

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу РЫКУНОВОЙ АНАСТАСИИ АНАТОЛЬЕВНЫ
на тему:

«Использование математического моделирования для оценки и оптимизации
объемов радиоактивных отходов на замыкающих стадиях ядерного
топливного цикла»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных
элементов

Актуальность диссертационной работы Рыкуновой А.А. не вызывает сомнений, так как предложен инструмент для анализа и обоснования различных технологических решений с целью сокращения затрат на обращение с РАО на ранних стадиях разработки и проектирования радиохимических производств. В настоящее время ни у кого уже не вызывает сомнения, что использование математических методов и программных средств позволяет резко сократить и длительность физико-химических экспериментов и ресурсов на их проведение, а также минимизировать количество ошибок при рутинных расчетах, связанных с человеческим фактором. Кроме того, жесткие требования существующих норм и правил накладывают дополнительные ограничения при выборе тех или иных технологических решений, что сильно усложняет процесс анализа этих решений. Поэтому использование математического инструмента позволяет не только проводить оптимизационные расчеты по различным критериям, но и выявлять нестыковки или избыточность различных требований.

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

Научная новизна заключается в том, что:

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.

Практическая значимость работы определена тем, что:

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.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы Рыкуновой А.А. не вызывает сомнений так как подтверждается и обширной экспериментальной базой, и корректностью применения методов математического моделирования, включая сравнение расчетных показателей с экспериментальными данными.

Материалы работы опубликованы в 7 статьях, 5 из которых опубликованы в журналах, реферируемых ВАК, в 6 тезисах докладов на российских и международных конференциях. Кроме того автором получено 15 свидетельств о регистрации программ ЭВМ.

Диссертационная работа написана хорошим научным языком и представляет собой законченный труд, с корректными результатами и логичными выводами. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка использованных библиографических источников из 133 наименований. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, включает 34 рисунка и 28 таблиц.

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 и программным средствам, использующимся в химической и радиохимической технологиях.

Во **второй главе** изложены принципы построения модели замыкающей стадии ЯТЦ. Разработана методика по проведению технико-экономической оценки реализации замыкающей стадии ЯТЦ, которая позволяет выбирать оптимальную технологическую схему на основе технико-экономической эффективности.

В **третьей главе** дано описание алгоритмов расчета объемов РАО при различных способах отверждения жидких радиоактивных отходов: остекловывание (на примере боросиликатного и алюмофосфатных стекло, как наиболее часто применяемых типов стекол), цементирование и получение минеральных матриц (на примере магний-фосфатной матрицы).

В **четвёртой главе** с использованием реализованных в ПК ВИЗАРТ алгоритмов расчета объемов РАО представлен 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 **пятой главе** представлены результаты исследований по влиянию 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.

В **шестой главе** дано обоснование методов обращения с фракцией кюрия в ЗЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах. Представлено несколько вариантов отверждения этой фракции, оценены изменение тепловыделения и радиационной нагрузки во время хранения фракции до переработки с целью

последующего выделения плутония. Выполнена оценка сроков и условий хранения с точки зрения безопасности хранения и минимизации затрат.

Приведенный в диссертационной работе текст позволяет утверждать, что при выполнении исследований решены все поставленные задачи, в том числе:

1. Разработаны и реализованы в программном комплексе (ПК) ВИЗАРТ модели технологических процессов образования РАО и обращения с РАО с необходимой степенью детализации;
2. Разработаны и реализованы в ПК ВИЗАРТ модели расчета стоимости кондиционирования РАО, включающие эксплуатационные затраты и затраты на захоронение с учетом тарифов для разных классов РАО;
3. Создан алгоритм учета и проведен анализ влияния требований норм и правил на объемы образующихся РАО;
4. Проведены многовариантные расчеты по оптимизации схемных решений и даны предложения по сокращению образующихся РАО для разных радиохимических объектов.

Личный вклад автора заключается 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.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы.

По тексту диссертации имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. Не показана оценка погрешностей при моделировании, а также чувствительности результатов расчетов к исходным данным.
2. При описании экономических расчетов целесообразно было бы более четко обозначить границы применимости используемых тарифов и коэффициентов, поскольку их изменение может существенно влиять на итоговые выводы.
3. В некоторых выводах по работе используются формулировки (такие, как «оптимизация», «минимизация»), без количественных критериев.
4. В работе используются отдельные термины без предварительного уточнения или единых определений (например, «фракционирование РАО», «замыкающая стадия ЯТЦ»), что затрудняет восприятие текста для специалистов, не сильно погруженных в специфику конкретных производств.
5. Применима ли разработанная методика к другим технологиям переработки или только к рассмотренной в работе?

6. Опечатки по тексту диссертации:
- На с.33 « ...переработка жидких ВАО с **разделение** на фракции ...»
 - На с.52 «...направленных на извлечение топливных **компонент** (аналог ПУРЕКС-процесса),».

Высказанные выше замечания **не влияют на общую положительную оценку диссертации** и не снижают уровень научной новизны, практической значимости и качества исследований представленной диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа Рыкуновой Анастасии Анатольевны по теме «Использование математического моделирования для оценки и оптимизации объемов радиоактивных отходов на замыкающих стадиях ядерного топливного цикла» представляет собой законченное научно-техническое исследование и полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции), а ее автор – Рыкунова Анастасия Анатольевна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.8 — Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов (технические науки).

Официальный оппонент, заведующий кафедрой химии и технологии редких элементов им. К.А. Большакова, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА-Российский технологический университет», (119454, г. Москва, пр. Вернадского, 78, т. 8-499-600-80-80, mirea@mirea.ru, www.mirea.ru), доктор технических наук (специальность 05.17.02 – технология редких рассеянных и радиоактивных элементов), профессор



Дьяченко Александр Николаевич

«Подпись Дьяченко А.Н. удостоверяю»
Первый проректор РТУ-МИРЭА




Н.И. Прокопов

Я, Дьяченко А.Н., даю согласие на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертации и оформления аттестационного дела Рыкуновой А.А.