

На правах рукописи



РЫКУНОВА АНАСТАСИЯ АНАТОЛЬЕВНА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ  
ОЦЕНКИ И ОПТИМИЗАЦИИ ОБЪЕМОВ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ  
НА ЗАМЫКАЮЩИХ СТАДИЯХ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

Автореферат на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат химических наук, доцент  
О.В. Шмидт

Москва 2025

Работа выполнена в акционерном обществе «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»)

Научный руководитель: Кандидат химических наук, доцент  
**Шмидт Ольга Витальевна** – ведущий научный сотрудник научно-технологического отделения Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»)

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор  
**Дьяченко Александр Николаевич** – заведующий кафедрой химии и технологии редких элементов имени К.А. Большакова Российского технологического университета – МИРЭА

Кандидат технических наук,  
**Кузнецов Иван Владимирович** – старший научный сотрудник Института проблем безопасного развития атомной энергетики российской академии наук (ИБРАЭ РАН)

Ведущая организация: Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр российской академии наук (ФИЦ КНЦ РАН)

Защита состоится «11» февраля 2026 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д 99.1.056.03 в АО «Высокотехнологическом научно-исследовательском институте неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» по адресу: 123098, г. Москва, ул. Рогова 5а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ВНИИНМ» и на сайте <https://vniinm.tvel.ru>

Автореферат диссертации разослан «    » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим отправлять по адресу: 123098, г. Москва, ул. Рогова 5а.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 99.1.056.03  
кандидат технических наук



И.Г. Лесина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

При замыкании ядерного топливного цикла одной из важных задач является минимизация объемов радиоактивных отходов (РАО), образующихся при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Решение данной задачи предполагает разработку и анализ различных технологических схем, направленных как на сокращение количества образующихся отходов, так и на повышение качественных и эксплуатационных свойств конечного продукта. Важным критерием выбора метода переработки является соответствие продуктов переработки установленным требованиям к твердым радиоактивным отходам (ТРО), регламентирующим их дальнейшее обращение, включающее транспортирование, промежуточное хранение и окончательное захоронение. Существующие нормы и правила регламентируют предельно допустимые физико-химические и радиационные параметры отходов, включая их агрегатное состояние и морфологическую форму. Контролем качества кондиционированных ТРО является подтверждение их соответствия критериям приемлемости на определенный вид захоронения, что гарантирует возможность передачи их Национальному Оператору по РАО и безопасного обращения с ними на всех стадиях жизненного цикла.

Ключевые задачи совершенствования технологий кондиционирования РАО включают:

- снижение объемов конечного продукта;
- обеспечение его химической и механической стабильности, гарантирующей длительное безопасное хранение;
- повышение надежности и упрощение технологических операций;
- минимизацию вторичных радиоактивных отходов;
- сокращение числа операций в технологической цепочке.

Применение методов математического моделирования и использование специализированных программных средств представляет значительный интерес

при анализе альтернативных вариантов замыкающей стадии ядерного топливного цикла, что позволит сократить ресурсы на проведение рутинных расчетов и минимизировать число ошибок, связанных с человеческим фактором, а также увеличить количество рассматриваемых вариантов реализации технологий. Кроме того, возможности расчетного эксперимента позволяют выявить нестыковки или избыточность в различных требованиях, включая действующие нормы и правила, что ставит перед технологами иногда практически нерешаемые задачи. Поэтому использование математического инструмента также может быть полезно в дальнейшем и для корректировки и совершенствования нормативных требований.

Таким образом, возможность совершенствования технических решений методами математического моделирования с точки зрения минимизации затрат на обращение с РАО является актуальной задачей.

Основная часть работы выполнена в рамках проектного направления «Прорыв».

### **Цель работы**

Цель работы – разработка методики допроектной оценки объемов образующихся радиоактивных отходов и сравнения затрат на захоронение радиоактивных отходов в ядерном топливном цикле с помощью математического моделирования.

### **Задачи работы**

Для достижения данной цели в работе решались следующие задачи:

1. Разработать и реализовать в программном комплексе (ПК) ВИЗАРТ модели технологических процессов образования РАО и обращения с РАО с необходимой степенью детализации;
2. Разработать и реализовать в ПК ВИЗАРТ модели расчета стоимости кондиционирования РАО, включающие эксплуатационные затраты и затраты на захоронение с учетом тарифов для разных классов РАО;
3. Создать алгоритм учета и провести анализ влияния нормативных требований на объемы образующихся РАО;

4. Провести многовариантные расчеты по оптимизации схемных решений и подготовить предложения по сокращению образующихся РАО для разных радиохимических объектов.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые разработана методика расчетной оценки объемов РАО, образующихся по полной технологической цепочке технологии переработки ОЯТ с учетом образования вторичных РАО. Предложенный подход позволяет количественно оценивать влияние отдельных технологических операций на конечные объемы отходов, что обеспечивает возможность выбора оптимальных схем переработки с позиций минимизации РАО.

2. Сформирован и впервые представлен алгоритм комплексной допроектной оценки затрат на организацию замыкающей стадии ЯТЦ. Алгоритм учитывает эксплуатационные расходы и затраты на захоронение с разделением по классам РАО, а также обладает возможностью расширения за счет учета дополнительных статей затрат (капитальных вложений, расходов на упаковку и др.). Реализация данного подхода формирует основу для экономически обоснованного выбора стратегий обращения с РАО.

3. Впервые проведен анализ влияния действующих нормативно-правовых требований на объемы образующихся РАО. Полученные результаты позволяют определить необходимость корректировки действующей нормативной базы.

