сохранил соответствие требованиям НП-019-15 по механической прочности, радиационной и термической стойкости (таблица 4).

Таблица 4 – Определение механической прочности, термической и радиационной стойкости ПК после хранения в течение 5-8 лет, МПа

Включенные ОИОС	Длительность хранения, лет	Механическая прочность, МПа		
		Без предварительного воздействия	После термического воздействия	После облучения дозой 10 кГр
СВО ФГУП «РАДОН»	5	24,6	18,8	29,5
СМАЭС	8	18,6	13,2	19,7

Полученные данные говорят о сохранении структурной стабильности ПК с включенными обезвоженными ОИОС, целостности упаковок и исключении выхода радиоактивности за их пределы, т.е. о безопасности хранения при дозовых и температурных нагрузках в условиях ППЗРО.

Исследование газовыделения ПК с включенными обезвоженными ОИОС показало незначительное увеличение объема газовой фазы в первые 15 минут

твердения образцов, связанное со слабым экзотермическим эффектом (до 40 °С) и расширением воздуха. При дальнейшем твердении и хранении газообразование отсутствовало, что соответствует НП-019-15 (таблица 5).

Таблица 5 – Определение количества выделившихся газов при твердении и хранении проб ПК с включенными ОИОС КлнАЭС

Время от начала испытаний, мин	10	11	12	13	14	15	17	19	27	39	80
Общий объем газа, мл	30	40	47	54	61	68	69	70	70,5	71	71
Удельный объем газа, мл/г компаунда	0,11	0,15	0,17	0,2	0,23	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Скорость выделения газа, мл/мин	3,0	10,0	7,0	7,0	5,0	7,0	0,5	0,5	0	0	0

В газовой фазе отсутствовали вещества, ПДК которых в воздухе рабочей зоны в соответствии с СанПин 1.2.3685 превышают 1 мг/м<sup>3</sup>.

Определяли изменение объема образцов ПК при облучении, которое не превышало 5 об. % (таблица 6).

Таблица 6 — Радиационная стойкость образцов ПК с обезвоженными ОИОС, определенная по изменению объема ( $\Delta V$ , %) в результате облучения различными дозами, количество образцов n = 11 – 25 шт.

Тип ОИОС, включенных в ПК	Доза, Гр	n	Изменение объема, %		
			мин.	макс.	средн.
ОИОС КурАЭС	$1 \cdot 10^4$	25	-5,0	4,6	-0,1
ОИОС СВО	$1 \cdot 10^4$	18	-4,8	2,3	-0,4
ОИОС СВО	$1 \cdot 10^6$	11	-11,6	-1,8	-5,3

Отсутствие газообразования при хранении ПК и существенного увеличения объема при облучении исключает наличие процессов химической и радиационной деструкции в его структуре.

**Обоснование технологических условий применения опытно-промышленной установки для кондиционирования реальных ОИОС АЭС** проводили с учетом присутствия в их фракционном составе мелкодисперсных механических примесей коррозионного происхождения. По гранулометрическому анализу, катионит КлнАЭС содержит до 17 % масс. частиц размером менее 0,315 мм со следующим химическим составом, масс. %: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 77; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,79; NiO – 2,5; SiO<sub>2</sub> – 13,3.

При работе опытно-промышленной установки ФГУП «РАДОН» ОИОС обезвоживается вакуумированием в контейнере с перфорированными перегородками (КМЗ-ИОС-РАДОН для ОИОС 4 класса или НЗК-150-1,5П со вставкой НЗК-ИОС-РАДОН для ОИОС 3 класса) с удалением избыточной воды через дренажную полость, а затем пропитывается полимерным связующим (ПС). Мелкие примеси в реальных ОИОС АЭС могут затруднить соблюдение технологических параметров обезвоживания и пропитки: давление не более 0,15 МПа и длительность пропитки не более, чем время желатинизации (гелеобразования с повышением вязкости) ПС. Применение технологии и установки для кондиционирования реальных ОИОС АЭС требует их адаптации.

Лабораторная апробация пропитки ОИОС КлнАЭС с примесью мелкой фракции показала техническую реализуемость процесса, продолжительность которого (73 минуты) не превысила время желатинизации используемого ПС - 4,5 часа.

