

На правах рукописи



Павлов Дмитрий Игоревич

**Выбор и научно-техническое обоснование приповерхностного способа  
захоронения радиоактивных отходов классов 3 и 4**

Специальность 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,  
радиационная безопасность

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в Санкт-Петербургском филиале АО КИС «ИСТОК» - «ГИ «ВНИПИЭТ»

Научный руководитель: доктор технических наук, Сорокин Валерий Трофимович, АО «Атомэнергопроект»

Официальные оппоненты: Варлаков Андрей Петрович, доктор технических наук, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»), директор отделения

Козлов Павел Васильевич, кандидат технических наук, Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Производственное Объединение «МАЯК» (ФГУП «ПО «Маяк»), начальник исследовательской лаборатории

Ведущая организация: Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (ФГУП «НО РАО»)

Защита состоится 04.02.2026 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.496.1 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте <http://www.ibrae.ac.ru/contents/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н.



Линге И.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Неизбежным следствием использования ядерной энергии является образование радиоактивных отходов (РАО), представляющих потенциальную опасность для человека и окружающей природной среды.

По данным «Шестого национального доклада Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с РАО» на конец 2019 г на предприятиях Российской Федерации (РФ) накоплено около 555,75 млн. м<sup>3</sup> РАО суммарной активностью  $1,86 \cdot 10^{20}$  Бк. Ежегодное образование жидких РАО составляет 0,79 млн. м<sup>3</sup> с суммарной активностью  $9,00 \cdot 10^{18}$  Бк, твердых РАО – 0,73 млн. м<sup>3</sup>, общей активностью  $7,79 \cdot 10^{18}$  Бк. Более 90 % от объёма накопленных и образующихся РАО относятся к отходам низкого и среднего уровня активности и соответствуют классам 3 и 4 по классификации РАО для целей захоронения согласно Постановлениям Правительства РФ №1069 от 19.10.2012 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» и № 1929 от 29.10.2022 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069».

В 2011 году Федеральным законом №190-ФЗ от 11.07.2011 «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (далее - №190-ФЗ) определено создание в Российской Федерации Единой государственной системы обращения с РАО (ЕГС РАО), целью которой является организация и обеспечение безопасного и экономически эффективного обращения с РАО на всех стадиях, включая захоронение. С момента вступления в силу №190-ФЗ в РФ создана нормативная база в области окончательной изоляции РАО, сделаны первые практические шаги в данном направлении – в 2016 году введен в эксплуатацию первый приповерхностный пункт захоронения РАО (ППЗРО) в Свердловской области, завершено проектирование ещё двух ППЗРО в Челябинской области и Томской области. Суммарная вместимость данных трёх пунктов захоронения составляет 0,425 млн. м<sup>3</sup> упаковок РАО.

Сооружения захоронения всех трёх ППЗРО разработаны по однотипным решениям: упаковки РАО класса 3 размещаются под упаковками РАО класса 4 в заглубленных относительно поверхности земли железобетонных ограждающих конструкциях. Под ограждающими конструкциями предусмотрен подстилающий экран из глины, сверху – многослойный экран из глины, щебня, песка и других материалов.

Выбор данного проектного решения подтверждён выполненными оценками безопасности и обусловлен наличием отработанных технологий возведения данных сооружений, однако не является единственно возможным, учитывая многообразие технологий окончательной изоляции РАО и различные характеристики РАО класса 3 и РАО класса 4.

Для захоронения всего накопленного объёма удаляемых РАО классов 3 и 4, а также объёма ежегодно образующихся РАО необходимо строительство ещё нескольких ППЗРО. Кроме того, имеются планы по разработке проектов ППЗРО в других странах, для которых РФ является поставщиком услуг ядерного топливного цикла. В связи с этим актуальными остаются вопросы, касающиеся выбора оптимального способа захоронения РАО классов 3 и 4.

Принципиальное значение для развития ЕГС РАО имеет решение задач по созданию объектов окончательной изоляции РАО, отвечающих современным тенденциям и лучшим мировым практикам. Для решения этих задач необходим комплексный анализ зарубежного опыта захоронения РАО, определение тенденций, следующих из этого опыта, анализ российских проектов ППЗРО, на основании которых может быть выполнено научное обоснование выбора наиболее безопасных, современных и экономичных вариантов захоронения РАО. Учитывая объёмы накопленных и образующихся низко- и среднеактивных РАО, поиск экономичных решений по их окончательной изоляции является актуальной, практически значимой задачей.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

За годы проектирования и эксплуатации ППЗРО накоплен большой объём информации, касающейся вопросов безопасности, технологичности, экономичности захоронения РАО. Обзоры различных способов окончательной изоляции РАО опубликованы во многих изданиях как в РФ, так и за рубежом: в публикациях международного агентства по атомной энергетике (МАГАТЭ), европейского сообщества по атомной энергии (ЕСА), в работах национальных агентств и операторов по обращению с РАО.

Вопросы окончательной изоляции РАО лежат на стыке научных направлений: радиохимии, радиобиологии, радиоэкологии, геологии, технических наук, экономики, а также других наук и специальностей. Фундаментальные труды в области радиобиологии принадлежат Н.В. Тимофееву-Ресовскому, А.М. Кузину, К.Г. Циммеру. Основы радиоэкологии в отечественной науке заложены В.И. Вернадским, В.М. Ключевским, радиохимии – В.Г. Хлопиным, Б.П. Никольским. Прикладные вопросы науки, связанные с изучением миграции радионуклидов из сооружений захоронения, исследованы В.Г. Румыниным, С.Н. Калмыковым, В.Г. Савоненковым, Е.Б. Андерсоном и другими учёными. Характеристики и свойства материалов инженерных барьеров безопасности сооружений захоронения изучались М.В. Ожованом, К.В. Марты-

новым, Е.В. Захаровой, В.Т. Сорокиным. Экономические аспекты окончательной изоляции РАО рассмотрены в трудах Чистякова В.Н., В.С. Гупало, А.Ф. Нечаева.

Вопросы выбора способа окончательной изоляции РАО и технических решений по конструкции сооружений захоронения полностью не исследованы и актуальны для изучения.

**Целью** диссертационной работы является разработка и научное обоснование технических решений по захоронению низко- и среднеактивных отходов классов 3 и 4, направленных на оптимизацию экономических показателей и обеспечение безопасности заключительных стадий обращения с радиоактивными отходами.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) провести комплексный анализ существующих технологий окончательной изоляции низко- и среднеактивных отходов, выявить тенденции в технологиях окончательной изоляции и определить наиболее перспективные технологии, пригодные для реализации будущих российских проектов ППЗРО;
- 2) провести анализ технико-экономических показателей зарубежных и российских ППЗРО и выявить наиболее важные с точки зрения стоимости захоронения факторы;
- 3) оценить необходимость и достаточность инженерных барьеров безопасности (ИББ) ППЗРО, с учётом требований нормативной документации, определить функции и влияние ИББ на безопасность ППЗРО в целом;
- 4) разработать и обосновать предложения по наиболее экономичному способу захоронения РАО классов 3 и 4 и основным конструктивным решениям ППЗРО;
- 5) выполнить оценку экономической эффективности реализации предложений.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

- 1) Разработан метод выбора основных технических решений при проектировании ППЗРО на основе комплексного анализа факторов: обобщения мирового опыта по обращению с РАО на конечных стадиях, данных о тенденциях в технологиях окончательной изоляции РАО, анализа складывающейся в РФ практики создания ППЗРО, анализа достоинств и недостатков различных способов захоронения РАО, анализа требований нормативной документации и других факторов. На основе данного метода определены направления оптимизации существующих в РФ технических решений по созданию ППЗРО и определен облик сооружений захоронения РАО классов 3 и 4 для будущих проектов ППЗРО;
- 2) Систематизированы данные о назначении и функциях каждого ИББ ППЗРО исходя из анализа долговечности материалов ИББ и сценариев эволюции ППЗРО;
- 3) Выполнен сравнительный анализ применения в основании подстилающего экрана ППЗРО материалов с разными коэффициентами фильтрации, в частности цеолитовых сорбен-

тов и глинистых материалов. Исследована роль ограждающих конструкций и подстилающего экрана при реализации сценария переполнения ППЗРО для данных материалов;

4) Обосновано в части обеспечения безопасности окончательной изоляции и с экономической точки зрения применение нового парка контейнеров для захоронения РАО класса 4, предложены новые типы контейнеров для хранения, транспортировки и захоронения низкоактивных отходов (полимерные контейнеры, композитные огнестойкие контейнеры);

5) Исследована зависимость стоимости захоронения РАО классов 3 и 4 от компоновочных решений сооружений захоронения, габаритов покрывающего экрана ППЗРО, стоимости контейнеров, вместимости сооружений захоронения.

6) Определен вклад каждого ИББ в стоимость приповерхностного захоронения РАО.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что:

1) Предложен способ захоронения РАО классов 3 и 4 (наземный), обеспечивающий безопасность и предъявляющий минимальные требования к гидрогеологическим особенностям площадки размещения ППЗРО.

2) Установлены требования к характеристикам ИББ для РАО класса 3 и для РАО класса 4, приведены ключевые параметры ИББ, которые подлежат контролю для использования в качестве практических рекомендаций для проектирования и строительства типовых сооружений захоронения, а также разработке нормативной документации.

3) Разработаны типовые решения по конструкциям сооружений захоронения РАО классов 3 и 4, которые могут быть использованы при создании ППЗРО.

4) Предложены новые типы контейнеров для РАО класса 4 – более технологичные в изготовлении и более экономичные по сравнению с применяемыми в РФ контейнерами.

