

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук**  
**Савкина Александра Евгеньевича**  
**на тему: «Переработка радиоактивных отходов с селективным**  
**извлечением радионуклидов и кондиционирование отработавших**  
**сорбентов»**  
**по специальности 2.6.8. - Технология редких, рассеянных и**  
**радиоактивных элементов**

**Актуальность избранной темы.** Диссертационная работа А.Е. Савкина посвящена решению важной научно-практической проблемы эффективного и радиационнобезопасного обращения с радиоактивными отходами (РАО), образующимися на АЭС, предприятиях по переработке РАО, в исследовательских центрах, пунктах хранения РАО, в том числе жидкие РАО (ЖРО) - кубовые остатки (КО) выпарных установок, солевой плав после глубокой упарки КО, пульпы отработавших ионообменных смол (ИОС), растворы после дезактивации твердых РАО (ТРО), растворы системы газоочистки и другие типы отходов. Существующие и/или предлагаемые методы обращения с такими РАО не являются оптимальными (прежде всего с точек зрения эффективности методов, минимизации объемов РАО, стоимости захоронения отвержденных форм), что **подтверждает особую актуальность** разработки методов селективного извлечения радионуклидов из ЖРО различного химического состава и уровня активности, а также кондиционирования ИОС и других сорбционных материалов. Достижение поставленных задач безусловно позволит значительно уменьшить объем отвержденных РАО, повысить их безопасность при долговременном хранении и снизить стоимость захоронения РАО.

**Научная новизна диссертации состоит в следующем:**

- впервые количественно определены сорбционно-селективные характеристики различных сорбентов при сорбции радионуклидов цезия из высокосолевых ЖРО, содержащих органические комплексообразующие вещества;
- разработаны методы селективного осаждения радионуклидов цезия, кобальта, марганца и др. из высокосолевых ЖРО и определены оптимальные условия их проведения;
- впервые изучено влияние органических веществ на процессы сорбции и соосаждения радионуклидов цезия, кобальта, марганца и др. из высокосолевых ЖРО;

- изучен процесс окислительной деструкции органических веществ в высокосолевых ЖРО методом озонирования;
- впервые изучен механизм негативного влияния хромат-ионов на извлечение радионуклидов кобальта из кубовых остатков АЭС и предложен метод устранения этого влияния;
- исследованы методы переработки солевых пластов АЭС с использованием селективного извлечения радионуклидов и определены основные технологические параметры их проведения;
- впервые изучено набухание высушенных ионообменных смол и измерено давление набухания;
- изучен процесс кондиционирования отработавших ионообменных смол путем включения в полимерный компаунд на основе эпоксидных смол непосредственно в контейнере для захоронения и определены основные технологические параметры.

**Практическая значимость работы:**

- Проведенные исследования легли в основу целого ряда технологий переработки различных РАО среднего и низкого уровня активности. Проведены успешные лабораторные, стендовые, опытно-промышленные и пусконаладочные испытания разработанных технологий для переработки ЖРО ФГУП «РАДОН», ЖРО ГНЦ РФ ФЭИ, ЖРО и ТРО АЭС России и Казахстана.
- Разработана технология переработки ЖРО ГНЦ РФ ФЭИ с использованием селективной сорбции радионуклидов цезия при цементировании, позволившая проводить процесс с однозонной планировкой оборудования и сократить объем кондиционированных РАО за счет замены контейнеров НЗК на КМЗ.
- Разработана технология окислительно-сорбционной очистки кубовых остатков АЭС, позволившая достичь коэффициента сокращения объема РАО 80 - 100.
- Разработана технология ультразвуковой дезактивации металлических РАО с селективным извлечением радионуклидов из промывной воды, позволившая значительно сократить объемы вторичных РАО.
- Разработана технология селективной очистки ЖРО от радия и дочерних продуктов распада урана, что уменьшило образование кондиционированных РАО в 4 – 5 раз по сравнению с осадительной технологией очистки ЖРО от радионуклидов.
- Разработанная технология кондиционирования отработавших ионообменных смол непосредственно в контейнере для захоронения

методами обезвоживания и включения в полимерный компаунд позволила получить конечный продукт, соответствующий требованиям НП-019 и НП-093 в объеме в 4 – 5 раз меньшем, чем при цементировании.