### **Степень разработанности темы исследования**

Для моделирования и оптимизации технических решений на химических производствах, а также для подготовки исходных данных для создаваемых впервые и для модернизации существующих производств используются различные программные комплексы. При этом в радиохимической промышленности в качестве программного средства в настоящее время используется Программный комплекс (ПК) ВИЗАРТ, для проведения расчетов баланса материальных потоков. При этом функционал ПК ВИЗАРТ позволяет определить объем и состав образующихся отходов, но не дает возможности оценить экономические затраты на замыкающую стадию ЯТЦ, что в

большинстве случаев является определяющим критерием при оптимизации технологий переработки ОЯТ и обращения с РАО. Как правило, такую оценку можно провести после завершения проектирования объекта.

### **Практическая значимость работы**

1. С 2023 года ПК ВИЗАРТ рекомендован в качестве расчетного средства для проведения ТЭО и сравнения вариантов технологических схем при разработках концепций или проектировании новых мощностей по переработке ОЯТ и обращению с РАО (перечень поручений Первого заместителя Генерального директора Госкорпорации «Росатом» № 1-8/14-ПП от 16.02.2023).

2. Расчеты, полученные в результате работы, вошли в исходные данные на проектирование МП ОДЭК и исходные данные на проведение технико-экономического обоснования МП ПЭК.

3. Результаты работы использованы при выборе и обосновании технологий фракционирования на действующем предприятии РТ-1. На основании проведенных расчетов две технологии включены в программу НИОКР по радиохимии ГК Росатом.

4. Результаты расчетов использованы для обоснования создания опытно-промышленного установки короткоживущей фракции ВАО в составе ОДЦ ФГУП «ГХК» (приказ № 1/1216-П от 25.06.2025 ГК «Росатом»).

5. Получено расчетное обоснование вариантов обращения с фракцией кюрия для МП ПЭК и МП ОДЭК.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика расчета оценки затрат на реализацию различных вариантов технических решений по обращению с РАО;

2. Алгоритмы расчета объемов отходов, с учетом РАО разного класса; алгоритмы расчета отверждения в различные матрицы и алгоритмы расчета затрат на обращения с РАО, включая долговременное хранение и захоронение;

3. Результаты расчетов объемов РАО для различных вариантов реализации технологий фракционирования на радиохимических производствах с обоснованием выбора одного из вариантов;

4. Результаты расчетов объемов РАО разных классов в соответствии с существующими НП для обоснования внесения изменений в нормативную документацию;

5. Расчетное обоснование методов обращения с фракцией кюрия в ЗЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность проведенных исследований подтверждается как обширной экспериментальной базой, так и корректностью применения методов математического моделирования, включая сравнение расчетных показателей с экспериментальными данными.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоит в разработке и реализации расчетных алгоритмов и программных модулей, проведении расчетных исследований, осуществлении анализа, интерпретации и обобщения наработанных данных, составлении отчетной документации, написании статей и представлении работы на российских и международных конференциях.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: Processing of GLOBAL 2017 (Seoul, Korea), X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), X и XI научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла» (г. Снежинск, 2022 г, 2023 г.), Отраслевые научно-технические конференции «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах» (г. Сочи, 2021 г., 2023 г), Научно-технический семинар «Новые направления развития в области толерантного топлива» (г. Москва, 2022 г.), Молодежная научно-практическая конференция «Материалы и технологии в атомной энергетике», (г. Москва, 2024 г.).

### **Публикации**

Всего 27 публикаций. Материалы диссертации изложены в 7 статьях, 5 из которых опубликованы в журналах, реферируемых ВАК, 1 статья опубликована в материалах международной конференции, в 6 тезисах докладов на российских и международных конференциях, а также получено 15 свидетельств о регистрации программ ЭВМ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов по главам, заключения, списка использованных библиографических источников (133 наименований). Общий объем работы составляет 137 страниц машинописного текста, включая 34 рисунка и 28 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены теоретические и нормативные основы, касающиеся образования и обращения с РАО. Проведен анализ международных и российских подходов к классификации РАО, методов их переработки и отверждения. Особое внимание уделено методикам расчёта объемов РАО, а также оценке актуальных технологических решений по выделению различных фракций в ходе переработки ОЯТ.

В данной главе также проведены анализ и сравнение программных средств, использующихся в химической и радиохимической технологиях, и позволяющих проводить как моделирование отдельных процессов, так и технологических систем.

**Во второй главе** изложены принципы построения модели замыкающей стадии ЯТЦ. Разработана методика по проведению технико-экономической оценки реализации замыкающей стадии ЯТЦ, которая позволит выбирать

наиболее оптимальную технологическую схему на основе технико-экономической эффективности. Методика представляет собой перечень и последовательность действий для проведения сравнительного анализа и разработки рекомендаций по выбору оптимального варианта реализации технологических схем и может быть применена при формировании инвестиционных проектов на создаваемых впервые или модернизируемых существующих производствах.

В схематичном виде методика представлена в виде последовательных действий (рисунок 1).

Кроме этого, в главе представлена методика сравнения затрат на замыкающую стадию ЯТЦ с помощью математического моделирования и расчетной оценки объемов образующихся РАО в зависимости от выбранной технологической схемы реализации ЯТЦ, в том числе с учетом различных стратегий фракционирования.