5) Определены пути сокращения полной стоимости обращения с РАО на конечных стадиях за счет снижения затрат на приобретение контейнеров, на возведение ограждающих конструкций, на создание покрывающих экранов. Предложены решения по сокращению площади, занимаемой сооружениями захоронения (за счет создания единого покрывающего экрана).

#### **Внедрение результатов.**

Результаты исследований внедрены при выполнении следующих работ:

1) Разработка концептуального проекта ППЗРО для стран-потребителей услуг сбалансированного ядерного топливного цикла (СБЯТЦ) («Выполнение работ по рамочному обоснованию безопасности для типового пункта захоронения радиоактивных отходов стран потребителей услуг СБЯТЦ»);

2) Научно-исследовательской работы по уточнению технических решений по захоронению РАО классов 3 и 4 Белорусской АЭС (ИМЯН «Сосны» Национальной Академии Наук Республики Беларусь, 2023 г);

3) При составлении проекта исходных технических требований на разработку нестандартизированного оборудования сооружений захоронения РАО классов 3 и 4 Белорусской АЭС (ИМЯН «Сосны» Национальной Академии Наук Республики Беларусь, 2023 г);

4) При разработке отраслевого стандарта «Инженерные барьеры безопасности пунктов хранения и захоронения радиоактивных отходов на основе глинистых материалов. Нормы проектирования и расчет конструкций».

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1) Результаты обобщения мировой практики окончательной изоляции НАО и САО: выбор наземных ППЗРО как наиболее универсальных с точки зрения требований к гидрогеологическим характеристикам площадки, дифференциация требований к ИББ для НАО и САО, оснащение ППЗРО системой отвода протечек;

2) Закономерности влияния различных факторов на удельную стоимость захоронения РАО классов 3 и 4, результаты ранжирования ИББ по их вкладу в общую стоимость обращения с РАО классов 3 и 4 на конечных стадиях: контейнеры, ограждающие конструкции, покрывающие экраны, форма РАО, буферные материалы, подстилающие экраны;

3) Требования к выполняемым функциям и характеристикам ИББ для захоронения РАО класса 3 и РАО класса 4 в части: долговечности, биологической защиты, защиты от проникновения грунтовых вод и атмосферных осадков, защиты от миграции радионуклидов, устойчивости к внешним воздействиям;

4) Концептуальные решения (и их обоснование) по окончательной изоляции РАО классов 3 и 4 для перспективного типового наземного ППЗРО: захоронение РАО класса 3 и РАО класса 4 в отдельных модулях с различными характеристиками ограждающих конструкций, буферных материалов, контейнеров, под единым покрывающим экраном и с единым подстилающим экраном из природных сорбентов, обеспечивающих отвод возможных протечек и препятствующих реализации сценария «перелива»;

5) Сравнительные оценки технико-экономических показателей перспективного типового наземного ППЗРО для РАО классов 3 и 4 и полузаглубленного ППЗРО с разработкой предложений по сокращению стоимости приповерхностного захоронения РАО.

**Методы исследования.** В работе приведены результаты комплексного исследования действующих в РФ и за рубежом технических решений по окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО. Основным методом исследования является научное обобщение и анализ ре-

зультатов исследований в данной и смежной областях науки. При выполнении оценок безопасности использовались методы моделирования с использованием специализированного расчётно-программного обеспечения: программный продукт «Доза 3.0» (паспорт аттестации программного средства ФБУ «НТЦ ЯРБ» № 338 от 12 сентября 2013 г.), программный продукт ABAQUS (аттестационный паспорт ФБУ «НТЦ ЯРБ» с регистрационным номером № 486, дата выдачи 19.12.2019 г.), программа для трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования GeRa/V1 (Регистрационный номер Ростехнадзора № 443 от 17.04.2018 г.). Алгоритм исследования заключается в:

- комплексном анализе факторов, определяющих основные технические решения по окончательной изоляции РАО классов 3 и 4;
- анализе мировых практик окончательной изоляции РАО;
- разработке матрицы возможных технических решений для создания ППЗРО на основе анализа мирового опыта и различных факторов, определяющих требования к захоронению РАО;
- определении тенденций в технологиях окончательной изоляции РАО за рубежом, анализе российской практики захоронения РАО и сопоставлении данной практики с мировыми тенденциями;
- разработке предложений по усовершенствованию подходов к захоронению РАО классов 3 и 4 с помощью матрицы возможных технических решений для создания ППЗРО;
- выполнении оценок безопасности и технико-экономическом анализе разработанных предложений.

**Личный вклад автора** заключается в:

- обзоре и систематизации данных о работах по обращению с РАО на заключительных стадиях в РФ и за рубежом, выбору и обоснованию наиболее перспективных технических решений из многообразия существующих технологий и способов захоронения РАО;
- разработке предложений по усовершенствованию конструкций ППЗРО, разработке облика типового наземного ППЗРО;
- разработке технических требований к новому парку контейнеров для захоронения РАО класса 4;
- разработке расчётных моделей для оценки безопасности сооружений захоронения ППЗРО, анализе и обработке результатов расчетов радиационной безопасности при эксплуатации ППЗРО, расчётов миграции радионуклидов, расчётов устойчивости сооружений захоронения к внешним воздействиям (расчёты по моделям автора выполнены: расчёты радиационной



безопасности – Ирошниковым В.В. в программном продукте «Доза 3.0», расчёты на устойчивость к внешним воздействиям – д.т.н. Шульманом Г.С. в программном продукте ABAQUS, расчёты миграции радионуклидов – к.т.н. Неуважаевым Г.С. в программе GeRa/V1).

– выполнении оценок стоимости наземного ППЗРО, исследовании влияния технических решений на затраты по захоронению РАО, разработке предложений по сокращению стоимости приповерхностного захоронения РАО.

**Степень достоверности.** Достоверность полученных результатов и выводов, полученных в рамках диссертационного исследования, подтверждается рассмотрением и согласованием результатов работ на научно-техническом совете АО «КИС «ИСТОК», использованием сертифицированных программных продуктов для выполнения трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования, расчетов эксплуатационной безопасности, расчётов сооружений захоронения на устойчивость к внешним воздействиям, публикацией основных полученных результатов в реферируемых изданиях и представлением на российских и международных научных конференциях.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались на:

- 1) Научно-техническом семинаре «Глины как природный и инженерный барьер для захоронения РАО», Брюссель, 2014 г.
- 2) Семинаре «Обращение с РАО в соответствие с национальной политикой, вариантами захоронения и критериями приемлемости», Вена 2018 г.
- 3) Семинаре «VI Российская Школа по глинистым минералам «Argilla Studium-2019» (секция «Глины и глинистые материалы в качестве сорбентов и изолирующих барьеров безопасности при утилизации токсичных отходов»), Москва, 2019 г.
- 4) Научно-техническом семинаре «Проблемы переработки и кондиционирования РАО», Санкт-Петербург, 2022 г.
- 5) Научно-техническом совете №10 Госкорпорации «Росатом», Москва, 2022 г.
- 6) Международной конференции «Подземные сооружения 2023», Казань, 2023 г.
- 7) Научно-техническом семинаре «Проблемы переработки и кондиционирования РАО», Санкт-Петербург, 2024 г.
- 8) Международной конференции «Nonlinear phenomena in complex systems», Минск, 2024 г.

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 21 печатной работе, включая 17 статей в рецензируемых научных журналах ВАК, 4 публикации в сборниках трудов и тезисов докладов на российских и международных конференциях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, приложения. Общий объём работы составляет 182 страницы основного текста, включая 37 таблиц и 76 рисунков. Список использованных источников содержит 215 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень её разработанности, сформулированы основная цель, задачи, научная новизна, практическая значимость, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, личный вклад автора, апробация и публикации результатов работы.

В Главе 1 приведена информация, необходимая для конкретизации задач исследования и определения путей их решения.

Выполнен анализ складывающейся в РФ практики приповерхностного захоронения РАО, нормативной базы, приведены данные по объёмам накопленных и образующихся РАО. Выполнен аналитический обзор сведений о сложившейся практике окончательной изоляции РАО за рубежом. Приведена информация по использованию наземных, полузаглублённых (траншейных) и подземных пунктов захоронения РАО.

Показано многообразие подходов к окончательной изоляции РАО, выявлены тенденции на отказ от использования полузаглублённых ППЗРО в странах Европы, определены и описаны решения по конструкции типовых ППЗРО. Отмечено, что в зарубежных проектах разработаны решения по отводу протечек из сооружений захоронения.

Систематизированы данные по достоинствам и недостаткам различных способов захоронения РАО, определены статистические данные по глубине размещения сооружений захоронения в мире. Показано, что для задач окончательной изоляции РАО классов 3 и 4 целесообразно для будущих ППЗРО рассмотреть вариант наземного размещения сооружений захоронения (рисунк 1).