- Разработана методика определения давления набухания высушенных ИОС, что позволило установить возможность разрушения целостности контейнера при захоронении высушенных ИОС.

### **Характеристика основного содержания диссертации**

Диссертация включает введение, обзор известных данных по тематике исследований, десять глав обсуждения полученных результатов, заключение и список цитируемой литературы из 223 наименований. Диссертационная работа изложена на 309 страницах печатного текста, включает 70 рисунков и 82 таблицы.

Во введении представлены актуальность темы диссертационной работы, цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, представлены выносимые на защиту положения, а также приведены сведения об апробации результатов работы, авторских публикациях, личном вкладе автора.

В первой главе (Литературный обзор) представлены данные критического анализа литературных источников, посвященные обзору источников образования РАО, их классификации, научных и технических аспектов их переработки. В главе сформулированы цель и основные задачи исследований, направленные на разработку методов селективного извлечения различных радионуклидов при переработке и кондиционировании ТРО и ЖРО, а также кондиционирования отработавших сорбентов.

Во второй главе (Методическая часть) приведены методики проведения сорбционных и кинетических экспериментов, определения физико-химических свойств исследованных РАО, характеристика исследованных сорбционных материалов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по переработке КО АЭС, в том числе: исследований сорбентов на имитаторах и на реальных КО АЭС; влияния различных факторов на сорбцию радионуклидов; процессов выделения радионуклидов коррозионного происхождения; влияния предварительного окисления на сорбцию радионуклидов цезия из КО АЭС и выбора сорбента; характеристики отходов, образующихся при выделении радионуклидов из КО АЭС. В качестве базового метода разрушения комплексных соединений, присутствующих в КО, выбрано озонирование, которое превосходит другие способы по показателю объема вторичных отходов и технологической приемлемости. Показано, что для сорбции радионуклидов цезия наибольшую эффективность

и наибольший ресурс имеет сорбент Т-35 (коэффициент очистки после пропускания 300 колоночных объемов составил  $5 \times 10^4$ ). Также в главе 3 приведены результаты разработки принципиальной технологической схемы переработки КО АЭС, испытаний стендовой установки; испытаний опытной установки очистки КО; описание аппаратурно - технологической схемы переработки КО Кольской АЭС и сведения об опытной эксплуатации промышленной установки селективной очистки КО на Кольской АЭС, на которой к 2022 г. получено 3,4 тыс. т нерадиоактивных солей, при этом коэффициент сокращения объема радиоактивных отходов составил 80-100.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям по переработке солевых пластов, накопленных на АЭС. Опробованы 3 варианта переработки пластов АЭС: 1) растворение плава и последующая обработка, включающая окисление, отделение образующегося при окислении осадка и селективную очистку на ферроцианидных сорбентах; 2) расплавление плава, добавление стеклообразующих добавок и варка боросиликатного стекла; 3) растворение плава, окисление полученного раствора, выделение радионуклидов на вводимых коллекторах и отдельное обращение с полученным осадком и раствором. Показано, что все три варианта принципиально возможно реализовать в промышленном масштабе. По результатам технико-экономической оценки (ТЭО) переработки пластов АЭС показано, что вариант 1 является наиболее экономически выгодным (около 11,5 тыс. рублей на 1 т плава).

В пятой главе представлены результаты выполненных работ по модернизации схемы обращения с ЖРО ФГУП «РАДОН», в том числе по обращению с низкосолевыми и солевыми ЖРО, а также ТЭО обращения с солевыми ЖРО предприятия. В 2010 году была запущена в эксплуатацию станция водоочистки, обеспечивающая высокую степень очистки низкосолевых ЖРО и снижение объемов вторичных РАО до 5 раз (по сравнению с ионообменной очисткой при производительности до  $5 \text{ м}^3/\text{час}$ ). Предложено для солевых ЖРО введение коллекторов радионуклидов и последующее разделение на 2 потока с получением остеклованных САО и ОНАО. Показано, что такая технология позволяет в 1,5 раза снизить затраты на обращения с ЖРО по сравнению с прямым цементированием.