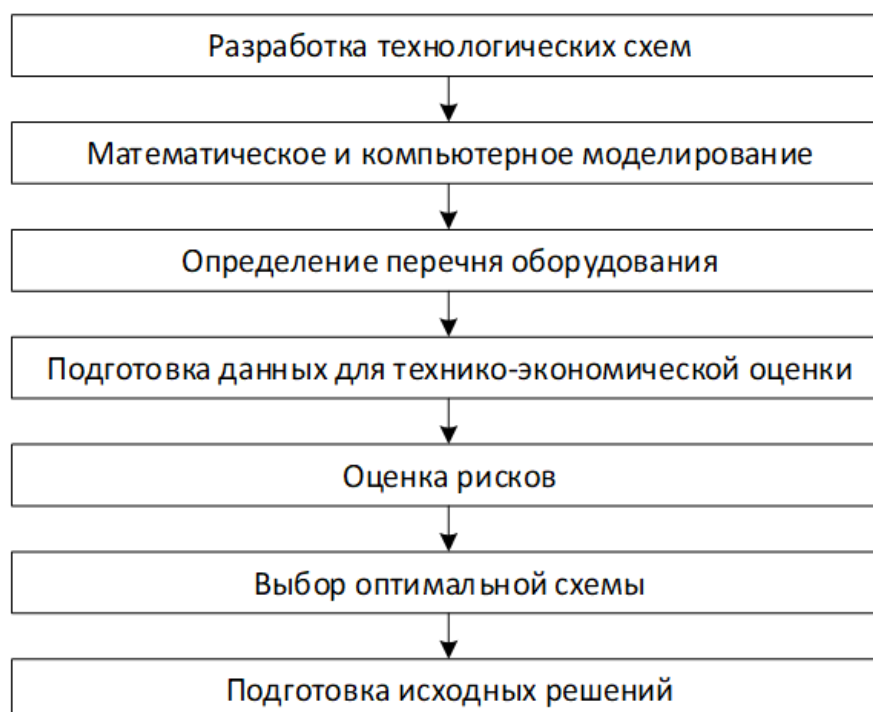


Рисунок 1 – Методика к обоснованию технической реализуемости вариантов технологий

**В третьей главе** представлено детальное описание алгоритмов расчета объемов РАО при различных способах отверждения жидких радиоактивных отходов. Рассмотрены следующие матричные материалы: стекло (на примере боросиликатного и алюмофосфатных стекло, как наиболее часто применяемых типов стекол), цемент и минеральная матрица (на примере магний-фосфатной матрицы (МКФ-матрица). Представлены расчёты содержания влаги в цементных и МКФ-матрицах, и объёма отверждённых форм. Алгоритмы основаны на существующих классификация отходов и реализованы в ПК ВИЗАРТ в виде отдельных модулей и используются как при проведении балансовых расчетов, так и при оценке стоимости обращения с РАО в разных технологиях.

**Четвёртая глава** посвящена реализованным в ПК ВИЗАРТ моделям расчета объемов РАО для различных вариантов реализации технологий фракционирования с обоснованием выбора одного из вариантов. Проведен анализ влияния глубины разделения на итоговые объемы отходов, а также рассмотрены экономические аспекты при выборе технологической схемы. Полученные с помощью ПК ВИЗАРТ результаты расчетов различных вариантов реализации замыкающей стадии ЯТЦ позволяют сравнить и выбрать наиболее выгодный сценарий, а также получить информацию о наиболее затратных операциях в рамках выбранных технологических решений.

В работе рассмотрено восемь вариантов фракционирования (таблица 1). Объемы образующихся отходов вычисляются для продуктов деления и остатков не выделенных компонентов. Для снижения накопленной дозы в стекле предусмотрен вариант переваривания стекла через 60 лет хранения. В случае фракционирования Cs-Sr эта фракция отверждается отдельно в БСС в первый или третий класс РАО. Значения эффективности выделения фракции Cr-Sr выбраны как 100% и 97% для упрощения расчетов. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Эффективность извлечения разных фракций при проведении расчетов различных вариантов фракционирования

№	Вариант фракционирования	Эффективность извлечения, %				Учет переварки
		U	Pu	MA	Cs-Sr	
1	Без фракционирования	99,9997	99,9975	0	0	нет
2	Выделение МА			99,9000	0	нет
3	Выделение МА и переварка стекла с ПД				0	да
4	Выделение МА и КФ (100%), переварка стекла с КФ через 60 лет				100	да
5	Выделение МА, КФ (97%), переварка стекла с КФ через 60 лет				97	да
6	Выделение МА, КФ (100%), формирование стекла с ПД как отходы 3 класса				100	нет
7	Выделение МА, формирование стекла с ПД как отходы 3 класса				0	нет
8	Выделение МА, КФ (100%), формирование стекла с ПД как отходы 1 класса				100	нет

Из результатов расчета объемов РАО при различных реализациях технологий фракционирования следует:

- выделение МА снизит объем РАО почти в два раза,
- выделение фракции Cs-Sr достаточно в степени 97%, более высокая степень выделения не приводит к значительному сокращению объема РАО,
- переварка фракции Cs-Sr через 60 лет контролируемого хранения снизит объем фракции более, чем в 4 раза.