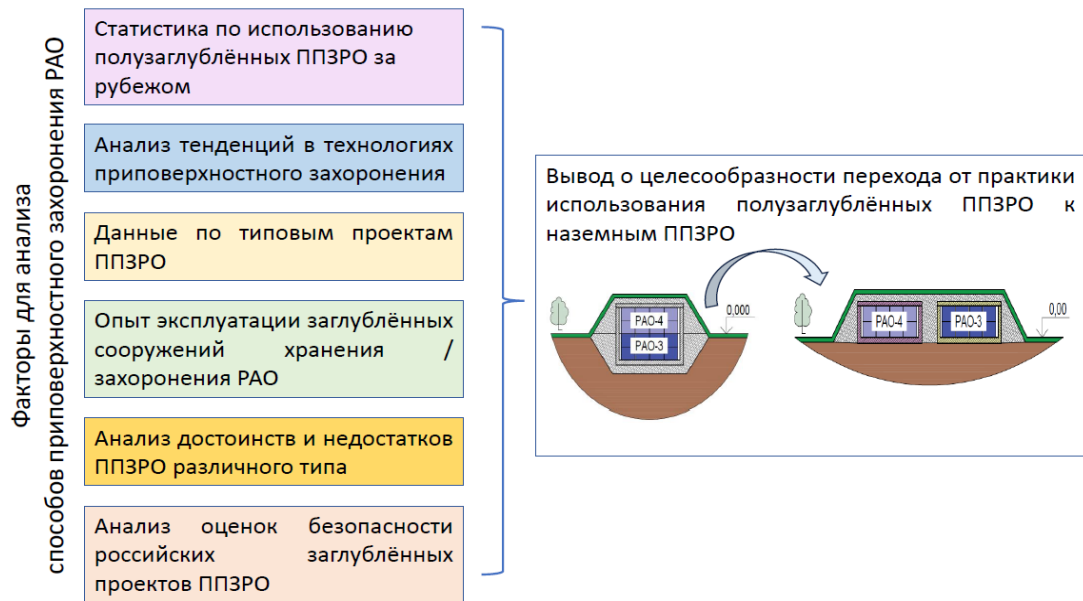


Рисунок 1 – Факторы, на основе которых определена целесообразность перехода от практики использования полуглублённых (траншейных) сооружений захоронения к наземным

В Главе 2 проведен анализ системы инженерных барьеров безопасности (ИББ) ППЗРО, предъявлены требования к каждому ИББ и определены их характеристики для перспективного типового наземного ППЗРО.

В разделе 2.1 систематизированы требования российской нормативной базы в области обращения с РАО на завершающих стадиях. Обобщены и сведены в структурную схему (матрицу) данные по возможным вариантам выбора технических решений для приповерхностного захоронения РАО (рисунок 2).

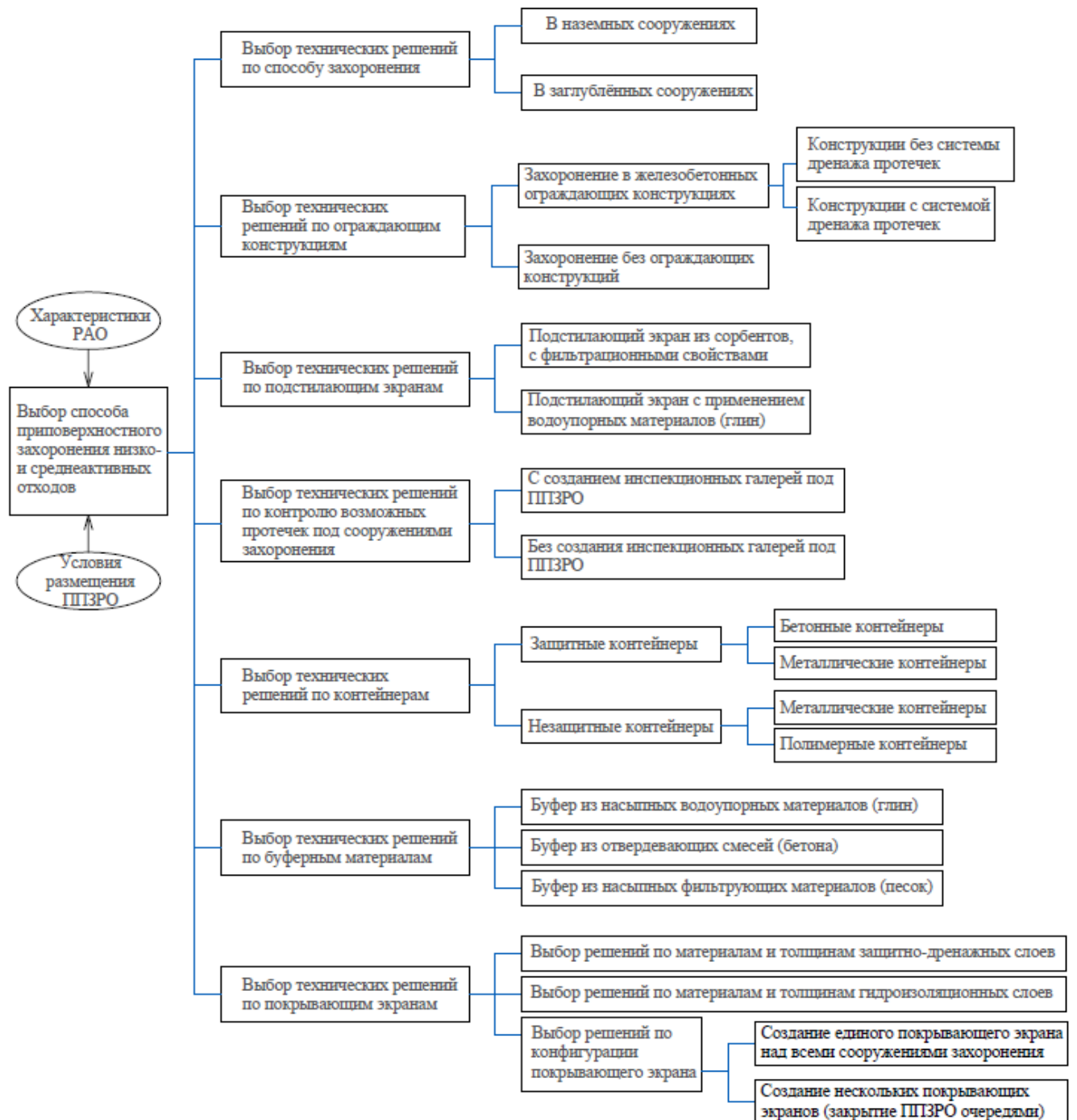


Рисунок 2 – Матрица технических решений для приповерхностного захоронения РАО

В разделах 2.2 и 2.3 исследованы вопросы долговечности ИББ ППЗРО и проведен анализ функций барьеров безопасности ППЗРО в привязке к срокам службы ИББ.

Определена зависимость сроков контроля за ППЗРО от характеристик захораниваемых РАО. Предложен подход, позволяющий устанавливать требования к сохранности свойств ИББ во времени и установлению пределов и условий безопасной эксплуатации ИББ (рисунок 3).

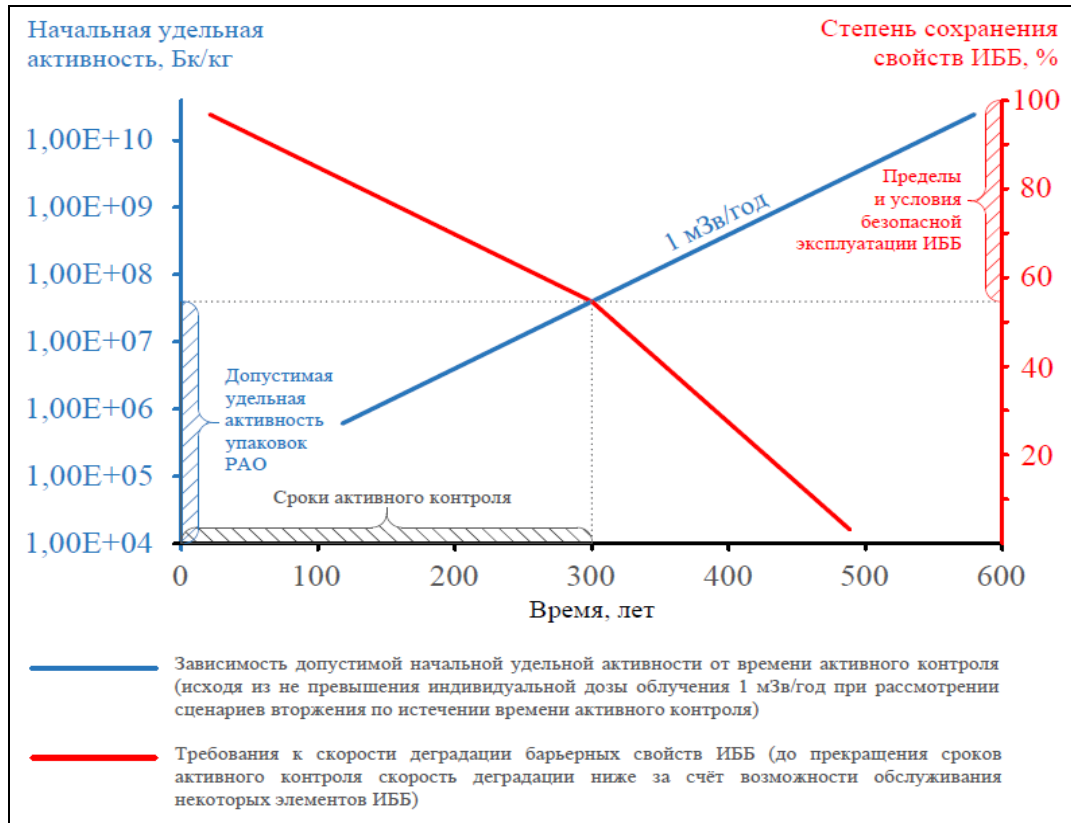


Рисунок 3 – Взаимозависимость начальной удельной активности захораниваемых РАО, сроков активного контроля и требований к эволюции свойств ИББ

На основе анализа отказов ИББ и данных по долговечности различных материалов и конструкций разработаны предложения по назначению функций ИББ на различных этапах эксплуатации ППЗРО. Определены основные параметры, отвечающие за качество и надёжность ИББ.