При кондиционировании катионита КлнАЭС с механическими примесями на опытно-промышленной установке в контейнере НЗК-150-1,5П со вставкой время обезвоживания увеличилось по сравнению с ОИОС без примесей с 8 минут до 1 часа по причине снижения водопроницаемости сетки контейнера из-за мелких частиц. После промывки технической водой снизу вверх содержание в ОИОС частиц с размером менее 0,315 мм снизилось до 6,6 % (рисунок 5).

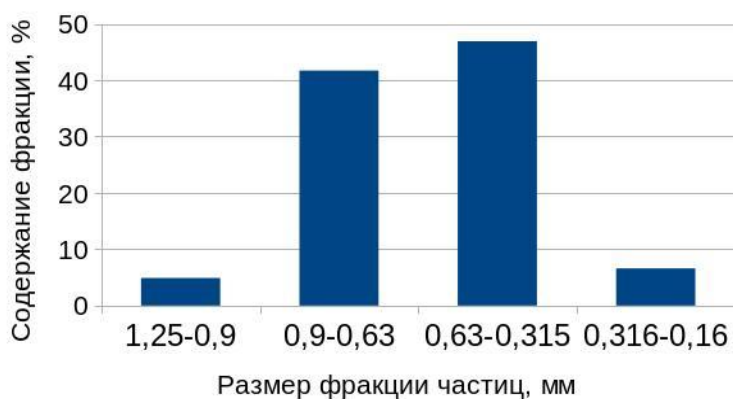


Рисунок 5 - Гранулометрический состав катионита КлнАЭС с механическими примесями после промывки

Пропитка ОИОС после промывки заняла 15 мин при давлении не выше 0,08 МПа и расходе ЭС и ОТ 0,9 и 0,6 м<sup>3</sup>/час соответственно. Температура стенки металлического контейнера при пропитке не превышала 40 °С, доля включенных ОИОС достигала

71 масс. %.

Сгущенный осадок шлама из промывной воды был включен в цементный компаунд.

Исходя из общей длительности процесса 67 мин, производительность по обезвоживанию и пропитке составила  $1,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что с учетом вспомогательных операций позволяет в течение календарного года выполнить переработку накопленных ОИОС в объеме 200 - 400  $\text{м}^3$ .

Для переработки реальных ОИОС АЭС с механическими примесями (шламы, перлит и т.д.), в технологическую схему опытно-промышленной установки включена операция отделения мелких фракций (рисунок 6).

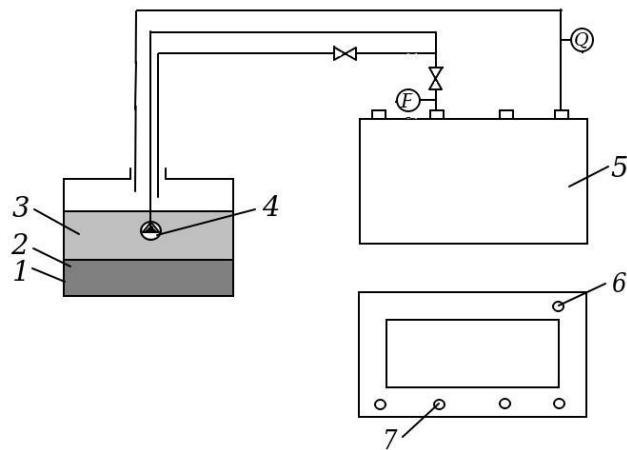


Рисунок 6 – Схема технологической стадии «Извлечение ОИОС из емкости хранения в контейнер» с отделением мелких фракций

1 — емкость с ИОС; 2 — ИОС; 3 — вода; 4 — насос; 5 — контейнер;  
6 — вход пульпы; 7 - выход пульпы

Пульпу ОИОС транспортируют насосом из емкости хранения в контейнер, где пульпа сгущается за счет разницы в плотностях ИОС и воды, а транспортная вода с мелкими включениями возвращается в емкость. Операция извлечения успешно апробирована на природном сорбенте клиноптилолите. Вставку НЗК-ИОС-РАДОН объемом  $1,3 \text{ м}^3$  заполнили примерно на 95 % за 1,5 часа, что говорит о производительности процесса  $0,9 \text{ м}^3/\text{час}$ .

