

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Осташкиной Елизаветы Евгеньевны** на тему
**«Научно-технологическое обоснование кондиционирования
отработавших ионообменных смол методом включения в полимерное
связующее»**, представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук
по специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных
элементов (технические науки)

На предприятиях атомной отрасли происходит накопление большого количества вторичных радиоактивных отходов в виде отработавших ионообменных смол (ОИОС). Идет накопление таких отходов, так как это трудно перерабатываемые отходы.

Применяемые в мире промышленные технологии обращения с ОИОС можно разделить на две основные группы – деструктивной переработки и иммобилизации. В атомной отрасли России развивались методы иммобилизации с фиксацией радионуклидов в цементную, битумную и полимерную матрицу на лабораторном и опытно-промышленном уровне. Каждый из них имеет свои недостатки, и решение проблемы промышленной переработки ОИОС является важной и актуальной задачей.

При этом промышленных методов обращения с ОИОС в России на данный момент нет, на это есть ряд причин. Как правило, все исследователи проводили переработку небольших количеств ОИОС на опытных установках, и перенос на технологический уровень не всегда получался удачным. Поэтому нет технологической готовности для промышленного внедрения готовых установок.

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 они набухают, увеличиваются в объеме, что влияет на безопасность их хранения. По удельной активности более 70 % ОИОС относится к среднеактивным РАО.

Исследования, проводимые в России и мире, показали, что наиболее надежным матричным материалом для фиксации ОИОС является полимерный компаунд. Композиции на основе эпоксидных смол являются радиационно стойкими, а модификация добавками снижает их вязкость и замедляет отверждение, что делает процесс более технологичным. Проблемы с этой технологией связаны в основном с неравномерностью распределения полимерного связующего в контейнере с ОИОС и отсутствием оборудования для точного дозирования и равномерной подачи смолы, что приводит к неоднородности шихты и ухудшению характеристик конечного продукта.

Основной проблемой, которую надо решать, это большой объем ОИОС, который накоплен на АЭС России, и основным критерием выбора промышленного метода является возможность кондиционирования реальных, гетерогенных по типу и характеристикам, ОИОС АЭС.

В ФГУП «РАДОН» разработана технология включения ОИОС в полимерное связующее на основе эпоксидных смол. Создана опытно-промышленная установка, конструкция и принцип действия которой обеспечивают однородность получаемой матрицы, точность дозирования ее компонентов и равномерность пропитки. Необходимо провести научно-технологическое обоснование возможности усовершенствования установки с целью ее применения для кондиционирования реальных ОИОС АЭС. Для этого необходимо усовершенствовать технологию по включению ОИОС в полимерное связующее на основе эпоксидных смол, обосновать и адаптировать применение разработанной технологии для кондиционирования реальных ОИОС АЭС с присутствием мелких фракций. Также обосновать соответствие получаемых полимерных компаундов требованиям к размещению в контейнеры для хранения в условиях пункта приповерхностного захоронения. Решение таких вопросов является необходимой, важной и актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является научно-технологическое обоснование кондиционирования ОИОС методом включения в полимерное связующее. Для достижения этой цели автором были поставлены и решены следующие научные задачи, имеющие важное прикладное значение:

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. Показать 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.

Автор решила ряд сложных научных задач, научная новизна которых состоит в следующем:

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.

Структурно диссертация выполнена в соответствии с требованиями к квалификационному диссертационному исследованию. Работа содержит введение, шесть уравновешенных по объему глав, заключение и список литературы.

Во введении отражена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту. Представлена информация о личном вкладе автора и апробации результатов.

В литературном обзоре (глава 1) рассмотрены и проанализированы мировые литературные данные о достоинствах и недостатках различных методов переработки ОИОС. Описаны преимущества иммобилизации ОИОС в полимерную матрицу на основе эпоксидных смол методом пропитки с использованием разработанной во ФГУП «РАДОН» технологии и установки. Выводы по главе обосновывают актуальность, цель и задачи работы.