В шестой главе рассмотрены результаты разработки технологии обращения с ЖРО ГНЦ РФ – ФЭИ, включая данные о возможностях селективной очистки жидких радиоактивных концентратов (ЖРК) от радионуклидов цезия, разработки рецептуры цементирования ЖРК, а также приведены технологические схемы установки переработки ЖРК с производительностью 100 л/час и переработки ЖРО предприятия.

Установлено, что суммарная бета-активность очищенного ЖРК после пропускания 110 колоночных объемов через сорбент Т-35 снижается на 4 порядка. Разработана оптимальная рецептура цементного компаунда для включения очищенного ЖРК (портландцемент М-500 с добавкой 10 масс.% полифункциональной добавки (ПФД), включающей мелкодисперсный цемент, бентонитовую глину, биоцидную добавку, пластификатор С-3, пеногаситель), соответствующего требованиям НП-019-15.

В седьмой и восьмой главах рассмотрены основные результаты выполненных работ по разработке эффективных методов переработки вторичных ЖРО, образующихся в термических процессах переработки ТРО, и дезактивации металлических РАО соответственно. Показано, что вторичные ЖРО могут быть переработаны совместно с КО на АЭС и других объектах с использованием селективного извлечения радионуклидов. На опытной установке продемонстрирована возможность дезактивации чехлов для ОТВС до фоновых значений, разработан технический проект промышленной установки ультразвуковой дезактивации металлических РАО для Балаковской АЭС, запущенной в опытную эксплуатацию в 2016 году.

В девятой главе рассмотрены основные результаты выполненных экспериментальных исследований по очистке ЖРО пункта хранения РАО (ПХРО) «Саакадзе» (Грузия), в том числе по разработке технологической схемы мобильной установки очистки ЖРО и по очистке ЖРО на ПХРО. Так, общий объем очищенных ЖРО - 50 м<sup>3</sup>; полученная вода не являлась РАО (суммарные альфа- и бета-активность воды - 11 и менее 19 Бк/дм<sup>3</sup> соответственно, активность по <sup>226</sup>Ra - 11 Бк/дм<sup>3</sup>). В результате коэффициент сокращения объема РАО составил 75,8.

Десятая глава посвящена экспериментальным исследованиям с целью разработки оптимального подхода к переработке ИОС и неорганических сорбентов. В работе были отработаны технологические параметры методов переработки ИОС, испытана опытная установка кондиционирования ИОС, разработаны опытно-промышленная установка и проведены ее испытания, разработана технология кондиционирования таких отходов, включающая обезвоживание и включение ИОС в полимерное связующее на основе эпоксидных смол российского производства методом пропитки в контейнере для захоронения. Так, к 2023 г. на ФГУП «РАДОН» выполнено кондиционирование 15 м<sup>3</sup> собственных ИОС со станции спецводоочистки и 7,6 м<sup>3</sup> ИОС Калининской АЭС. Получаемый компаунд отвечает требованиям к отвержденным РАО. Было также показано, что полимерный компаунд может быть использован для отверждения отработавших неорганических сорбентов с удельной активностью до 10<sup>11</sup> Бк/кг.