Сгущение пульпы мелких фракций в емкости хранения осуществляется пропусканием через микрофильтры с цементированием концентрата, или упрощенно - путем отстоя пульпы.

Соответствие ПК с включенными реальными ОИОС требованиям НП-019-15 и НП-093-14 определяли испытанием показателей качества и критериев приемлемости.

Механическая прочность ПК превышала 6 МПа и возрастала при воздействии температуры и облучения (таблица 7).

Таблица 7 – Определение механической прочности, термической и радиационной стойкости ПК с ОИОС КЛНАЭС, МПа

Тип воздействия	Среднее значение прочности, МПа	Изменение прочности, %
ПК с ОИОС без видимых примесей		
Без воздействия	9,7	-
Облучение	11,5	+18,6
Температура	18,0	+85,8
ПК с ОИОС с мелкими примесями		
Отсутствует	6,1	-
Облучение	6,6	+8,0
Температура	20,3	+233,1

Радиационную стойкость ПК контролировали по изменению объема после облучения (таблица 8), который для большинства образцов уменьшался, а увеличение объема некоторых из них не превышало 5 об. %.

Таблица 8 – Радиационная стойкость ПК с ОИОС КЛНАЭС по изменению объема ( $\Delta V$ , %) в результате облучения дозой 10 кГр, количество образцов  $n = 3$  шт

Тип контейнера	Изменение объема, %		
	мин.	макс.	средн.
НЗК-150-1,5П со вставкой	-3,7	2,1	-1,6
КМЗ-ИОС-РАДОН	-4,4	-2,8	-3,7

Скорость выщелачивания  $Cs^{137}$  из образцов с ОИОС КЛНАЭС, термическая и радиационная стойкость достигла нормативного значения уже в первые сутки испытаний (таблица 9).

Таблица 9 – Водоустойчивость, радиационная и термическая стойкость ПК с ОИОС КЛНАЭС по показателю скорости выщелачивания  $Cs^{137}$  (г/(см<sup>2</sup> сут))

Продолжительность выщелачивания, сутки	Тип предварительного воздействия		
	Без воздействия	Температура	Облучение
1	2,40E-04	7,59E-04	2,29E-04
2	1,31E-04	6,26E-04	4,30E-04
7	3,96E-04	1,61E-04	1,10E-04
10	2,76E-05	1,76E-04	1,64E-04
28	9,91E-05	5,25E-05	3,12E-05
57	1,35E-05	2,62E-05	1,53E-05

По результатам анализа газовой фазы, при твердении ПК с ОИОС КЛНАЭС отсутствуют вещества с концентрациями выше ПДК для воздуха рабочей зоны, что исключает химические и радиационные процессы деструкции (таблица 10).

Таблица 10 – Содержание газов в пробе воздуха над образцом ПК с включенными ОИОС КЛНАЭС при твердении, мг/м<sup>3</sup>

Наименование параметра	СО	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub> *
Среднее значение	11,0	1,3	1,3	1,92	0,66	2,0	0,16
ПДК	20	2,0	5,0	10	10	20	7000
Превышение ПДК (да/нет)	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
*Данные измерения представлены в об. %							

По результатам испытаний пожароопасности по ГОСТ 12.1.044, ПК относится к горючим материалам средней воспламеняемости с временем достижения максимального перегрева - 189 с, т.е. более 0,5 мин, и температурой воспламенения и самовоспламенения 355 и 515 °С, соответственно. Это исключает возможность самовозгорания при взаимодействии с воздухом в течение 5 мин и при колебаниях температур в условиях ППЗРО.

Прочность при сжатии цементного компаунда после кондиционирования мелкой фракции на 28 сутки твердения составила 7,6 МПа.