В разделе 2.4 выполнен анализ стоимостных показателей ППЗРО, определены затраты на обращение с РАО на конечных стадиях, включая этап создания упаковки РАО и этап закрытия ППЗРО – создание покрывающего экрана. Исходя из этого, выполнена декомпозиция затрат на все ИББ (рисунок 4).

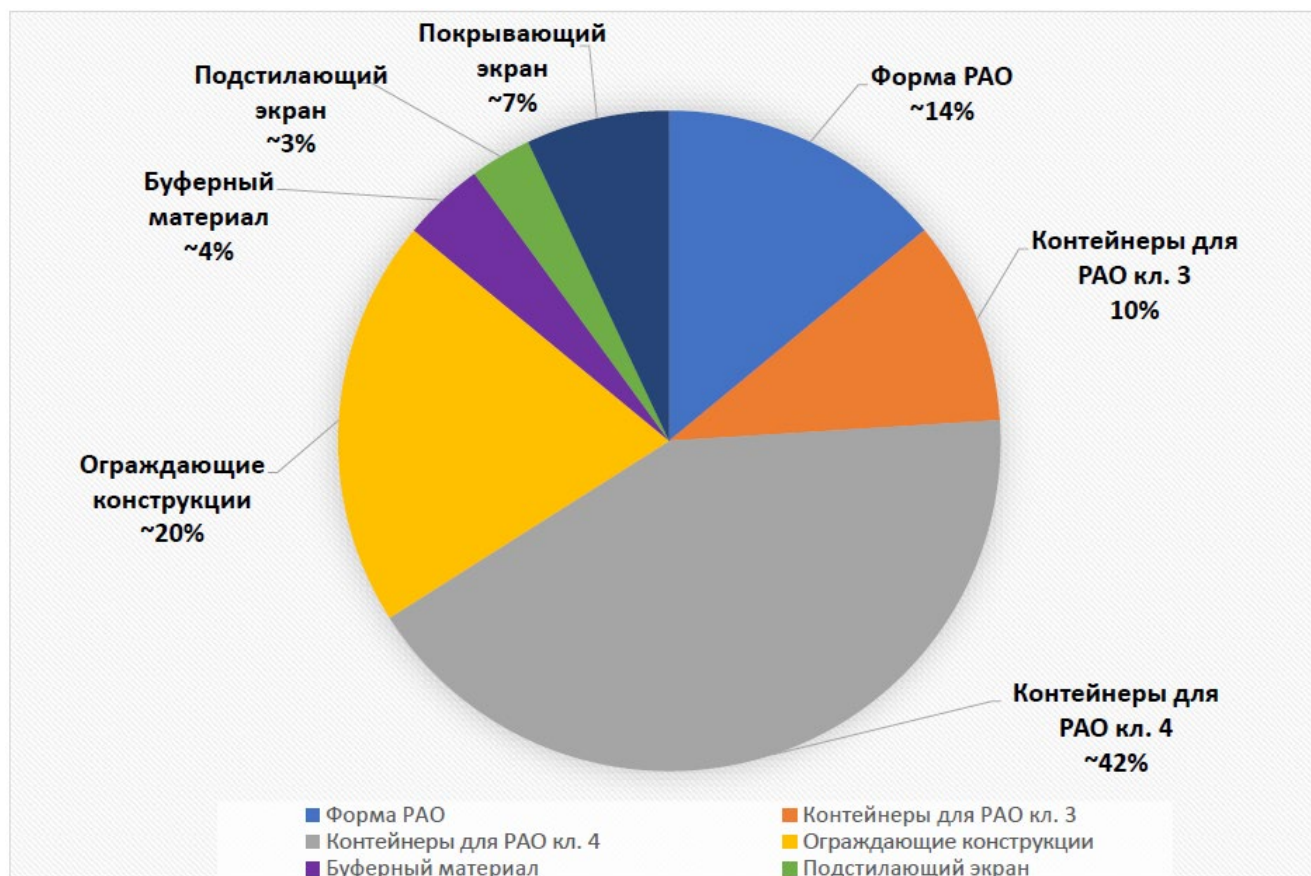


Рисунок 4 – Декомпозиция затрат на ИББ ППЗРО

По результатам анализа затрат определены приоритетные направления для оптимизации стоимости обращения с РАО на конечных стадиях.

В Главе 3 разработаны предложения по способу захоронения РАО классов 3 и 4, основным конструктивным решениям сооружений захоронения, приведены основные положения в обоснование облика перспективного типового ППЗРО.

В разделе 3.1 приведено общее описание и облик перспективного наземного ППЗРО для РАО классов 3 и 4 (рисунок 5). Приведены наиболее важные характеристики ППЗРО: радионуклидный состав, удельная активность и номенклатура РАО, характеристики площадки ППЗРО, состав инженерных барьеров безопасности.



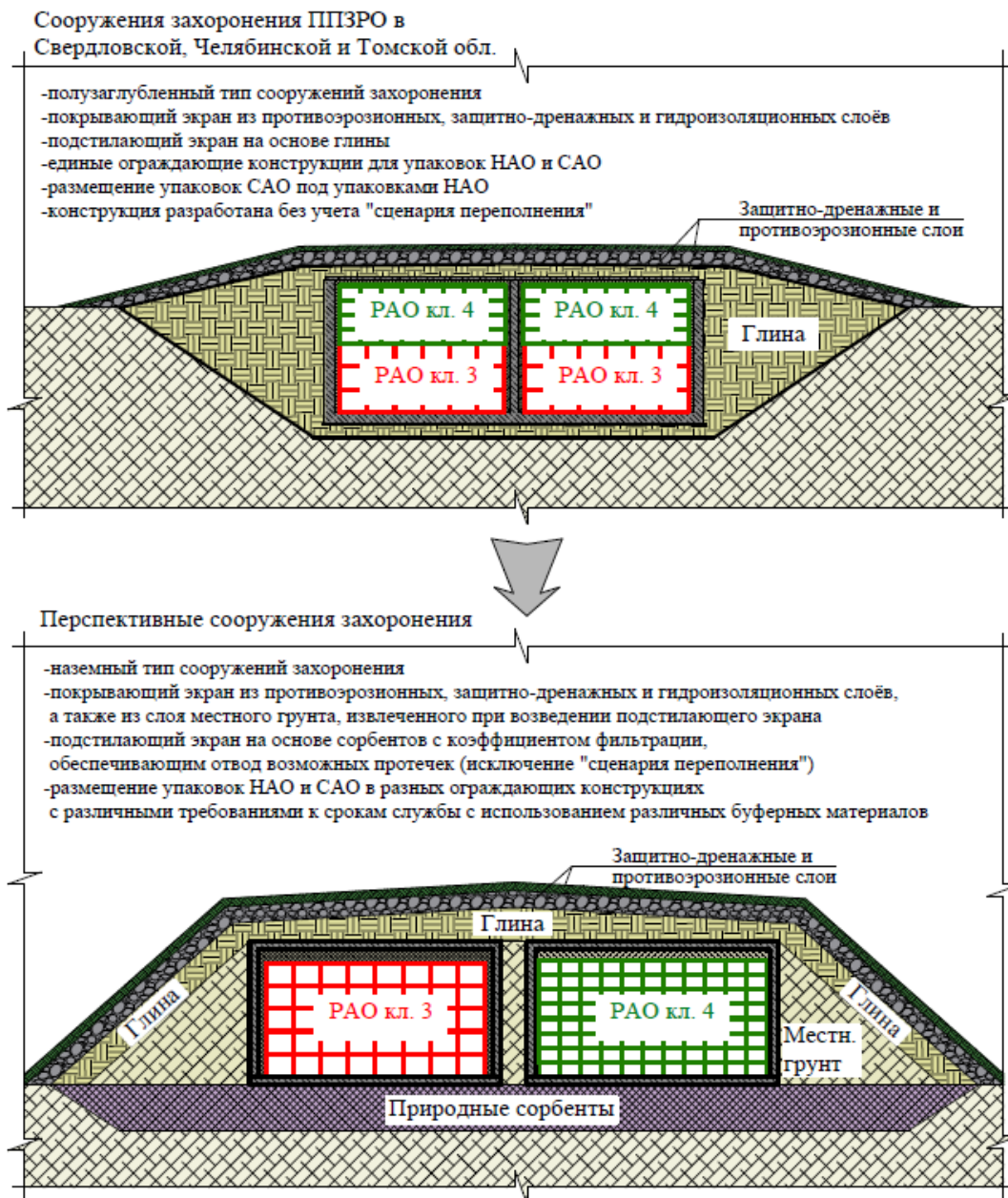


Рисунок 5 – Облик перспективных сооружений захоронения ППЗРО в сравнении с сооружениями захоронения, проектируемыми в настоящее время в РФ

В разделе 3.2 приведены предложения по усовершенствованию контейнерного парка для захоронения РАО. Показано, что взамен металлических контейнеров для НАО могут использоваться полимерные контейнеры. Предложена конструкция полимерных контейнеров (рисунок 6) и разработаны требования к таким контейнерам, рекомендована технология для их производства на основе метода ротационного формования. Предложена новая для контейнерного парка РАО технология герметизации контейнеров методом проплавления шва между крышкой и корпусом.



Рисунок 6 – Контейнеры для низкоактивных РАО: контейнер КРАД-1,36 (слева) и предлагаемый в качестве альтернативы полимерный контейнер (справа)

Для горючих низкоактивных отходов взамен контейнера типа НЗК предложено использование композитного контейнера из огнеупорного материала, который при габаритных размерах контейнера НЗК, обладает большей вместимостью (рисунок 7).