Таблица 2 – Результаты расчета различных стратегий фракционирования

Фракция	Объем стекла по фракциям, м <sup>3</sup> /т ОЯТ	Тепло-выделение матрицы сразу после варки, КВт/м <sup>3</sup>	Итоговый объем стекла, л/т ОЯТ	Объем стекла по фракциям, м <sup>3</sup> /т ОЯТ	Тепло-выделение матрицы сразу после варки, КВт/м <sup>3</sup>	Итоговый объем стекла, л/т ОЯТ
	ОЯТ ВВЭР-1000 с выгоранием 50 ГВт сут/т U и выдержкой 7 лет			ОЯТ ВВЭР-1000 с выгоранием 70 ГВт сут/т U и выдержкой 7 лет		
1 без фракционирования						
ДМ	$5,98 \cdot 10^{-5}$	0,08	933,32	$7,24 \cdot 10^{-5}$	0,13	1337,50
МА	0,38	0,71		0,57	1,10	
ПД	0,55	2,75		0,77	2,81	
2 выделение МА						
ДМ	$5,98 \cdot 10^{-5}$	0,08	554,63	$7,24 \cdot 10^{-5}$	0,13	771,00
МА	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,71		0,00	1,10	
ПД	0,55	2,75		0,77	2,81	
3 выделение МА, переварка ПД						
ДМ	$5,98 \cdot 10^{-5}$	0,08	133,13	$7,24 \cdot 10^{-5}$	0,13	184,52
МА	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,71		$5,67 \cdot 10^{-4}$	1,10	
ПД	0,13	1,96		0,18	1,96	
4 выделение МА, КФ, переварка КФ (100%) через 60 лет						
ДМ	$5,98 \cdot 10^{-5}$	0,08	16,67	$7,24 \cdot 10^{-5}$	0,13	23,61
МА	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,71		$5,67 \cdot 10^{-4}$	1,10	
ПД	0,02	12,19		0,02	11,00	
CsSr	0,13	2,01	128,89	0,18	2,01	178,54
5 выделение МА, КФ(97%), переварка КФ через 60 лет						
ДМ	$5,98 \cdot 10^{-5}$	0,08	32,81	$7,24 \cdot 10^{-5}$	0,13	46,03
МА	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,71		$5,67 \cdot 10^{-4}$	1,10	
ПД	0,03	7,34		0,05	6,83	
CsSr	0,13	2,01	125,02	0,17	2,01	173,18
6 выделение МА, КФ, 3 класс КФ						
ДМ	$5,98 \cdot 10^{-5}$	0,08	16,67	$7,24 \cdot 10^{-5}$	0,13	23,61
МА	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,71		$5,67 \cdot 10^{-4}$	1,10	
ПД	0,02	12,19		0,02	11,00	
CsSr	1,01	1,31	1011,66	1,40	1,36	1401,31
7 выделение МА, 3 класс						
ДМ	$8,95 \cdot 10^{-5}$	0,05	2764,22	$1,77 \cdot 10^{-4}$	0,05	3534,53
МА	$5,92 \cdot 10^{-4}$	0,45		$8,11 \cdot 10^{-4}$	0,77	
ПД	2,76	0,55		3,53	0,61	
8 выделение МА и КФ, 1 класс						
ДМ	$5,98 \cdot 10^{-5}$	0,08	16,67	$7,24 \cdot 10^{-5}$	0,13	23,61
МА	$3,79 \cdot 10^{-4}$	0,71		$5,67 \cdot 10^{-4}$	1,10	
ПД	0,02	12,19		0,02	11,00	
CsSr	0,54	2,47	537,96	0,75	2,56	747,39

В главе 4 также проведены расчеты затрат на реализацию различных стратегий фракционирования и в этом случае рассмотрены следующие варианты фракционирования:

Вариант 1 – Без фракционирования, когда выделяются только U, Pu, а прочие элементы формируют РАО 1 класса.

Вариант 2 – Выделение МА: выделяются МА, а ПД формируют РАО 1 класса. Кюрий в смеси с ураном хранится контролируемо до переработки с целью извлечения плутония и урана, остатки кюрия после выделения целевых компонентов остекловываются.

Вариант 3 – Выделение МА и переварка ПД: выделяются МА, а ПД формируют стекло 1 класса с завышенными показателями по радиационной нагрузке, с учетом переварки стекла через 60 лет после контролируемого хранения. Кюрий в смеси с ураном хранится контролируемо до переработки с целью извлечения плутония и урана, остатки кюрия после выделения целевых компонентов остекловываются.

Вариант 4 – Выделение МА и Cs-Sr (100%): выделяются МА, кюрий в смеси с ураном хранится контролируемо до переработки с целью извлечения плутония и урана, остатки кюрия остекловываются; выделяется фракция Cs-Sr отверждается с учетом формирования РАО 3 класса через 300 лет контролируемого хранения, а прочие элементы формируют РАО 1 класса.

Расчеты затрат на реализацию рассматриваемых вариантов фракционирования (проведенных по методике, представленной в главе 2) для технологий переработки ОЯТ двух типов реакторов: БРЕСТ и ВВЭР-1000 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Затраты на замыкающую стадию ЯТЦ (в расчете на 1 т ОЯТ) для различных сценариев