### Вопросы и замечания к диссертации:

1. К главе 2 (Методическая часть): раздел 2.2 ограничивается указанием использованных методов анализа, однако не приведено описание использованных оборудования и методик (или ссылок на такие методики). При этом частично такие сведения приведены в соответствующих главах.
2. К главе 3: Указано (стр. 98), что «при использовании селективных сорбентов для переработки кубовых остатков АЭС необходимо особое внимание уделить проблеме выделения  $^{137}\text{Cs}$ ...». При этом выше приведены данные, что ранее при использовании ферроцианида калия – кобальта удалось очистить «декантат кубового остатка от  $^{137}, ^{134}\text{Cs}$  до значения объемной активности порядка  $150 \text{ Бк/дм}^3$  (исходная объемная активность,  $\text{Бк/дм}^3$ :  $^{137}\text{Cs}$ -  $n \cdot 10^5$ )». Следовало более четко пояснить, почему такие исследования было важно развивать.  
Для вывода о высокой химической стойкости отработавшего сорбента было целесообразно привести данные по степени выщелачивания  $^{137}\text{Cs}$ .  
В разделе 3.8 было бы корректно привести методику испытаний стендовой установки, разработанную на основе результатов работ в лабораторном/опытном масштабе.
3. К главе 4: Обсуждение результатов в таблицах 4.3-4.5 не приведено. Вывод к таблице 4.6 (стр. 170) содержит: «При этом был получен стеклоподобный материал, отвечающий регламентированным требованиям [111].». Какие показатели качества стеклоподобного компаунда оценивали? В разделе 4.2 при ТЭО использовали стоимость захоронения отходов на 2019 год. Сохранилась ли стоимость на настоящее время?
4. К главе 5: Убежден ли автор, что для ТЭО (раздел 5.3) выбраны оптимальные условия предлагаемой технологии обращения с солевыми ЖРО?
5. К главе 6: Следует более конкретно пояснить, почему для компаунда с ПФД (таблица 6.4) выбраны Р/Ц соотношение 0,7 и количество ПФД 10 масс.%.  
6. К главе 7: Выделение относительно короткого раздела (стр. 213-217) в отдельную главу не выглядит необходимым, потому что раздел посвящен апробации найденных в диссертации решений для отдельного типа РАО.
7. К главе 8: Результаты селективного выделения радионуклидов из вторичных ЖРО после дезактивации металлических РАО целесообразно пояснить.
8. К главе 9: Чем обоснован выбор сорбентов для радия (модифицированный диоксид марганца и сильнокислотный катионит Dowex HCR-S)?
9. К главе 10: Как определяли радиационную устойчивость полимерного компаунда с ИОС? Оценивали ли при этом состав газовой фазы?

Известен ли фазовый состав и условия подготовки цеолитового сорбента? Какова причина существенного роста прочности на сжатие облученного полимерного компаунда с цеолитом?

**Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку данной диссертационной работы, выполненной на высоком научном и экспериментальном уровне.**

**Достоверность** полученных автором результатов подтверждается использованием методик эксперимента, соответствующих современному научному уровню, в том числе методов атомно-абсорбционной спектроскопии, пламенной фотометрии, ионной хроматографии, альфа-, бета- и гамма-спектроскопии, воспроизводимостью результатов, а также согласованностью результатов с опубликованными данными, представленными в независимых источниках по близкой тематике. Основные выводы диссертации обоснованы и логично вытекают из содержания работы.

**Практическая значимость** подтверждается результатами опытно-промышленных и пусконаладочных испытаний разработанных технологий для переработки ЖРО ФГУП «РАДОН», ЖРО ГНЦ РФ ФЭИ, ПХРО (Саакадзе, Грузия). Результаты работы могут быть рекомендованы для изучения и внедрения в научных и образовательных организациях, а также на радиохимических предприятиях атомной отрасли и АЭС, в частности в ФГУП «Радон», ГНЦ РФ ФЭИ, ФГУП «Горно-химический комбинат», АЭС России и Казахстана.

**Автореферат** диссертации Савкина А.Е. полностью отражает содержание диссертации. Результаты работы представлены в материалах 33 научных конференций и опубликованы в 12 статьях в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, в том числе в 7 статьях в журналах, входящих в международные базы данных научного цитирования (Web of Science, Scopus). Получено 7 патентов на изобретение.

По своему содержанию диссертационная работа Савкина А.Е. **соответствует паспорту научной специальности 2.6.8.** Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов в части направлений исследований «10. Снижение отходности производств, фиксация отходов в виде малоподвижных, безопасных для окружающей среды соединений или трансформация их в полезные продукты».

Диссертация Савкина А.Е. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технологические решения задачи по разработке методов селективного извлечения радионуклидов при переработке ТРО и ЖРО среднего и низкого

уровня активности, а также способов кондиционирования ионообменных смол и неорганических сорбентов как основы создания новых эффективных технологий переработки и кондиционирования ЖРО и ТРО, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

По актуальности, новизне, практической значимости диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, **Савкин Александр Евгеньевич** заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.8. - Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

**Официальный оппонент:**

доктор химических наук,  
главный научный сотрудник Лаборатории радиохимии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Винокуров Сергей Евгеньевич

22.01.2024 г.

Адрес места работы: 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Тел.: +7(499)1374127; e-mail: vinokurov@geokhi.ru

Подпись: *Сергей Евгеньевич Винокуров*  
Удостоверение: *Винокуров Сергей Евгеньевич*  
*з.к.уб.а.и.и.ч.а.*  
*г.и. ГЕОХИ РАН*