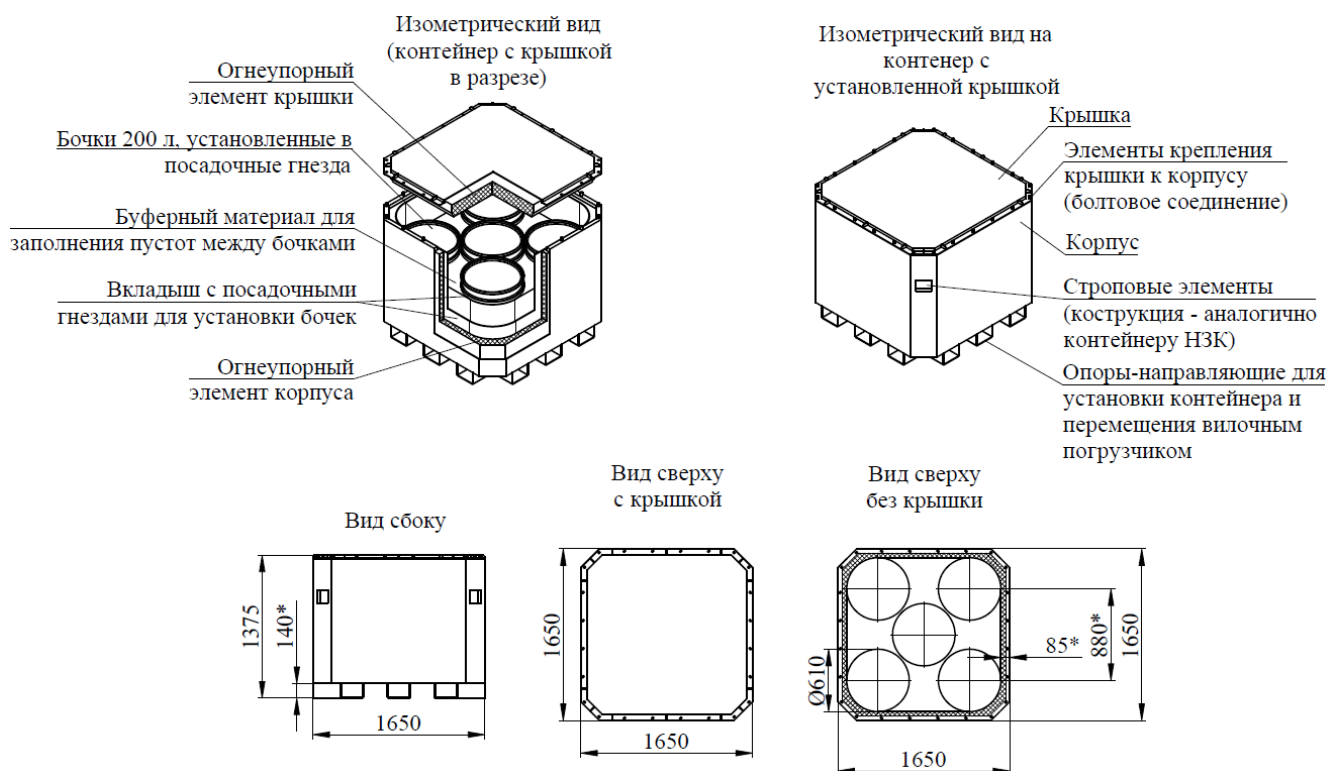


Рисунок 7 – Эскиз композитного огнестойкого контейнера для горючих НАО

В разделе 3.3 разработаны технические решения по ограждающим конструкциям ППЗРО. Предложено применять для РАО класса 3 и РАО класса 4 ограждающие конструкции с унифи-



цированными размерами, но различными показателями по долговечности и прочности, с различной классификацией по влиянию на безопасность (рисунок 8).

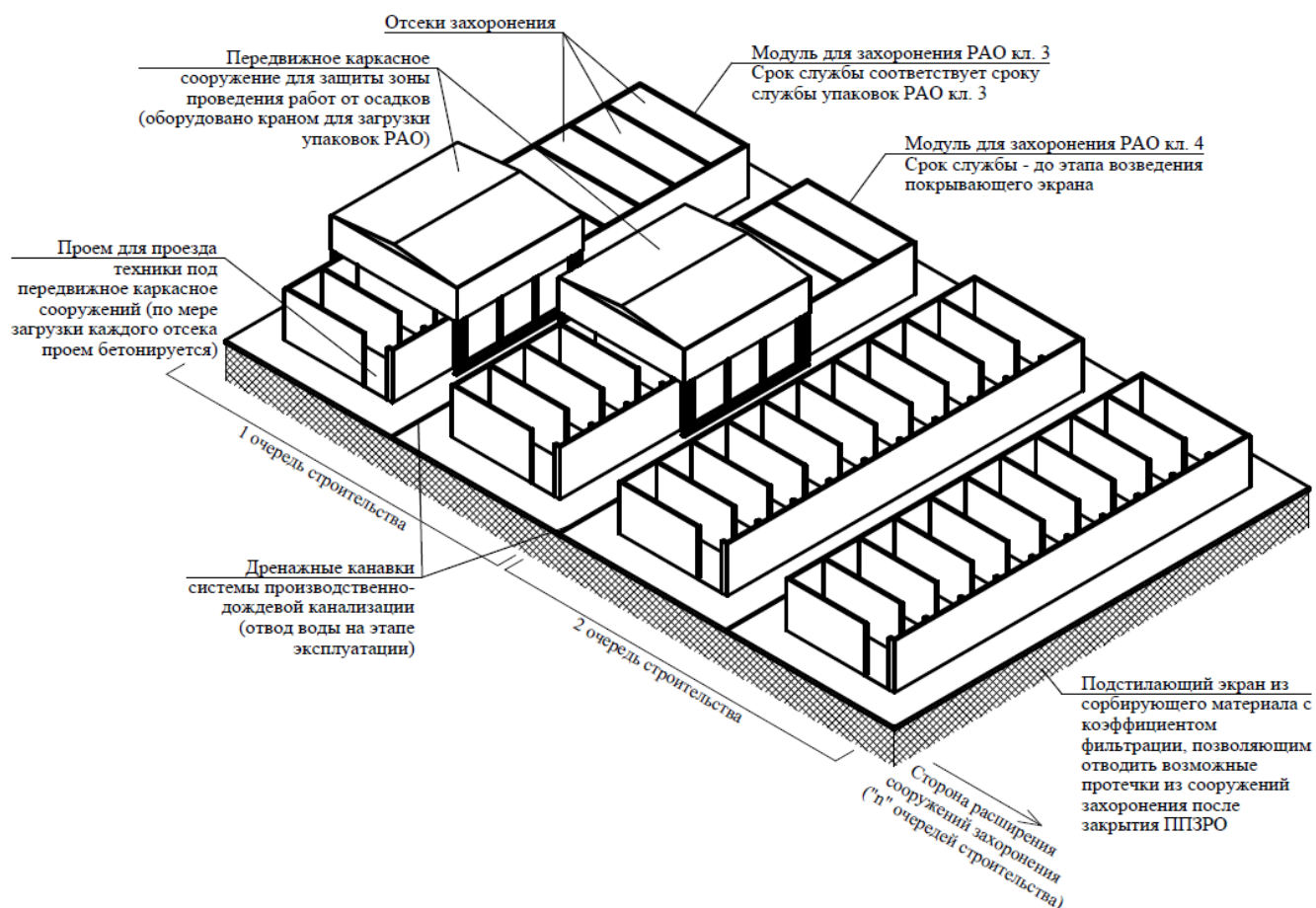


Рисунок 8 – Облик ограждающих конструкций перспективного ППЗРО

В разделах 3.4 и 3.5 разработаны технические решения по покрывающему и подстилающему экранам перспективного типового ППЗРО, даны предложения по составу слоёв экранов, толщинам слоев, материалам и их характеристикам.

Для покрывающего экрана исследована зависимость расхода материалов от различных вариантов компоновки (рисунок 9).

