

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.1.056.03

созданного на базе института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ») государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», федерального государственного унитарного предприятия «Объединённый эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды» (ФГУП «РАДОН») государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело

№ _____

решение диссертационного совета от 11.02.2026 г. №2/2026

О присуждении Рыкуновой Анастасии Анатольевне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Использование математического моделирования для оценки и оптимизации объемов радиоактивных отходов на замыкающих стадиях ядерного топливного цикла», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.8 – «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов» принята к защите 19 ноября 2025 года, протокол № 5/2025, диссертационным советом 99.1.056.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ») государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», Федерального государственного унитарного предприятия «Объединённый эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды» (ФГУП «РАДОН») государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (123098, Москва, улица Рогова, 5а, приказ о создании диссертационного совета от 02.11.2012 №714/нк).

Соискатель Рыкунова Анастасия Анатольевна, 1988 года рождения, в 2011 году окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» по специальности «Основные процессы химических производств и химическая кибернетика», квалификация – Инженер. С 2020 по 2025 год Рыкунова А.А. проходила обучение в заочной аспирантуре Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» по направлению подготовки 18.06.01 – Химическая технология.

С 2020 года работает старшим научным сотрудником в отделе радиохимических технологий научно-технологического отделения Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» Государственной корпорации «Росатом».

Диссертация выполнена в научно-технологическом отделении АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», ГК «Росатом».

Научный руководитель – Шмидт Ольга Витальевна, кандидат химических наук, доцент по специальности 05.17.02 – «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов», ведущий научный сотрудник отдела моделирования технологий ядерного топливного цикла АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», ГК «Росатом».

Официальные оппоненты:

– Дьяченко Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и технологии редких элементов имени К.А. Большакова Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет», Министерство образования и науки (Минобрнауки);

– Кузнецов Иван Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории №41 долгосрочного регулирования и планирования в сфере ядерной и радиационной безопасности Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем безопасного развития атомной

энергетики Российской академии наук» (ИБРАЭ РАН), Министерство образования и науки (Минобрнауки)

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН), Министерство образования и науки (Минобрнауки), г. Апатиты, Мурманская область, в своем положительном отзыве, подписанном Калашниковой Галиной Олеговной, кандидатом технических наук, заведующей лабораторией синтеза и исследования минералоподобных функциональных материалов Центра наноматериаловедения, указала, что в работе Рыкуновой А.А. выполнены все требования, предъявляемые к диссертациям. Тексты диссертационной работы и автореферата соответствуют требованиям для написания диссертаций и авторефератов, содержат основные положения и разделы диссертационной работы, а также достаточное количество рисунков, таблиц и ссылок на литературные источники. Число публикаций и выступлений автора работы на конференциях говорит о достаточной апробации полученных данных. Диссертационная работа соответствует пунктам 8 и 10 паспорта научной специальности 2.6.8 – «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов». Область исследования соответствует пунктам 8 и 10 паспорта научной специальности 2.6.8 – «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов», отрасль науки – технические науки. Диссертация соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Рыкунова Анастасия Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.8 – «Технология редких, рассеянных радиоактивных элементов» (технические науки). Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета Центра наноматериаловедения ФИЦ Кольского научного центра РАН, протокол № 2 от 15 декабря 2025 года.

Соискатель имеет всего 29 опубликованных работ, в том числе 27 работ по теме диссертации, 5 из которых опубликованы в журналах, реферируемых ВАК. Общий объем опубликованных статей составляет 68 страниц.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах. Все работы опубликованы с соавторами. Личный вклад соискателя в наиболее значимых научных работах по теме диссертации составляет не менее 70 % и заключается в постановке задач, обосновании результатов расчета, изложении научных положений и выводов, разработке расчетных алгоритмов, интеграции их в программный код и проведение расчетов с последующим анализом результатов. Результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на 6 российских и международных конференциях. Монографий и депонированных рукописей соискатель не имеет.

Научные работы по теме диссертации:

Публикации в научных изданиях, входящих в список рецензируемых журналов ВАК и индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus:

1) Vizart Software for Balance Calculations of Material Flows in Closed Nuclear Fuel Cycle Technologies // Shmidt, O.V., Tret'yakova, S.G., **Rykunova, A.A.**, et al. Atomic Energy 122, 106–111 (2017). (**Web of Science, Scopus**).

