

## **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

### **1. Актуальность темы диссертации и цель работы**

Диссертация Рыкуновой Анастасии Анатольевны посвящена применению методов математического моделирования при проведении оценки объемов радиоактивных отходов на замыкающих стадиях ядерного топливного цикла с целью сравнения, оптимизации и выбора наиболее эффективного метода реализации схемных решений.

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

### **2. Общая характеристика содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материал работы изложен на 137 страницах, в том числе включает 28 таблицы и 34 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 133 наименования.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и задачи для ее достижения, представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор, содержащий описания методов и технологий обращения с РАО, обзор существующих программных средств, используемых в химической и атомной промышленности. В главе представлена постановка задачи исследования. По мнению оппонента литературный обзор заслуживает высокой оценки и может рассматриваться как самостоятельный научный труд. Проблематика образования и обращения с радиоактивными отходами, изложен предельно тезисно, корректно, но в то же время понятно даже неподготовленного читателя. Достаточно подробно раскрыты вопросы нормативного регулирования, технологий кондиционирования и и радиоактивных отходов. Представлен обширный массив ссылок на подзаконные акты и результаты тематических исследований. В связи с этим положения литературного обзора могут быть использованы в качестве основы для подготовки учебных материалов для студентов технических вузов, просветительских материалов для информирования общественности о состоянии ядерной и радиационной безопасности.

**Вход. №**

26/6630725/23.

**Вторая глава** содержит описание методики технической реализуемости вариантов фракционирования при переработке ОЯТ и процедуру оценки затрат на замыкающую стадию ЯТЦ. Автором обосновывается поэтапный подход, включающий 7 этапов: разработку технологических схем, математическое или компьютерное моделирование, определение перечня оборудования, подготовку данных для технико-экономической оценки, оценку рисков, выбор оптимальной схемы, подготовку исходных решений. Предлагаемая методика представляется достаточно выверенной и гибкой, позволяющей осуществлять итерационную оптимизацию решения путем последовательного анализа предшествующих этапов.

**Третья глава** посвящена разработке алгоритмов расчета объема РАО в ПК ВИЗАРТ.

**Четвертая глава** содержит описание разработанных в ПК ВИЗАРТ программных модулей.

**Пятая глава** посвящена расчетам объемов РАО разных классов по существующим нормативным требованиям.

**Шестая глава** содержит расчетное обоснование методов обращения с фракцией кюрия в ЗЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах.

**Заключение** отражает содержание работы, ее основные результаты и выводы из них.

### **3. Новизна научных положений, выводов и результатов**

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.

#### **4. Значимость для науки и практики** заключается в следующем:

Разработаны и реализованы в ПК ВИЗАРТ алгоритмы для решения задач по допроектной оценке затрат на замыкающую стадию ядерного топливного цикла с возможностью расширения входных параметров и, соответственно, с возможностью уточнения экономической эффективности.

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-промышленной 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.

#### **5. Степень обоснованности и достоверности результатов, научных положений и выводов**

Достоверность и обоснованность результатов диссертации Рыкуновой А.А. подтверждается применением методов математического моделирования, сравнительным анализом результатов с опубликованными научными разработками в данной сфере; публикациями полученных автором научных результатов в рецензируемых научных журналах, а также апробацией работы на российских и международных конференциях. Все выводы и рекомендации, сделанные автором работы, достаточно обоснованы.

#### **6. Личный вклад автора**

Заключается в постановке цели и задач, изложении научных положений и выводов, разработке и реализации в ПК ВИЗАРТ алгоритмов рассматриваемых процессов, подготовке технологической документации, непосредственное проведение расчетов и обработка полученных результатов расчетов объемов РАО.

## **7. Полнота опубликования основных результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы отражены в 7 статьях, 5 из которых размещены в журналах, реферируемых ВАК, 1 статья опубликована в материалах международной конференции, по материалам докладов на российских и международных конференциях опубликовано 6 тезисов, а также получено 15 свидетельств о регистрации программ ЭВМ.

## **8. Оформление диссертации**

Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертационным работам. Материал достаточно иллюстрирован рисунками и таблицами и изложен в рамках стандартной для работ научно-технического направления структуры.