Полученные результаты говорят о соответствии кондиционированного продукта требованиям НП-019-14 и НП-093-15.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проделанной работы сделаны следующие **выводы**:

1. Выполнено обоснование способа предварительной обработки ОИОС. При сравнении сушки и обезвоживания установлено:

При использовании метода сушки:

- процесс занимает от 4,5 до 24 ч и требует от 2 до 10 м<sup>3</sup> нагретого воздуха на полный цикл сушки 200 - 600 г ОИОС, что говорит о его длительности и энергозатратности;

- в условиях ППЗРО при увлажнении увеличение объема высушенных ОИОС превышает 48 %, а для ПК составляет от 6,9 до 40,3 об. %. ПК с включением 40-60

масс. % высушенных ОИОС при выдержке в воде разрушается. Это может привести к разрушению упаковки при колебаниях влажности.

При использовании метода обезвоживания:

- процесс реализуется вакуумированием с малыми энергозатратами и сокращением времени до 30 мин;

- увлажнение не приводит к увеличению объема обезвоженных ОИОС и ПК при колебаниях влажности в условиях ППЗРО;

- скорость выщелачивания радионуклида  $Cs^{137}$  из обезвоженных ОИОС соответствует требованиям НП-019-15, составляет от  $3,4 \cdot 10^{-5}$  до  $2,0 \cdot 10^{-7}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), снижается во времени, а также при радиационном и термическом воздействии.

2. Показано изменение свойств ПК с включенными ОИОС, обезвоженными до влажности 50 - 53 % масс. с активностью  $10^7 - 10^8$  Бк/кг, получаемого методом пропитки на основе ОТ марки ЭТАЛ-45М/ЭТАЛ-247SL и ЭС марки ЭТАЛ-247SL в соотношении 0,6-0,8 в условиях ППЗРО:

- увеличение механической прочности после облучения дозой - 10 кГр на 11,8 %, 1 МГр на 3,5 %, а при термическом воздействии в диапазоне от 0 до 100 °С - на 4,3 %, что говорит о сохранении структурной стабильности при дозовых и температурных нагрузках в условиях ППЗРО;

- снижение скорости выщелачивания после термического воздействия:

для  $Cs^{137}$  до  $(7,2-0,3) \cdot 10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут),

для  $H^3$  до  $(3,8-0,2) \cdot 10^{-3}$  г/(см<sup>2</sup>·сут),

- снижение скорости выщелачивания после облучения:

для  $Cs^{137}$  до  $(4,8-0,5) \cdot 10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут),

для  $H^3$  до  $(4,8-0,7) \cdot 10^{-3}$  г/(см<sup>2</sup>·сут),

что соответствует требованиям НП-019-15 и говорит об отсутствии возможности выхода радиоактивности за пределы упаковки при поступлении из окружающей среды воды или ее паров;

- механическая прочность образцов после хранения 5-8 лет в лабораторных условиях - составляет 18,6-24,6 МПа, при термическом воздействии 13,2-18,8 МПа, при облучении дозой 10 кГр 19,8-29,5 МПа,

- скорость выщелачивания  $Cs^{137}$  на 4 сутки составляет  $(5,2-7,0) \cdot 10^{-4}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), что говорит о сохранении соответствия требованиям НП-019-15.

3. Показано, что при хранении в условиях приповерхностного размещения ПК с включенными обезвоженными ОИОС с остаточной влажностью 50-53 %:

- отсутствует газовыделение;
- при облучении дозой 10 кГр изменение объема ПК не превышает 5 об. %, при дозе 1 МГр объем уменьшается на 1,8-11,6 об. %, что говорит об исключении химических и радиационных процессов деструкции.

4. На примере КЛНАЭС установлена возможность переработки реальных ОИОС, включающих до 17 % масс. мелкодисперсных коррозионных примесей с размером частиц менее 0,315 мм, затрудняющих иммобилизацию ОИОС в ПК методом пропитки, с применением опытно-промышленной установки кондиционирования.

Установка включает узлы отделения мелких фракций, предварительной обработки ОИОС обезвоживанием, кондиционирования обезвоженных ОИОС в ПК, кондиционирования мелкой фракции цементированием.