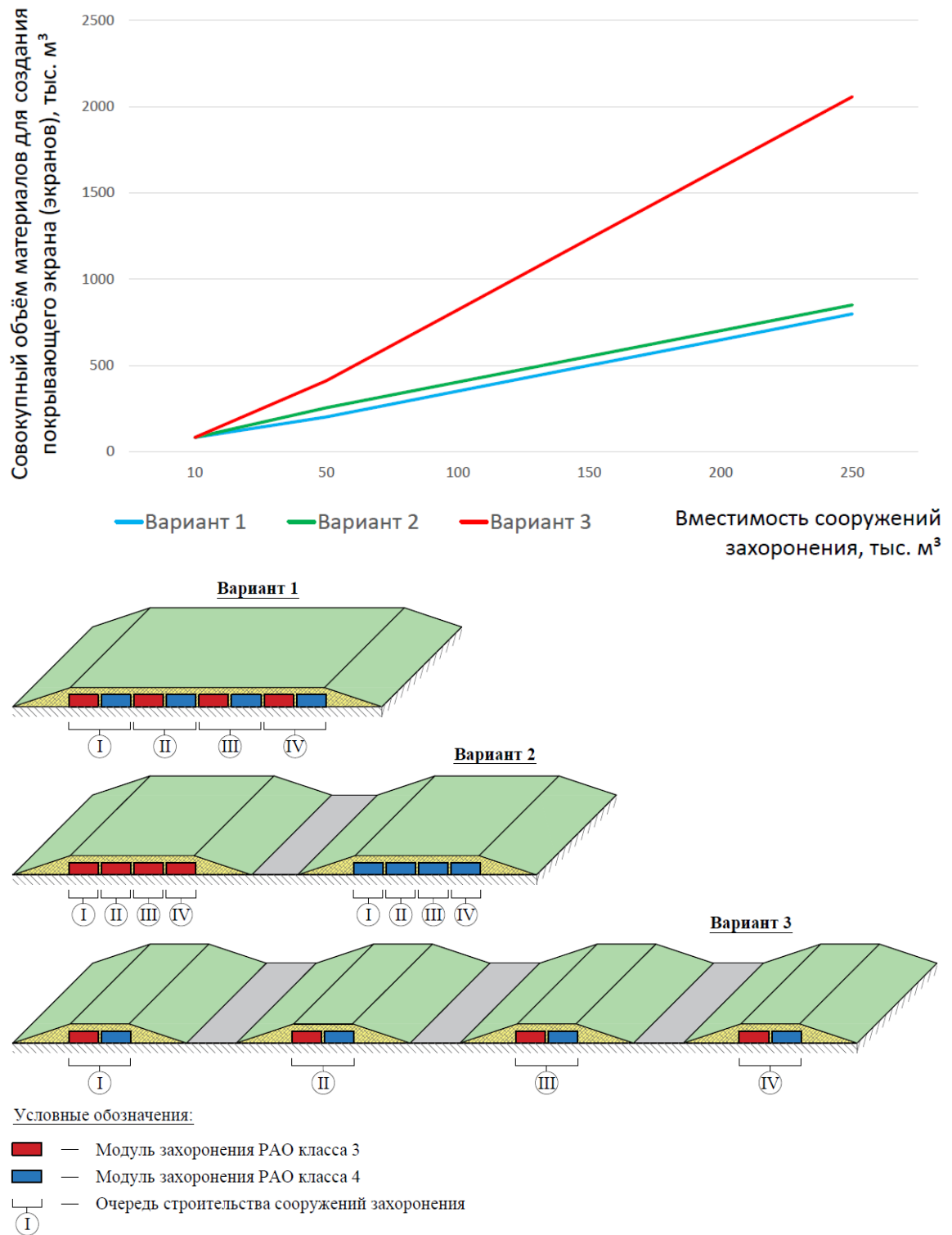


Рисунок 9 – Зависимость объёмов покрывающего экрана от вариантов его конфигурации и вместимости сооружений захоронения

Для подстилающего экрана предложено решение, препятствующее реализации сценария «перелива» ППЗРО, основанное на применении цеолитовых сорбентов (рисунок 10), обеспечи-

вающих сорбцию радионуклидов и инфильтрацию воды, поступающей в сооружения захоронения при деградации ИББ.

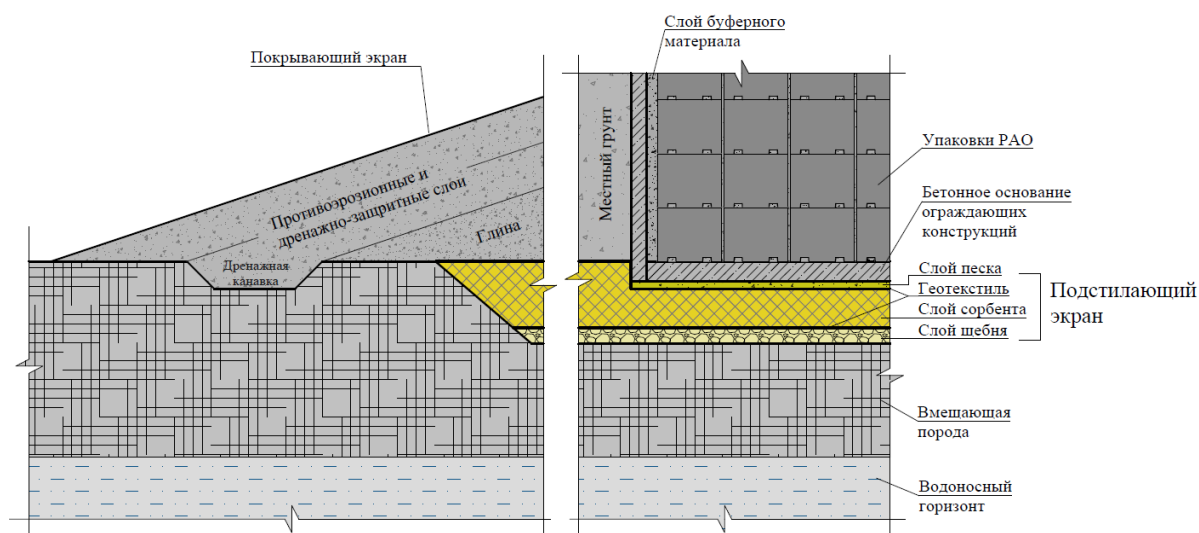


Рисунок 10 – Конструкция подстилающего экрана перспективного типового ППЗРО

В разделе 3.6 разработаны предложения по выбору буферных материалов, закладываемых в пустоты между упаковками РАО и ограждающими железобетонными конструкциями, рассмотрены различные решения по выбору буферных материалов: глины, песка, цементных смесей и других материалов. Проведён анализ достоинств и недостатков данных решений, предложено использование буферных смесей на основе бентонита для модулей захоронения РАО класса 3 и более экономичных цементных смесей для модулей захоронения РАО класса 4.

В главе 4 выполнены оценки безопасности для перспективного наземного ППЗРО и рассчитан экономический эффект от реализации технических решений по приповерхностному захоронению РАО, предложенных в главе 3.

В разделе 4.1 приведены результаты оценок безопасности ППЗРО.

В части эксплуатационной безопасности приведены результаты расчета дозовых нагрузок на персонал при обращении с упаковками РАО в ППЗРО. Констатировано, что индивидуальные годовые дозы облучения персонала ППЗРО не превышают установленные нормы – 20 мЗв.

Выполнен анализ и проведена оценка радиационной обстановки при авариях. Установлено, что радиационное воздействие при возможной авариях, ограничивается территорией объекта.

Приведены результаты оценки устойчивости ограждающих конструкций сооружений захоронения к внешним воздействиям, выполненные с применением программного комплекса ABAQUS (рисунок 11).

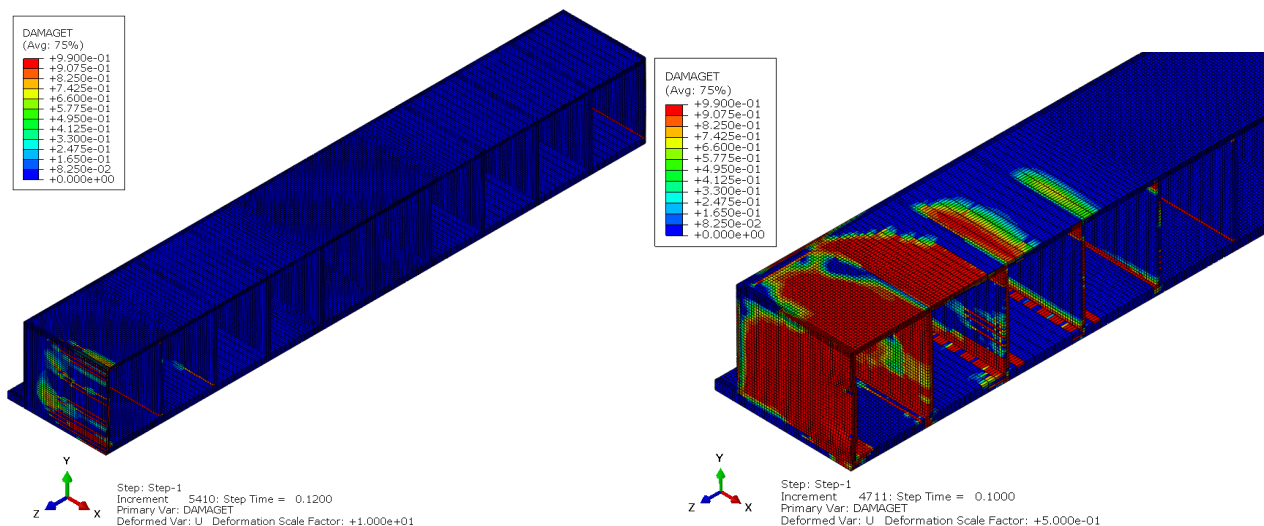


Рисунок 11 – Параметр разрушения модуля захоронения РАО при ударе в торцевую стену самолета массой 5,67 т (слева) и массой 20 т (справа)

По результатам расчета сделаны выводы, что строительные конструкции модулей захоронения РАО выдерживают внешние воздействия природного происхождения, а также внешние воздействия техногенного происхождения, включая падение лёгкого самолета и воздействие воздушной ударной волны с давлением во фронте 30 кПа.

В части долговременной оценки безопасности ППЗРО приведены сравнительные оценки миграции радионуклидов из одного условного модуля захоронения для варианта с применением глины в основе подстилающего экрана и для варианта с клиноптилолитом на примере цементированных среднеактивных ЖРО (радионуклидный состав:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ , суммарная удельная активность  $2,75 \cdot 10^7$  Бк/кг). Для данного радионуклидного состава расчёты показали, что в обоих вариантах ни один из радионуклидов не выходит из зоны захоронения в опасных концентрациях. Проведены расчеты миграции слабосорбируемого радионуклида с большим периодом полураспада ( $^{129}\text{I}$ ) с суммарной активностью  $10^{10}$  Бк (рисунок 12).