Во второй главе приведено описание объектов исследования, параметров и методов их контроля, а также оборудования, использованного при выполнении настоящей диссертационной работы. Проведено описание методик, разработанных автором самостоятельно.

В третьей главе приведено обоснование выбора метода предварительной обработки перед иммобилизацией ОИОС. Подробно рассмотрены такие недостатки метода сушки, как увеличение объема ОИОС при увлажнении более чем на 48 %, увеличение объема и разрушение полимерного компаунда с высушенными ОИОС, длительность и энергозатратность процесса. При удалении влаги путем обезвоживания вакуумированием в течение 30 минут получаемый полимерный компаунд стабилен при последующей выдержке в воде. Обезвоженные ОИОС соответствуют требованиям НП-019-15 по скорости выщелачивания, в том числе после термического и радиационного воздействия. По результатам исследований обезвоживание выбрано в качестве основного метода предварительной обработки.

В четвертой главе представлены исследования свойств полимерного компаунда при приповерхностном хранении, которые моделируют условия хранения образцов. Для этого образцы облучали дозой от до 10^6 Гр и подвергали температурным колебаниям от 0 до 100 °С.

После радиационного воздействия механическая прочность компаунда увеличивалась за счет протекающих по радикальному механизму процессов доотверждения (сшивки) его эпоксидной основы. Скорость выщелачивания Cs^{137} и H^3 из компаунда соответствовала нормативным значениям, в том числе после термического и радиационного воздействия. Свойства компаунда также соответствовали нормативам после 2 лет временного хранения в

условиях ППЗРО и 5-8 лет лабораторного хранения. Исследование газовыделения показало отсутствие прироста газовой фазы при твердении и хранении компаунда, что исключает процессы химического взаимодействия между компонентами РАО и материалами контейнера, радиолита воды и радиационных изменений материалов. Радиационная стойкость, определяемая по диапазону изменения объема после облучения, не превышала 5 об. %. Результаты исследования говорят о сохранении структурной стабильности компаунда при дозовых и температурных нагрузках в условиях ППЗРО.

В главе 5 представлено обоснование применения опытно-промышленной установки разработки ФГУП «РАДОН» для кондиционирования реальных ОИОС АЭС с механическими примесями мелких частиц. В технологическую схему установки включена операция сгущения пульпы ОИОС для отделения мелких фракций за счет разницы в плотностях ОИОС и воды. В главе показано соответствие полученного полимерного компаунда на основе реальных ОИОС Калининской АЭС, требованиям нормативных документов НП-019-15 и НП-093-14.

В главе 6 приведены обобщенные сравнительные результаты лабораторных исследований свойств полимерного компаунда с обезвоженными ОИОС при размещении в условиях приповерхностного захоронения. Показаны условия проведения технологического процесса кондиционирования ОИОС с присутствием мелких фракций, которые позволили дать научно-технологическое обоснование промышленного внедрения кондиционирования ОИОС АЭС методом включения в полимерное связующее. Показано, что все параметры контроля основных свойств полимерного компаунда соответствовали нормативным требованиям.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в следующем. Доказано, что полимерный компаунд с иммобилизованными ОИОС РАО 3 класса, с предобработкой методом обезвоживания до остаточной влажности 50 - 53 масс. %, и удельной активностью по Cs^{137} 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 переработки реальных ОИОС с АЭС путем добавления технологической операции промывки ОИОС и отделения мелких фракций.

Практическая значимость диссертационной работы. 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 м³. Разработан проект привязки установки на Калининской АЭС, что позволит выполнить переработку всего объема смол, накопленных за годы ее эксплуатации.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты вносят значительный вклад в развитие актуального научного направления. В качестве новых научных результатов диссертантом выдвинуты следующие **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.