## **9. Соответствие автореферата содержанию диссертации**

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

## **10. Замечания по диссертации**

В качестве замечаний необходимо отметить следующее:

1. Несмотря на то, что основной упор в работе делается на применении математического моделирования, а не на исследовании процессов разделения, показатели извлечения целевых компонентов в процессах переработки ОЯТ, выбранные автором, представляются все же несколько завышенными (пункты 4.1.1., 5.2.2 и др.). Столь высокие значения могут сформировать у читателя не совсем корректное, идеализированное представление о современном радиохимическом производстве. Учитывая авторитет организации, на базе которой осуществляется исследование, работа может послужить источником неточностей в работах авторов, ссылающихся на диссертацию.

2. Мнение автора о том, что варианты фракционирования лишь иногда предполагают выделение основных тепловыделяющих радионуклидов, не вполне соответствует наблюдающимся трендам в отечественной прикладной радиохимии. Извлечение короткоживущей фракции (или «цезий-стронциевой») относится к одним из основных направлений российских исследований в области фракционирования ВАО. Передел является неотъемлемой частью экспортно-ориентированного продуктового направления «СБЯТЦ», реализуемого Госкорпорацией «Росатом».

3. Обоснование тезиса о необходимости снижения тепловыделения кюрийсодержащего продукта до 25 Вт/л по аналогии с тепловыделяющими РАО представляется не вполне корректным. По имеющимся сведениям, источником данного ограничения служат теплофизические свойства боросиликатного стеклблока в геометрии

упаковки CSD-V (т.н. «евробидона» диаметром 34 см). Превышение указанного энерговыделения может привести к увеличению температуры в центре слитка до 550 °С и более, что с высокой долей вероятности вызовет раскристаллизацию матрицы, вне зависимости от интенсивности воздушного охлаждения в гнезде хранилища. При решении задачи долговременного хранения кюрийсодержащего материала может быть подобрана более удачная конфигурация упаковки, использованы дополнительные средства отведения тепла (ребра-радиаторы, водяное охлаждение и др.)

4. В подразделе 1.3.4, посвященном «Минеральным» матричным материалам усматривается ряд терминологических неточностей, логистических нестыковок и не вполне удачных обобщений. На фоне устоявшегося в академической среде термина «минералоподобные матрицы», вполне точно отражающего природу материала автором вводится альтернативная формулировка «минеральные матрицы». По мнению оппонента данное словосочетание не совсем логично и внутренне противоречиво, учитывая, что матрицы для кондиционирования РАО заведомо являются сущностями рукотворными, а прилагательное «минеральный», обычно, относится к объектам неживой природы, добываемым из земли и их производным. К «минеральным» матрицам отнесены твердые растворы порообразующих и акцессорных минералов, но, в качестве примера приводится МКФ-матрица, являющаяся синтетическим аналогом К-струвита, безусловно относящаяся к минералоподобным, но не имеющая отношения к твердым растворам.

Вопрос отнесения МКФ-матрицы к керамике и корректность формулировки «холодная керамика» по мнению оппонента на сегодняшний день дискуссионный. Ввиду особенности технологии получения, основанной на затворении твердых компонентов водой, материал скорее относится к цементам химического отверждения. На фоне всего класса минералоподобных матриц для иммобилизации ВАО пример можно назвать исключением. Большинство подобных материалов синтезируются высокотемпературными методами.

Указанные замечания не снижают научной, практической и теоретической значимости диссертационной работы.

## **11. Заключение о соответствии диссертации и автореферата критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней**

Работа изложена хорошим научным языком и содержит необходимое количество хорошо оформленных информативных иллюстраций.

Считаю, что представленная диссертационная работа «Использование математического моделирования для оценки и оптимизации объемов радиоактивных отходов на замыкающих стадиях ядерного топливного цикла», по объему, уровню

проведенных исследований, актуальности, научной новизне и практической значимости является законченным научным трудом 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 (ред. от 25.01.2024 г.), 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:

Старший научный сотрудник лаборатории № 41 долгосрочного регулирования и планирования в сфере ядерной и радиационной безопасности, кандидат технических наук по специальности 2.6.8 (Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов)

 17.12.2025 Кузнецов Иван Владимирович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)

Адрес: 115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, д. 52

Телефон: +7 (495) 955-22-86

e-mail: pbl@ibrae.ac.ru

Подпись к.т.н. Кузнецова И.В. удостоверяю

Ученый секретарь ИБРАЭ РАН

к.т.н.



Калантаров В.Е.