Параметр	СНУП ОЯТ БРЕСТ-ОД-300 с выгоранием 8-10 % т.а. и выдержкой 3 года				ОЯТ ВВЭР-1000 с выгоранием 70 ГВт сут/т U и выдержкой 3 года			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Стоимость хранения до переработки, у.е./т ОЯТ	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
Стоимость переработки ОЯТ, у.е./т ОЯТ	1,300	1,300	1,300	1,300	1,000	1,000	1,000	1,000
Стоимость фракционирования МА, у.е./т ОЯТ		0,242	0,242	0,242		0,204	0,204	0,204
Стоимость фракционирования Cs-Sr, у.е./т ОЯТ				0,195				0,150
<b>Суммарная стоимость переработки, у.е./т ОЯТ</b>	<b>1,300</b>	<b>1,542</b>	<b>1,542</b>	<b>1,737</b>	<b>1,000</b>	<b>1,204</b>	<b>1,204</b>	<b>1,354</b>
Стоимость остекловывания стекла с ПД, у.е./т ОЯТ	0,060	0,040	0,035	0,012	0,051	0,044	0,039	0,011
Стоимость остекловывания стекла с Cm, у.е./т ОЯТ		0,002	0,002	0,002		0,003	0,003	0,003
Стоимость остекловывания стекла с Cs-Sr, у.е./т ОЯТ				0,260				0,097
<b>Суммарная стоимость остекловывания, у.е./т ОЯТ</b>	<b>0,060</b>	<b>0,041</b>	<b>0,037</b>	<b>0,274</b>	<b>0,051</b>	<b>0,048</b>	<b>0,042</b>	<b>0,111</b>
Стоимость хранения стекла с ПД, у.е./т ОЯТ	0,627	0,417	0,370	0,129	0,535	0,468	0,411	0,118
Стоимость хранения стекла с Cm, у.е./т ОЯТ		0,009	0,009	0,009		0,014	0,014	0,014
Стоимость хранения стекла с Cs-Sr, у.е./т ОЯТ				2,741				1,023
<b>Суммарная стоимость хранения, у.е./т ОЯТ</b>	<b>0,627</b>	<b>0,426</b>	<b>0,380</b>	<b>2,879</b>	<b>0,535</b>	<b>0,482</b>	<b>0,425</b>	<b>1,156</b>
<b>Итого</b>	<b>2,013</b>	<b>2,035</b>	<b>1,984</b>	<b>4,916</b>	<b>1,611</b>	<b>1,759</b>	<b>1,697</b>	<b>2,647</b>

При расчете получены следующие результаты:

- суммарные затраты на переработку ОЯТ и обращение с РАО для топливных циклов ВВЭР и БРЕСТ отличаются друг от друга незначительно;
- фракционирование МА в сочетании с гомогенным дожиганием нептуния и америция не увеличивает общие затраты на переработку ОЯТ и обращение с РАО (в допущении, что стоимость рефабрикации ОЯТ БРЕСТ с включением МА и без них не отличаются.). В случае гетерогенного дожигания также необходимо учесть стоимость топливного цикла гетерогенного дожигания;

– вариант с двойной перепаркой стекла (сценарий 3) может оказываться экономически выгодным с учетом растянутости затрат во времени;

– в настоящее время в соответствии с действующими расценками на передачу РАО 1-го и 2-го класса Национальному оператору затраты на операцию повторной перепарки стекла составляют от 2-5 % от общих затрат на переработку ОЯТ и обращение с РАО;

– затраты на контролируемое хранение РАО (до передачи Национальному оператору) составляют около 25% от общих затрат;

– экономически не выгодным является только вариант 4 с отверждением фракции Cs-Sr в матрицу, которая через 300 лет будет соответствовать РАО 3-го класса.

Результаты применения методики оценки затрат для глубокой экономической оценки вариантов фракционирования с выделением фракций МА и Cs-Sr (со сравнением экстракционных систем на основе ХДК и краун-эфиров), а также вариантов обращения с вторичными отходами, применительно к действующей технологии завода РТ-1 представлены на рисунках 2 и 3.

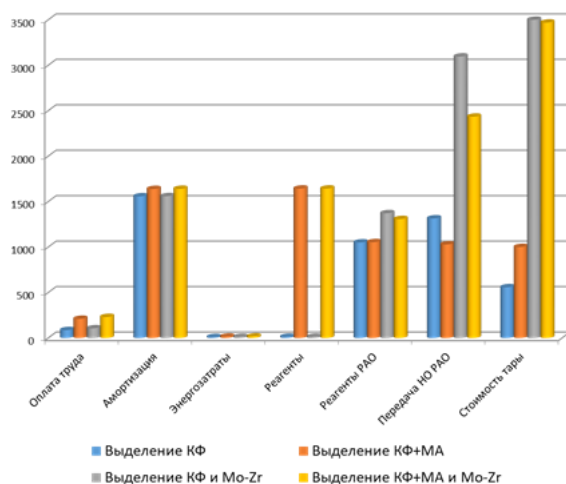


Рисунок 2 – Сравнение затрат на реализацию различных вариантов фракционирования

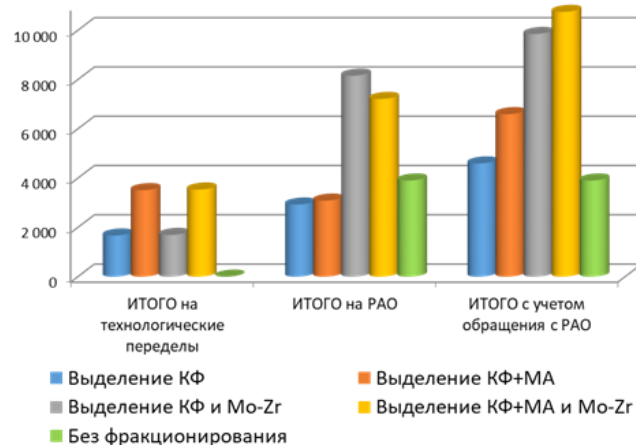


Рисунок 3 – Сравнение затрат на реализацию и обращение с РАО для различных вариантов фракционирования

Из представленных результатов расчета можно сделать выводы:

- дополнительная операция выделения МА увеличивает затраты на фракционирование КФ примерно на 40 %;
- дополнительная операция выделения Mo-Zr практически вдвое увеличивает затраты на технологию фракционирования (за счет РАО).