Определены характеристики получаемого ПК на основе ОИОС КЛНАЭС после отделения мелких фракций промывкой:

- механическая прочность составляет более 6 МПа, при облучении дозой 10 кГр увеличивается на 8-18 %, а при термическом воздействии - на 86-230 %;
- уменьшение объема после облучения дозой - 10 кГр от 1,6 до 3,7 %;
- скорость выщелачивания после термического воздействия для  $Cs^{137}$   $7,6 \cdot 10^{-4}$ - $2,6 \cdot 10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут), после облучения –  $2,3 \cdot 10^{-4}$ - $1,5 \cdot 10^{-5}$  г/(см<sup>2</sup>·сут);
- температура воспламенения 355 °С, самовоспламенения - 515 °С, исключаящая самопроизвольное возгорание в условиях ППЗРО, что говорит о соответствии ПК с включенными ОИОС требованиям НП-019-15 и НП-093-14.

Для включения мелкой фракции использован наиболее совместимый с ними цементный компаунд, прочность которого на 28 сутки твердения составила 7,6 МПа, что соответствует требованиям НП-019-15.

По результатам проведенных исследований для переработки ОИОС АЭС, характеризующихся присутствием мелких фракций, предложено применение технологической схемы опытно-промышленной установки кондиционирования,

дооснащенной узлом отделения мелких фракций и узлом кондиционирования мелкой фракции методом цементирования. Показано, что применение данной технологической схемы позволяет выполнить переработку реальных ОИОС АЭС с получением кондиционированного продукта, соответствующего нормативным требованиям.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ**

Статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных

1. Ostashkina E.E., Savkin A.E., Slastennikov Yu.T. «Feasibility Study for Industrial Conditioning of Spent Ion-Exchange Resins by Impregnation with a Polymer Binder» // Atomic Energy. 2024. 136. P. 78-83. DOI: 10.1007/S10512024011343 (Scopus, Web of Science).

2. Ostashkina E.E., Savkin A.E., Slastennikov Yu.T. «Development and Testing of Methods for Extracting and Conditioning Accident Elimination Sorbents in the Basements of the Fukushima Daiichi NPP» // Atomic Energy. 2024. 136. P. 188-193. DOI: 10.1007/S10512024011503 (Scopus, Web of Science).

3. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Ванина Е.А. Исследование радиационной стойкости полимерного компаунда с включенными отработавшими ионообменными смолами // Физика и химия обработки материалов. 2024. № 2. С. 47-54. DOI: 10.30791/0015-3214-2024-2-47-54.

Статьи в научных журналах

1. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е. «Научно-технологическое обоснование выбора способа кондиционирования отработавших радиоактивных ионообменных смол» // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Материаловедение и новые материалы» 2020. Вып. 3(104). С. 40-53.

2. Савкин А.Е., Осташкина Е.Е., Слостенников Ю.Т. «Технико-экономическая оценка технологий переработки ЖРО БН-350» // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Материаловедение и новые материалы». 2023. Вып. 4(120). С. 119-128.

Публикации в прочих изданиях

1. Савкин А.Е., Осташкина Е.Е., Павлова Г.Ю., Карлина О.К. Опытная переработка отработавших ионообменных смол // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2016. № 3(86). С. 40-49.

2. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е. Радиационная стойкость органических компаундов для отверждения жидких радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2021. № 3(16). С. 44-50. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-44-50.

3. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Камаева Т.С., Кузнецова Н.М. Методическое сопровождение контроля соответствия показателям качества полимерного компаунда на основе радиоактивной отработавшей ионообменной смолы // Радиоактивные отходы. 2022. № 4(21). С. 6-12. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-6-12.

4. Осташкина Е.Е., Савкин А. Е., Слостенников Ю.Т. Опыт ФГУП «РАДОН» по кондиционированию радиоактивных отработавших ионообменных смол Калининской АЭС // Радиоактивные отходы. 2023. № 3(24). С. 6-13. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-6-13.

#### Конференции международные

1. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Слостенников Ю.Т. Опыт ФГУП «РАДОН» по кондиционированию радиоактивных отработавших ионообменных смол // VI Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2023): Москва, 14–17 ноября 2023 г.: сб. тезисов докладов. М.: Изд-во АО «НИКИЭТ». 2023. С. 168.

2. Камаева Т.С., Кузнецова Н.М., Осташкина Е.Е., Савкин А.Е. Методическое сопровождение контроля соответствия показателям качества полимерного компаунда на основе радиоактивной отработавшей ИОС // Четвёртая международная научно-практическая конференция «Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров», 21-22 сентября 2022 г., Сергиев Посад: сб. тезисов докладов. М.: ФГУП «РАДОН». 2022. С. 20-21.