2) Формализация описания технологических операций при моделировании радиохимических производств. / **А.А. Рыкунова**, Ю.А. Евсюкова, О.В. Шмидт [и др.]. //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2021. – № 3(109). С. 63-75. (**Перечень ВАК**)

3) Calculation Algorithm of Volumes of Medium-Level Radioactive Wastes Solidified Into Cement or Magnesium–Potassium Phosphate (MPP) Matrix. **Rykunova, A.A.**, Kashcheev, V.A., Shadrin, A.Y. et al. Theoretical Foundations Of Chemical Engineering 57, 725–731 (2023). (**Web of Science, Scopus**).

4) Расчетное обоснование характеристик технологических переделов замыкающей стадии ядерного топливного цикла с использованием программного комплекса ВИЗАРТ. / И.Р. Макеева, О.В. Шмидт, **А.А. Рыкунова** [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. С.5-18. (**Scopus**).

5) Optimization of spent nuclear fuel reprocessing for reducing radioactive waste. Evsyukova, Y.A., Shmidt, O.V., Rykunova, A.A. et al. Atomic Energy 137, 24–30 (2024). (Web of Science, Scopus).

Соискатель имеет 15 свидетельств о регистрации программ ЭВМ.

Полученные соискателем 15 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ посвящены разработке программного комплекса ВИЗАРТ, для решения задач расчетного обеспечения технических решений при разработке технологий ЗЯТЦ.

На диссертацию и автореферат поступило 5 положительных отзывов от специалистов в области химии и технологии редких и рассеянных элементов. В отзывах указывается, что представленная к защите диссертационная работа характеризуется высокой актуальностью, научной ценностью и имеет большое практическое применение при разработке и проектировании радиохимических технологий.

Отзывы направили:

1. Винокуров Сергей Евгеньевич – доктор химических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе ГЕОХИ РАН;

2. Петров Владимир Геннадиевич – кандидат химических наук, доцент, заведующий лабораторией дозиметрии и радиоактивности окружающей среды химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Минобрнауки;

3. Терентьев Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, заместитель директора ОДЭК АО «Сибирский химический комбинат», ГК «Росатом»;

4. Козлов Павел Васильевич – кандидат технических наук, доцент, начальник исследовательской лаборатории ЦЗЛ по обращению и кондиционированию РАО ФГУП «ПО «Маяк», ГК «Росатом»;

5. Фиськов Антон Александрович – кандидат технических наук, эксперт АО «Атомэнергопроект», ГК «Росатом».

В отзывах были сделаны следующие замечания (далее номера страниц и таблиц указаны по автореферату):

– Акцент на стоимостных показателях может показаться недостаточным без комплексной оценки безопасности и экологических рисков.

– Стоит отметить, что подобные модели существуют, а авторская методика отличается детализацией, но не принципиально новым подходом.

- Как учитывается фактор временной изменчивости (например, изменение тарифов, состава ОЯТ и т.п.)?
- Из текста автореферата не понятно, выполнена ли верификация и валидация моделей.
- В работе не учитываются капитальные затраты на реализацию рассматриваемых технологических участков, что может вносить существенный вклад при технико-экономическом обосновании различных объектов.
- Для переработки СНУП ОЯТ БРЕСТ-ОД-300 рассматривался ли вариант пирохимической переработки?
- Для расчета тепловыделения кондиционированных РАО учитывается ли материал самой матрицы (теплопроводность) или расчет ведется только на общее выделение энергии от распада на массу матрицы?
- В некоторых частях имеются неточности или недостаточно подробное описание результатов. В частности, в таблице 2 автореферата для варианта «2 выделение МА» в случае ОЯТ ВВЭР-1000 указано, что объем стекол для фракции МА составляет $0,00 \text{ м}^3/\text{т ОЯТ}$, при этом тепловыделение составляет $1,1 \text{ кВт}/\text{м}^3$.
- Насколько достоверны полученные результаты без экспериментальной проверки?
- Планируется ли выполнять верификацию разработанных методик допроектной оценки объемов образующихся радиоактивных отходов и сравнения затрат на захоронение?
- Из текста автореферата не понятна структура исходных данных и источники информации, использованные для расчетов. В автореферате не приведена информации о полной технологической цепочке переработки ОЯТ, для которой выполнены расчеты
- Существует необходимость подтверждения расчетных оценок натурными экспериментами или опытно-промышленными данными.
- Необходимо оценить реализуемость предложений: насколько реально внедрение в действующие производства предложенных технических решений, не учитываются ли технологические /организационные/ правовые барьеры?