**В пятой главе** исследовано влияние требований к качеству остеклованных РАО, что позволило провести расчет объемов РАО для разных классов в соответствии с существующими НП для обоснования внесения изменений в нормативную документацию.

Результаты исследований включают в себя:

1) анализ влияния альфа-излучателей на объем РАО показал, что вклад ультрадолгоживущих альфа-излучателей можно не учитывать при оценке объема минимально допустимого объема стекла, особенно при оценке объема стекла по максимально допустимому включению альфа-излучателей в стекло, что требует корректировки НП-019.

2) расчет глубины фракционирования на объем РАО и анализ влияния класса получаемых отходов на объем РАО, на основании которых предложены методы обращения с фракциями трития, Cs-Sr, углерода и технеция.

**Шестая глава** посвящена расчетному обоснованию методов обращения с фракцией кюрия в ЗЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах. Представлены варианты отверждения этой фракции, оценены изменение тепловыделения и радиационной нагрузки во время хранения фракции до переработки с целью выделения плутония. Выполнена оценка сроков и условий хранения с точки зрения безопасности и минимизации затрат.

На рисунке 4 изображено накопление фракции U-Cm за время работы МП ПЭК с учетом переработки фракции и повторным использованием урана из фракции Cm в качестве матрицы. Из графиков видно, что повторное использование урана из ранее сформированной матрицы U-Cm после извлечения плутония приводит к снижению общего количества фракции. Срок хранения до

повторной переработки влияет на количество кюрия и на тепловыделение заново формируемой фракции.

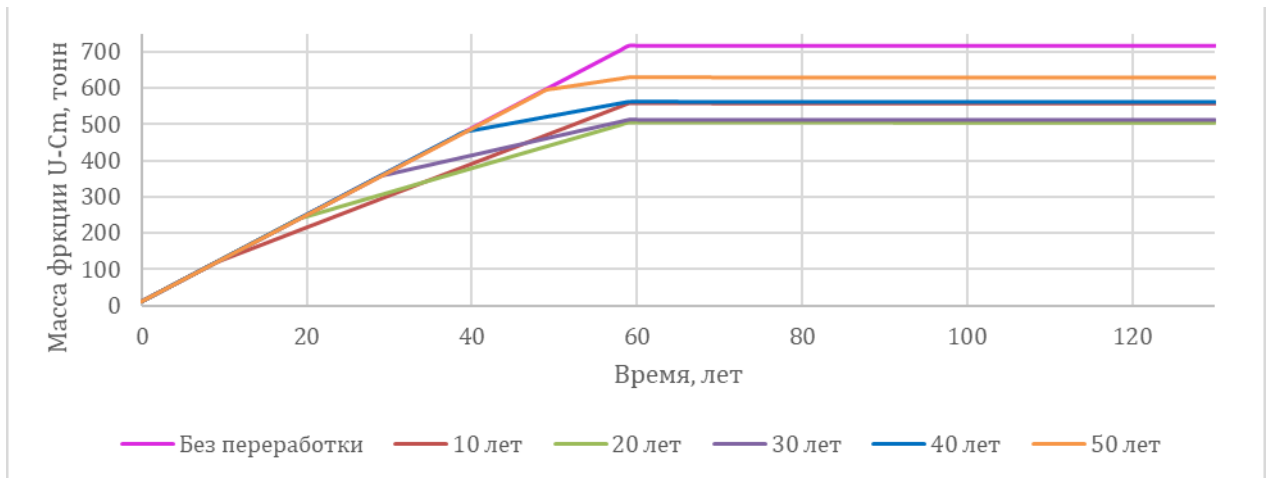


Рисунок 4 – Накопление фракции U-Сm за время работы МП ОДЭК

Необходимо отметить, что однозначный вывод о наиболее выгодной стратегии обращения с фракцией кюрия только по количеству образующейся фракции делать не корректно, поскольку необходимо учитывать иные, не рассматриваемые в данных расчетах, критерии, такие как стоимость повторной переработки, а также техническая возможность такой переработки.

Также в главе было оценено изменение общего объема остеклованных ВАО при переработке фракции кюрия и остекловывании остатков фракции в ВАО (1 класса). Изменение общего объема стекла при переработке фракции с кюрием и остекловыванием кюрия после извлечения Pu и U представлено на рисунке 5. На рисунке наглядно представлено увеличение общего объема стекла при помещении остатков кюрия в РАО после хранения фракции 10/20/30/40/50 лет до повторной переработки с целью извлечения плутония. При этом чем дольше будет храниться фракция до переработки, тем меньший вклад будет от остатков кюрия на общий объем остеклованных РАО.

Для оценки влияния накапливающегося во фракции за время хранения плутония на суммарное тепловыделение фракции было проанализировано изменение удельного тепловыделения компонентов фракции U-Сm (теповыделение, полученное от массы изотопов из 1 т ОЯТ, разделенное на суммарную массу изотопов) представлено на рисунке 6.