3. Ostashkina E., Savkin A., Slastennikov Yu. Pilot-Industrial Conditioning of Spent Radioactive Ion-Exchange Resins // International conference on radioactive waste management. Solution for a Sustainable on future. IAEA. 5–12.11.2021. Book of abstracts. 2021. P. 120.

4. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Слостенников Ю.Т., Суменко А.В. Опытное-промышленное кондиционирование отработавших ионнообменных смол // Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров: Труды Второй научно-практической конференции, 23 – 24 сентября 2020 г. /

Под общей редакцией профессора Е.А. Ваниной; М.: Изд-во «Полиграф», 2020. – 160 с: ил. 69, табл. 34. ISBN 978-5-6045207-0-3. С. 104-107.

5. Савкин А.Е., Осташкина Е.Е., Павлова Г.Ю., Карлина О.К. Варианты обращения с отработавшими ионообменными смолами // Десятая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»: сб. тезисов докладов. М: АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. С. 114-115.

#### Конференции всероссийские

1. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Сластенников Ю.Т. Кондиционирование радиоактивных отработавших ионообменных смол Калининской АЭС // Пятая научно-практическая конференция «Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров», 20 – 21 сентября 2023 г., Сергиев Посад: сб. тезисов докладов. М.: ФГУП «РАДОН». 2023. С. 30-31.

2. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Сластенников Ю.Т. Кондиционирование радиоактивных отработавших смол Калининской АЭС // Шестой научно-технический семинар «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов», 26-29 июня 2023 г., Санкт-Петербург: сб. тезисов докладов. СПб.: АНО ДПО «Техническая академия Росатома», 2023. С. 66-75.

3. Савкин А.Е., Сластенников Ю.Т., Осташкина Е.Е. Варианты обращения с ЖРО АЭС нового поколения // Шестой научно-технический семинар «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов», 26 – 29 июня 2023 г., Санкт-Петербург: сб. тезисов докладов. СПб.: АНО ДПО «Техническая академия Росатома», 2023. С. 40-47.

4. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Сластенников Ю.Т. Опытная переработка отработавших радиоактивных ионообменных смол // X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022», 26 – 30 сентября 2022 г., Санкт-Петербург: сб. тезисов докладов. СПб.: ООО «Адмирал Принт», 2022. С. 432.

5. Савкин А.Е., Осташкина Е.Е. Радиационная стойкость отвержденных жидких радиоактивных отходов // Пятый научно-технический семинар «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов», 20 – 24 июня 2022 г., Санкт-Петербург: сб. тезисов докладов. СПб.: АНО ДПО «Техническая академия Росатома», 2022. С. 60-67.

6. Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Сладенников Ю.Т., Суменко А.В. Опытное-промышленное кондиционирование отработавших ионообменных смол // Четвертый научно-технический семинар «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов», 14 – 18 июня 2021 г., Санкт-Петербург: сб. тезисов докладов. СПб.: Свое издательство, 2021. С. 30-34.

7. Осташкина Е.Е., Павлова Г.Ю., Савкин А.Е. Оптимальные составы полимерных компаундов для включения отработавших ионообменных смол // Первая научно-практическая конференция «Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров», 24 – 25 апреля 2019 г., Сергиев Посад: сб. тезисов докладов. М.: ФГУП «РАДОН», 2019. С. 49-55.

#### Патенты

1. Устройство для кондиционирования радиоактивных ионообменных смол / Карлина О.К., Осташкина Е.Е., Павлова Г.Ю., Савкин А.Е., Суменко А.В.: пат. 2637380 Рос. Федерация. № 2016139169; заявл. 06.10.2016; опубл. 05.12.2017, Бюл. № 34. 11 с.

2. Устройство для кондиционирования смеси радиоактивных ионообменных смол и шламов / Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Сладенников Ю.Т.: пат. 2813736 Рос. Федерация. № 2023121449; заявл. 16.08.2023; опубл. 16.02.2024. Бюл. № 5. 11 с.