Оценка содержания диссертации. Диссертационная работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 37 таблиц и состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, насчитывающего 118 источников, и приложения.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций. Полученные автором результаты диссертационного исследования могут быть охарактеризованы как достоверные. Достоверность обусловлена использованием автором научных методов, адекватных предмету, целям и задачам исследования, при этом выводы сделаны на основании проверяемых данных и фактов. Достоверность полученных

автором результатов подтверждается их воспроизводимостью в процессе набора статистики, применением аттестованных методик измерений для определения физико-химических характеристик РАО и их радионуклидного состава. Для оценки критериев приемлемости для приповерхностного захоронения автором разработаны и аттестованы методики, адаптированы для целей исследования и для определения показателей качества полимерного компаунда, а также показателей его радиационной и пожарной безопасности. Все измерения проводились в аккредитованной лаборатории, работающей в системе качества.

Публикации и апробация результатов диссертации. Основные выводы диссертации обоснованы и логично вытекают из содержания работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные научные результаты диссертационного исследования были в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ., которые также нашли отражение и апробированы в докладах, представленных автором на российских и международных научных конференциях. Результаты работы представлены на 12 научных конференций и опубликованы в 9 статьях, в том числе в 3 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 2 – в рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий. Получено 2 патента РФ.

Диссертация написана автором самостоятельно, свидетельствует о личном вкладе автора в науку, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выносимые на защиту.

В целом диссертационная работа Осташкиной Е.Е. производит хорошее впечатление, написана ясным и понятным научным языком.

При рецензировании диссертационного исследования возникло ряд вопросов, требующих разъяснения:

1. Моделирование условий приповерхностного хранения образцов полимерного компаунда включало облучение образцов дозой до 10^6 Гр и температурное воздействие от 0 до 100 °С. Объясните свой выбор величин характеристик воздействия на полимерный компаунд с ионообменной смолой при хранении. Какой срок хранения автор моделировала?!

2. Проводилась ли оценка химического взаимодействия полимерного компаунда с ионообменной смолой?

3. Уточните, статистическую значимость полученных результатов, как определялась количество образцов в каждой выборке, используемой при испытаниях?

В качестве замечаний можно отметить повтор некоторых данных в тексте диссертации. В качестве примера данные, приведенные в Таблица 3.2 повторяются на рисунке 3.9.

Приведенные выше вопросы и замечания не снижают общую высокую оценку диссертационного исследования, научной значимости результатов

работы и не влияют на положительную оценку диссертации, выполненной на высоком экспериментальном и научном уровне.

Полученные автором результаты могут быть использованы при исследованиях, предусмотренных паспортом научной специальности. По своему содержанию диссертационная работа **Осташкиной Елизаветы Евгеньевны** соответствует паспорту научной специальности 2.6.8. «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов» в части направлений исследований: 3. Способы утилизации техногенного и вторичного сырья; 10. Снижение отходности производств, фиксация отходов в виде малоподвижных, безопасных для окружающей среды соединений или трансформация их в полезные продукты.

Диссертация **Осташкиной Елизаветы Евгеньевны** на тему «Научно-технологическое обоснование кондиционирования отработавших ионообменных смол методом включения в полимерное связующее» отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД. Автор диссертации, **Осташкина Елизавета Евгеньевна**, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Лащенко Татьяна Николаевна,

Доктор биологических наук

по специальности 03.00.16. Экология (биологические науки),

05.26.02. Безопасность в чрезвычайных ситуациях (биологические науки),

кандидат химических наук по специальности 05.17.02. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов (химических науки)

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России

Профессор кафедры медико-профилактических дисциплин с курсами радиационной гигиены и радиационной медицины МБУ ИНО ФМБЦ

Ведущий научный сотрудник Центр специальных исследований

Отдел «Аварийный медицинский радиационный дозиметрический центр»

Лаборатория радиометрических и спектрометрических исследований человека и окружающей среды

Россия, Москва, 123182 г. Москва, ул. Живописная, д. 46;

E-mail: tlaschenova@yandex.ru; Т.р.: +7 4991909672

Подпись Т.Н.Лащенко удостоверяю:

Ученый секретарь ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России

Д-р медицинских наук

«15» мая 2026 г.

Т.Н. Лащенко

С.В. Горнов