Сделан вывод, что в качестве подстилающего экрана могут быть использованы как глина, так и сорбент типа клиноптилолита. При этом вариант с применением природного сорбента, способного пропускать воду (клиноптилолит, трепел или иной материал), обеспечивает отвод воды из зоны захоронения за счет своих фильтрационных качеств и препятствует реализации сценария «перелива».

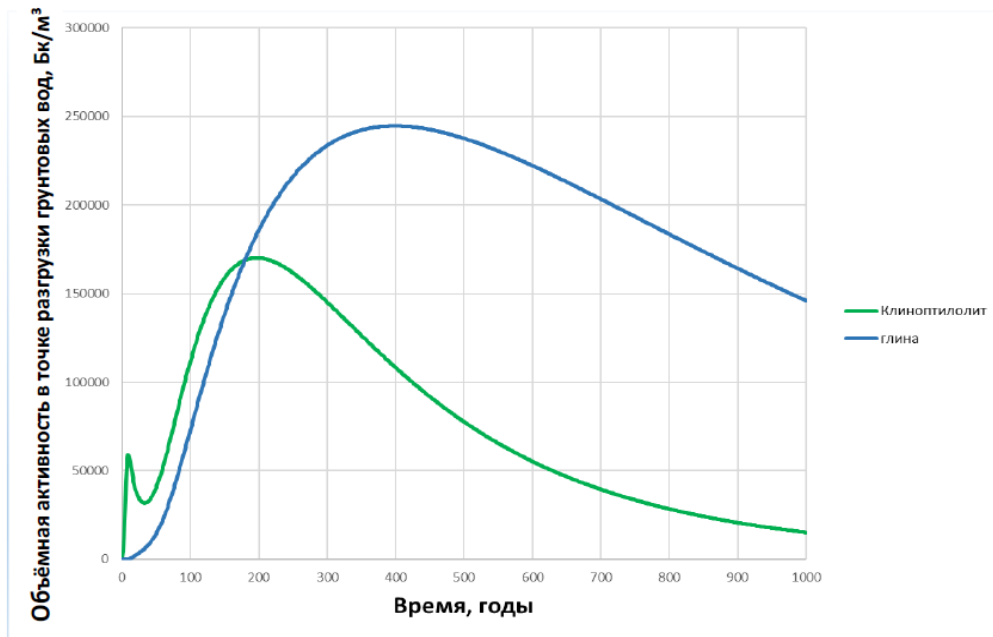


Рисунок 12 – График концентрации долгоживущего радионуклида ( $^{129}\text{I}$ ) в точке мониторинга на расстоянии 50 м от сооружений захоронения

Исследованы зависимости некоторых параметров проседания покрывающего экрана от объёма пустот в упаковках РАО. В зависимости от коэффициента заполнения упаковок РАО класса 4 построены графики, отвечающие за деформацию слоёв покрывающего экрана (рисунок 13).

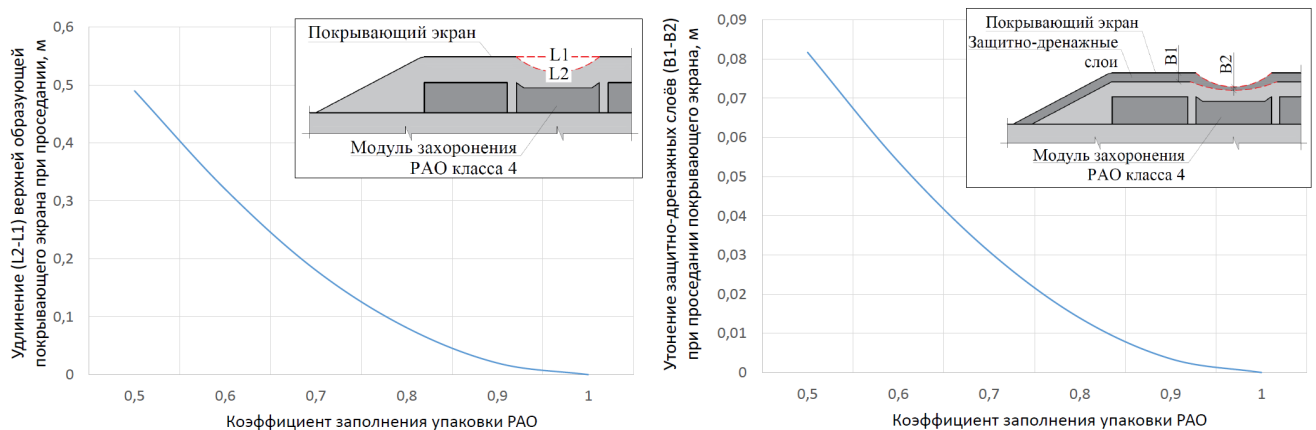


Рисунок 13 – Зависимости величины деформации слоёв покрывающего экрана от коэффициента заполнения упаковок РАО

В разделе 4.2 приведены оценки экономической эффективности реализации технических решений по приповерхностному захоронению РАО, предлагаемых в диссертационном исследовании.

Экономический эффект от применения полимерных контейнеров взамен металлических контейнеров типа КРАД, КМЗ, а также композитных огнестойких контейнеров для горючих НАО взамен контейнерам типа НЗК представлен на рисунке 14.

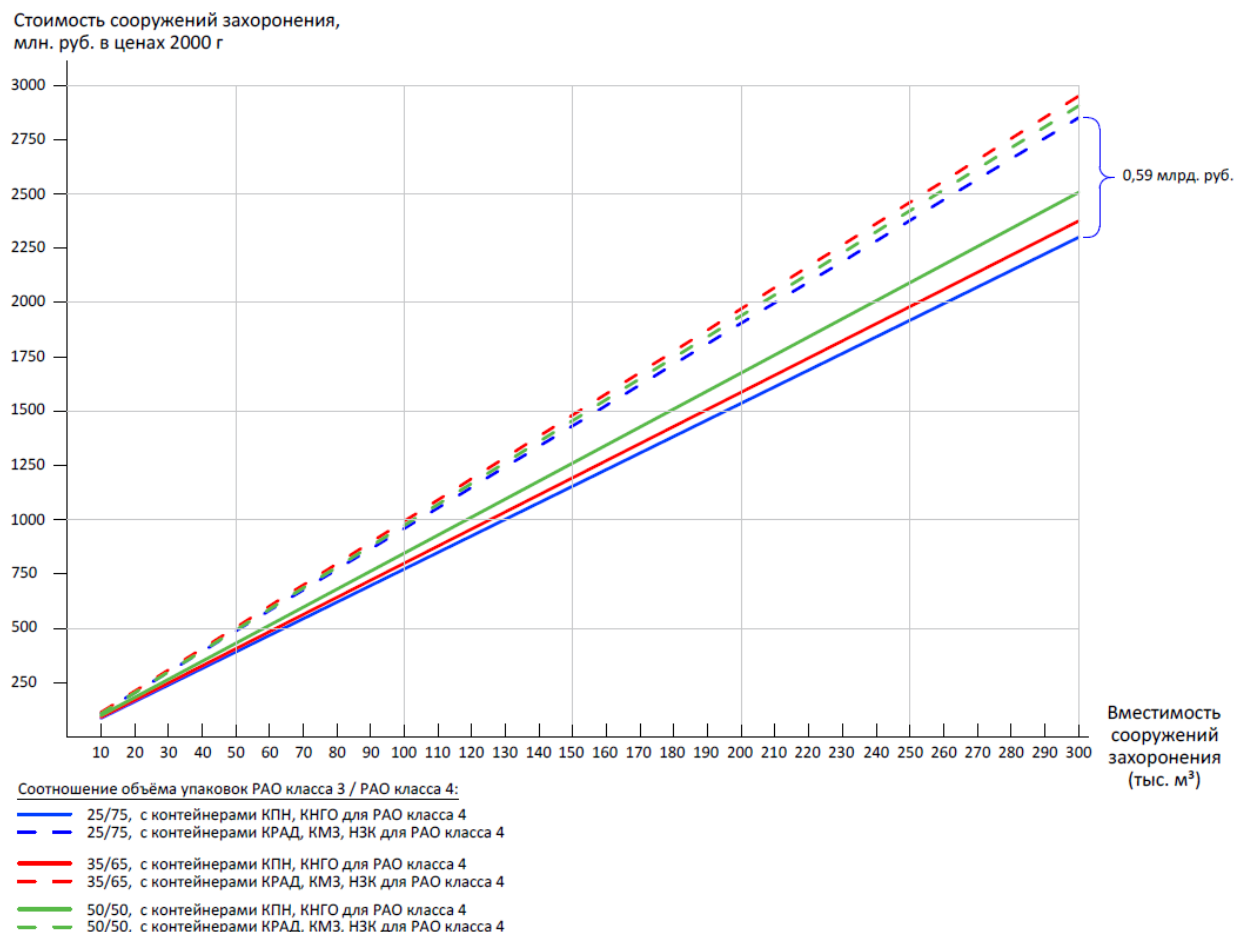


Рисунок 14 – Зависимость стоимости сооружений захоронения перспективного типового ППЗРО от вместимости для различных вариантов использования контейнеров и соотношений объемов поступающих на захоронение РАО классов 3 и 4

Применительно к новому парку контейнеров предложены варианты упаковки отходов, позволяющие сокращать затраты на передачу РАО класса 4 на захоронение. Например, за счёт упаковки около 1000 м³ РАО класса 4 непосредственно в контейнеры типа КПН без использования бочек достигается экономический эффект порядка 139 млн. руб. в ценах 2024 г. (рисунок 15).