– В частности, не вполне понятна логика автора в части тезиса о переварке стекла для снижения накопленной в нем дозы. Как данный фактор ограничивается в существующей нормативной документации? Каким образом процесс переваривания приводит к снижению объема остеклованных отходов? Существуют ли мировой опыт реализации подобного технического решения?

– Из материалов автореферата не вполне ясно, учитывается ли в расчетной программе весь спектр образующихся РАО (ГРО, ТРО, ЖРО), в частности, вторичных (от систем газоочистки, спецканализации, систем дезактивации и т.д.)?

– По тексту автореферата встречаются орфографические и пунктуационные ошибки.

– Разработанная и описанная в тексте автореферата автором методика проведения ТЭО замыкающей стадии ЯТЦ не в полном объеме раскрыта. Остается не вполне понятным методика предусматривает рассмотрение уже существующих технологических схем или она позволяет по результатам расчетов вносить корректировки в технологическую часть? Если да, то на какой стадии проекта это возможно выполнить?

– В тексте реферата присутствуют незначительные опечатки и неточности (например, стр.15 и рисунок 4).

– Для наглядного анализа по главе 3 недостаточно описано сравнение затрат на дополнительные ТУК ОТВС, стоимость передачи НО РАО и хранение фракции Cm , о которых говорит автор.

– В тексте автореферата автор не предоставил информацию об аттестации ПК ВИЗАРТ. Рекомендации ГК «Росатом» по его использованию ограничены поручением первого заместителя Генерального директора, однако, не понятно какой статус данный ПК имеет в ФБУ «НТЦ ЯРБ»

На все замечания соискатель ответил в ходе защиты.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широко известными достижениями в области общехимических и радиохимических технологий, в том числе переработки отработавшего ядерного топлива и обращения с радиоактивными отходами, наличием большого числа публикаций в соответствующей сфере исследований и, следовательно, способностью объективно

оценить специфику и профиль диссертационной работы, включая ее научную и практическую значимость. Таким образом, официальные оппоненты и ведущая организация полностью соответствуют пп. 22 и 24 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– 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.

– 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.

– 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.

– Проведенные расчеты объемов РАО разных классов в соответствии с существующими НП показали, что существенное влияние на конечный объем ВАО оказывает учет в матрицах содержания ультрадолгоживущих ПД, например, ^{148}Sm и ^{144}Nd , поэтому корректировка НП-019-15 крайне необходима, чтоб ликвидировать подобные коллизии.

– 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).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– **разработана** методика расчетной оценки объемов РАО, образующихся при переработке ОЯТ с учетом образования вторичных РАО. Предложенный подход позволяет количественно оценивать влияние отдельных технологических операций на образование конечных объемов отходов, что обеспечивает возможность выбора оптимальных схем переработки с позиций минимизации РАО;

– **сформирован и 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;

– **проведен анализ** действующих нормативно-правовых требований на объемы образующихся РАО. **На основании полученных результатов рекомендована** корректировка действующей нормативной базы.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– 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);

– расчеты, полученные в результате работы, вошли в исходные данные на проектирование МП ОДЭК и исходные данные на проведение технико-экономического обоснования МП ПЭК;

– 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;

– 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»);

– получено расчетное обоснование вариантов обращения с фракцией кюрия для МП ПЭК и МП ОДЭК.

Оценка достоверности результатов исследования подтверждается корректностью применения методов математического моделирования, включая сравнение расчетных показателей с литературными, экспериментальными данными, а также данными, полученными на существующих производствах.

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

В ходе защиты были заданы **следующие вопросы и критические замечания:**

1. Методика включает только затраты, нет коммерческой значимости. Можно ли в рамках разработки программы ее предусмотреть?
2. В чем важность работы для стадии захоронения РАО? Через сколько времени упаковка будет безопасна?
3. Есть ли необходимость исключить учет ультрадолгоживущих нуклидов из НП?
4. В каком виде в работе учитывался тритий? Как тритий будет себя вести согласно данной работе?
5. Как выполняется верификация программы? Какие расчеты подтверждены?
6. В работе рассмотрены два вида стекол, есть ли решения для переработки (переварки) стекол? На основании каких технологических решений?