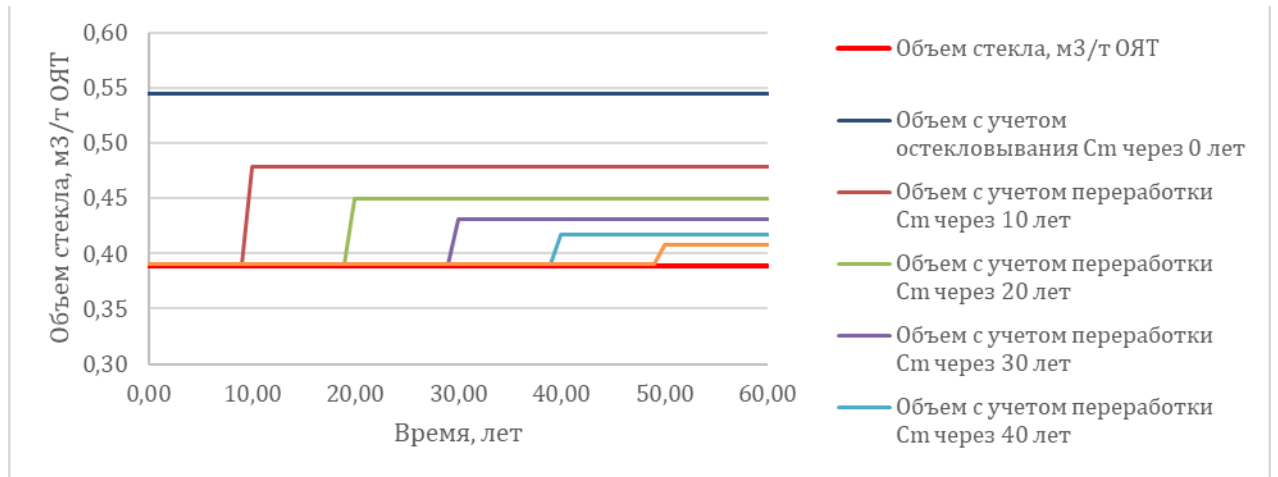


Рисунок 5 – Общий объем стекла от МП ПЭК

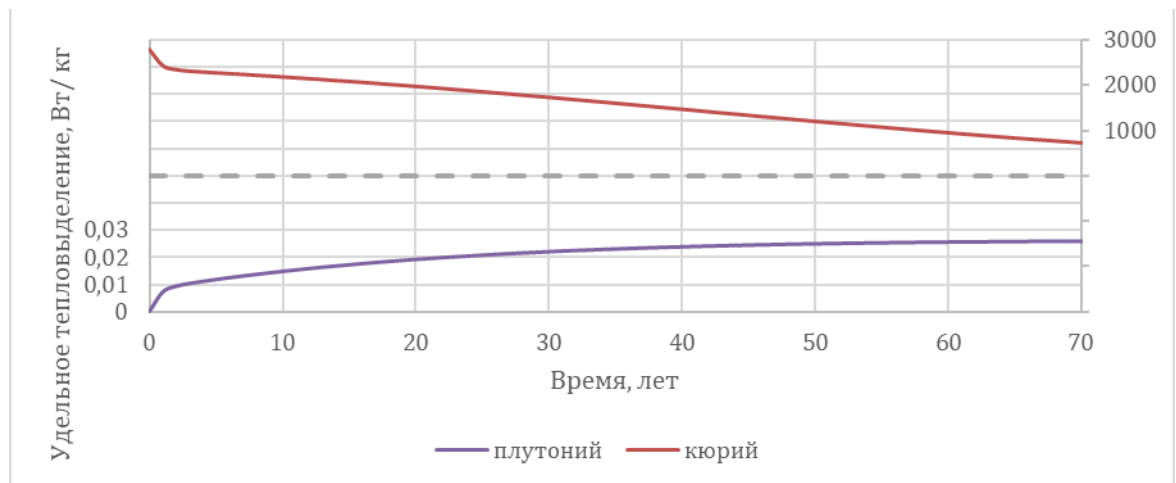


Рисунок 6 – Изменение тепловыделения компонентов фракции U-Cm

По результатам, представленным на рисунке 6, можно сделать вывод о пренебрежительно малом вкладе плутония в тепловыделении фракции U-Cm.

В главе рассмотрен вариант контролируемого хранения фракции кюрия в ампулах для хранения с целью сокращения объемов для хранения. Результаты показали возможность сократить объем контролируемого хранилища фракции кюрия на 40% за счет перетаривания уже выдержанных, не менее чем 20 лет, ампул с допированием свежего порошка кюрия. Однако, возможность практической реализации данного варианта требует серьезной технической проработки.

Из результатов расчетов, полученных в этой главе, можно сделать выводы, что использование ТУК ОТВС для хранения вместо хранилища приведет, во-

первых, к сокращению фракции кюрия в 4 раза, а, во-вторых, к отказу от строительства хранилища фракции Cm. При этом затраты на изготовление дополнительных ТУК могут быть разнесены по времени. При хранении фракции Cm (смешанной с ураном в соотношении 1:60) в ТУК от ОТВС увеличение количества ТУК каждый год в течение 60 лет составит 3 ТУК в год.

Использование U-Cm после хранения 70 лет без переработки при изготовлении топлива снизит затраты на переработку в целом.

Проведенные исследования будут использованы при обосновании технических решений при разработке ИД на проектирование МП ПЭК.

## **ВЫВОДЫ**

В ходе выполнения работы:

1) Разработана методика проведения сравнительного допроектного анализа и подготовки рекомендаций по выбору оптимального варианта реализации ЯТЦ, в том числе с проведением оценки затрат на замыкающую стадию ядерного топливного цикла.

2) Разработаны алгоритмы расчета объемов отходов с учетом РАО разных классов, алгоритмы расчета объемов, отвержденных в различные матрицы РАО и алгоритмы расчета затрат на обращение с РАО, включая долговременное хранение и захоронение РАО. В ПК ВИЗАРТ реализованы соответствующие модули.