Соискатель Рыкунова А.А. дала **ответы на заданные ей в ходе защиты диссертации вопросы и привела собственную аргументацию:**

На первый вопрос соискатель ответил, что методика ориентирована на сравнительный технико-экономический анализ технологических решений на ранних

стадиях проектирования, где ключевой задачей является выбор оптимальной схемы, а не оценка коммерческой прибыли. Однако, при необходимости в рамках программной реализации возможно расширение методики за счёт включения коммерческих показателей.

По второму вопросу соискатель пояснил важность работы, поскольку она позволяет количественно оценить состав, активность, тепловыделение и объёмы конечных форм РАО, что напрямую влияет на требования к упаковке, условиям хранения и параметрам захоронения. С точки зрения радиационной безопасности, снижение тепловыделения и активности короткоживущих нуклидов существенно уменьшает требования к инженерным барьерам. Так, время, через которое можно захоранивать короткоживущую фракцию в приповерхностном хранилище вместо глубинного захоронения, составляет около 300 лет, что является более выгодным способом захоронения. Важность работы заключается в том, что с помощью разработанного инструмента выявлено, что долгоживущие альфараспадчики РЗЭ должны быть исключены из НП-19-05, поскольку вклад их в активность отходов не велик, а количество значительно.

На третий вопрос соискатель ответил положительно, так как время жизни части нуклидов больше, чем время жизни вселенной, их радиационным вкладом можно пренебречь.

По четвертому вопросу соискатель пояснил, что тритий в работе учитывался в виде водных растворов, как РАО 3 и 4 класса, отвержденный в МКФ-матрицу. Поведение трития не изучалось в работе, и были приняты экспертные оценки от технологов.

По пятому вопросу соискатель пояснил, что верификация выполнялась путём сравнения результатов расчетов с литературными и экспериментальными данными, а также по экспертным оценкам для ряда технологий, разрабатываемых впервые.

На шестой вопрос соискатель ответил, что для переработки стекломатриц возможно решение повторного плавления с перераспределением радионуклидов. Такое технологическое решение позволяет сократить объем стекла за счет того, что первое остекловывание осуществляется с превышением включения РАО в стекломатрицу, а при прошествии 30-60 лет (несколько периодов полураспада

тепловыделяющих элементов) возможна переварка стекла уже с требуемыми НП характеристиками. Подобных технологий на данный момент в РФ не осуществлялось. Данный подход предложен к использованию для модуля переработки ОЯТ в ПН «Прорыв».

На заседании 11 февраля 2026 года диссертационный совет принял решение: за разработки, имеющие существенное значение для развития страны, в частности, за разработку методики допроектной оценки объемов образующихся радиоактивных отходов, позволяющей проводить сравнения затрат на захоронение радиоактивных отходов в ядерном топливном цикле, а также за разработку расчетных алгоритмов и реализацию их в программном комплексе – присудить Рыкуновой Анастасии Анатольевне ученую степень кандидата технических наук.

Диссертация полностью соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции). По своему содержанию диссертация отвечает паспорту специальности 2.6.8 — Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов в части «Конверсия достижений технологии редких металлов и ядерной технологии, использование опыта эксплуатации типичных для данной отрасли промышленности процессов (сорбция, экстракция, плазменные, пламенные процессы и т.п.) для создания малоотходных, ресурсосберегающих технологических схем других отраслей промышленности», а также в части «Снижение отходности производств, фиксация отходов в виде малоподвижных, безопасных для окружающей среды соединений или трансформация их в полезные продукты». Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для изучения и внедрения организациями и предприятиями, где ведутся работы по созданию и проектированию новых или модернизации существующих технологий по переработке ОЯТ и обращению с РАО, а также в ВУЗах, выпускающими профильных специалистов для технологий атомной отрасли.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 14 доктора наук по научной специальности 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов, участвовавших в заседании, из 20 человек,

входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – 0,
недействительных бюллетеней – 0.

Председательствующий
заседания диссертационного совета,
доктор химических наук



 Сергей Алексеевич Кулюхин

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



 Ирина Геннадьевна Лесина

«11» февраля 2026