3) При проведении расчетов стоимости различных вариантов реализации технологий фракционирования на заводе РТ-1 установлено, что менее затратным является вариант выделения короткоживущей фракции из рафината ПУРЕКС-процесса при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 на РТ-1 с использованием краун-эфиров. Однако, снижение стоимости не превышает погрешности оценок затрат при расчете всех предложенных вариантов технологий выделения КФ. Основные затраты на реализацию технологий фракционирования складываются из: количества аппаратов технологической схемы и числа передач (промежуточных емкостей); цены на реагенты (экстрагенты); стоимости обращения с РАО.

4) Проведенные расчеты объемов РАО разных классов в соответствии с существующими НП для показали, что существенное влияние на конечный объем ВАО оказывает учет в матрицах содержания ультрадолгоживущих ПД, например,  $^{148}\text{Sm}$  и  $^{144}\text{Nd}$ , поэтому корректировка НП-019-15 крайне необходима.

5) На основании расчетов предложены варианты обращения с фракцией кюрия на МП ПЭК при переработке СНУП ОЯТ, позволяющие сократить объемы временного хранилища на 40 % или вовсе отказаться от хранилища (при использовании ТУК ОТВС).

6) Полученные результаты вошли в исходные данные на проектирование МП ОДЭК и исходные данные на проведение технико-экономического обоснования МП ПЭК на АО «СХК» в рамках проектного направления «Прорыв».

7) Результаты работы использованы при выборе и обосновании технологий фракционирования на действующем предприятии РТ-1, выбрано две из четырех предложенных технологических схем, дальнейшая доработка которых включена в программу НИОКР ГК Росатом.

8) Результаты расчетов использованы для обоснования создания опытно-промышленной установки короткоживущей фракции ВАО в составе ОДЦ ФГУП «ГХК» (приказ № 1/1216-П от 25.06.2025 ГК «Росатом»).

9) С 2023 года ПК ВИЗАРТ рекомендован в качестве расчетного средства для проведения ТЭО и сравнения вариантов технологических схем при разработках концепций или проектировании новых мощностей по переработке ОЯТ и обращению с РАО (перечень поручений Первого заместителя Генерального директора Госкорпорации «Росатом» № 1-8/14-ПП от 16.02.2023).

**СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Программный комплекс ВИЗАРТ для балансовых расчетов материальных потоков технологий замкнутого ядерного топливного цикла. / О.В. Шмидт, С.Г. Третьякова, Ю.А. Евсюкова [и др.]. – Текст: непосредственный // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122 (2). – С. 88-92.
2. Формализация описания технологических операций при моделировании радиохимических производств. / А.А. Рыкунова, Ю.А. Евсюкова, О.В. Шмидт [и др.]. – Текст: непосредственный // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2021. – № 3(109). С. 63-75.
3. Алгоритм расчета объемов среднеактивных РАО, отвержденных в цементную или МКФ матрицу. / А.А. Рыкунова, В.А. Кашеев, А.Ю. Шадрин, О.В. Шмидт – Текст: непосредственный // Химическая технология. – 2022. – Т. 23. – № 2. С. 64-72.
4. Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ / В.А. Кашеев, М.В. Логунов, А.Ю. Шадрин [и др.]. // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 2 (19). – С. 6-16.
5. Расчетное обоснование характеристик технологических переделов замыкающей стадии ядерного топливного цикла с использованием программного комплекса ВИЗАРТ. / И.Р. Макеева, В.Ю. Пугачев, О.В. Шмидт [и др.]. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. С.5-18.
6. Оптимизация схемных решений в технологиях переработки отработавшего ядерного топлива с целью сокращения радиоактивных отходов. / Ю.А. Евсюкова, О.В. Шмидт, А.А. Рыкунова [и др.]. – Текст: непосредственный // Атомная энергия – 2024. – Т. 137 (1-2). С.26-31.
7. Алгоритм расчета объема остеклованных РАО / А.А. Рыкунова, О.В. Шмидт, В.А. Кашеев [и др.]. // Радиоактивные отходы. – 2024. – № 2 (27). – С. 18-25.

8. Calculation and Optimization of Technology Parameters for Closing Stage of Nuclear Fuel Cycle using VIZART code. Proceedings of GLOBAL 2017. September 24-29, 2017. – Seoul (Korea). – Paper EA-318-PD1.

9. Оптимизация затрат на замыкающую стадию ЯТЦ. Отраслевая конференция «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах». Сочи, 28-29 октября 2021.

10. Обоснование выбора технологий фракционирования с использованием математического моделирования. Радиохимия-2022. Санкт-Петербург, 2022.

11. Применение математического моделирования при оценке объемов РАО при различных сценариях фракционирования. X Научный семинар Моделирование технологий ядерного топливного цикла. Снежинск, 14-18 марта 2022.

12. Стратегии фракционирования при переработке ОЯТ. Расчетная оценка объемов образующихся РАО. XI Научный семинар Моделирование технологий ядерного топливного цикла. Снежинск, 27 февраля – 03 марта 2023.

13. Оптимизация схемных решений в технологиях переработки ОЯТ с целью минимизации РАО. Отраслевая конференция «Новая атомная энергетика». Сочи, 19-20 октября 2023.

14. ПК ВИЗАРТ – инструмент для сопровождения проектирования и обоснования безопасности радиохимических производств. Молодежная научно-практическая конференция «Материалы и технологии в атомной энергетике», Москва, 2024.



Рыкунова Анастасия Анатольевна

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ  
ОЦЕНКИ И ОПТИМИЗАЦИИ ОБЪЕМОВ РАО НА ЗАМЫКАЮЩИХ  
СТАДИЯХ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тираж 100 экз.