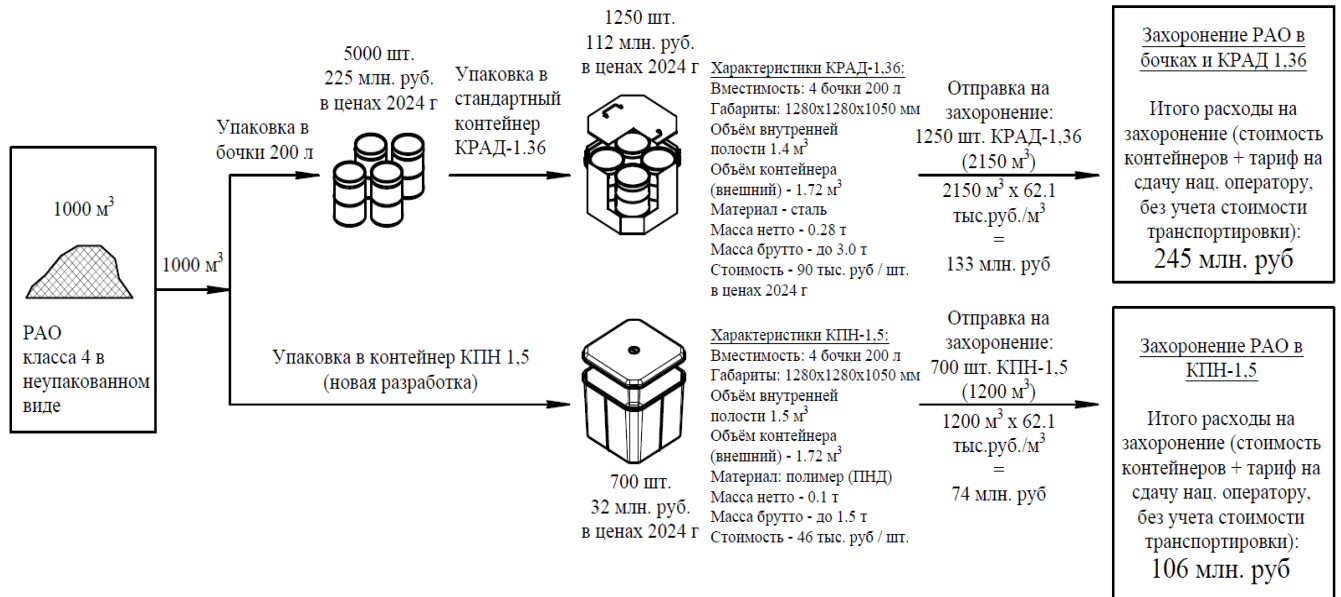


Рисунок 15 – Экономический эффект от применения контейнеров типа КПН для захоронения 1000 м³ РАО (данные в ценах 2024 г)

Для покрывающего и подстилающего экранов ППЗРО исследована зависимость их стоимости от расстояний между модулями захоронения и от вместимости ППЗРО (рисунок 16)

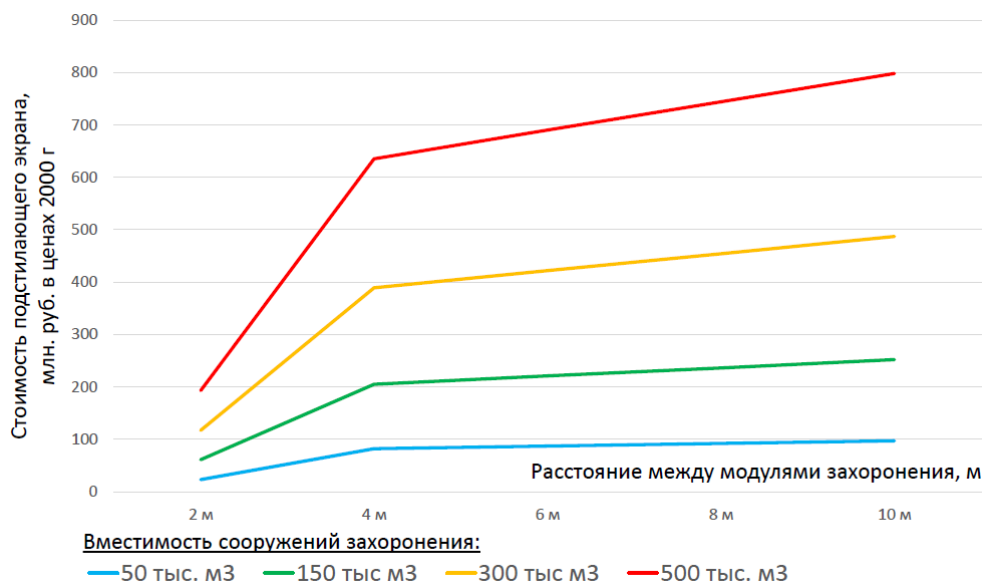


Рисунок 16 – Экономический эффект от сокращения расстояния между модулями захоронения на примере стоимости подстилающего экрана

Зависимости удельных затрат на захоронение РАО от вместимости сооружений захоронения для ППЗРО в Челябинской обл. и для перспективного наземного ППЗРО приведены на рисунке 17.



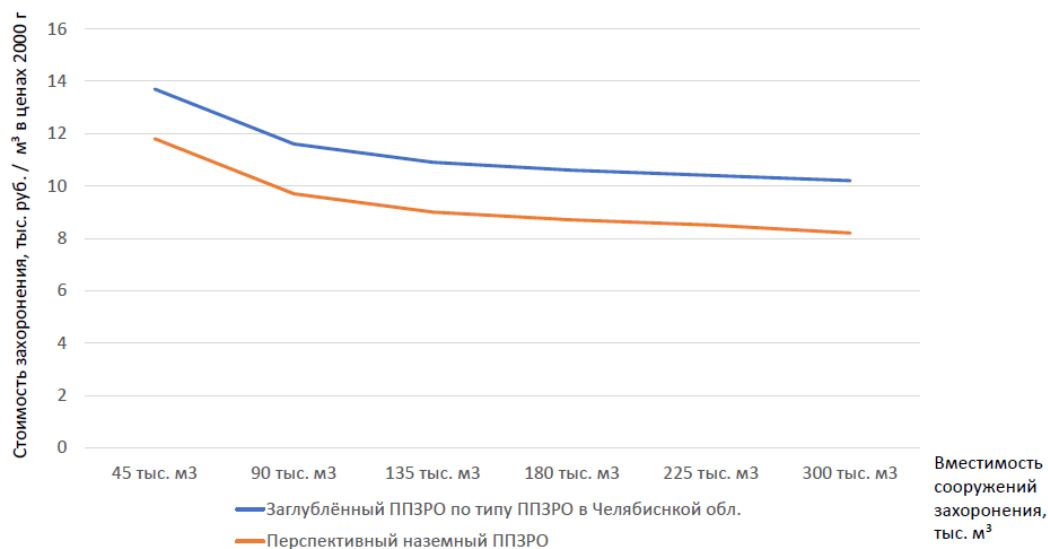


Рисунок 17 – Усреднённые удельные затраты на захоронение РАО классов 3 и 4

Для перспективного наземного ППЗРО основной вклад в экономию затрат на захоронение РАО вносят решения по применению более экономичных контейнеров для захоронения НАО, по созданию единого покрывающего экрана для нескольких очередей строительства, а также значительное снижение объема работ по выемке грунта для строительства ППЗРО (по сравнению с полузаглублённым способом захоронения).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В ходе выполнения исследований были решены следующие задачи:

1) Проведен комплексный анализ мирового опыта создания пунктов захоронения РАО и определены тенденции развития технологий окончательной изоляции низко- и среднеактивных отходов. По результатам выполненного анализа показано, что:

- для задач окончательной изоляции короткоживущих НАО и САО в мире намечается тенденция на использование наземных ППЗРО, как наиболее экономичных и универсальных в части требований к гидрогеологическим характеристикам площадки захоронения;
- окончательная изоляция короткоживущих НАО и САО, как правило, осуществляется в одном ППЗРО, но в разных сооружениях захоронения (отсеках, ячейках, модулях) с различными характеристиками ИББ, определяемыми потенциальной опасностью размещаемых в них РАО;
- зарубежные ППЗРО оборудуются системами сбора и контроля протечек из сооружений захоронения РАО. Наиболее распространены системы сбора и контроля протечек на основе инспекционных галерей под сооружениями захоронения, требующие обслуживания и сложных



технических решений по их закрытию. В связи с этим прослеживаются тенденции на поиск альтернативных решений по отведению протечек, основанных на естественных принципах.

2) Проведен комплексный анализ функций ИББ ППЗРО и технико-экономических показателей обращения с РАО на конечных стадиях, определены факторы, влияющие на стоимость захоронения, определен вклад каждого ИББ в стоимость ППЗРО. Показано, что для РФ наибольший вклад в стоимость обращения с РАО на конечных стадиях вносят контейнеры, наиболее дорогостоящими элементами ППЗРО являются ограждающие конструкции и покрывающие экраны.

Предъявлены требования к каждому ИББ и перечислены ключевые параметры ИББ, которые должны контролироваться при создании ППЗРО.

При исследовании технико-экономических показателей обращения с РАО на конечных стадиях и основных требований к ИББ ППЗРО выявлено, что:

- стоимость существующих контейнеров для НАО завышена (сопоставима со стоимостью контейнеров для САО) и не соответствует требованиям, предъявляемым к упаковкам для захоронения РАО класса 4;
- стоимость покрывающих экранов существенно зависит от расстояний между модулями захоронения и очередями строительства ППЗРО, в связи с чем целесообразно рассмотреть варианты оптимизации компоновки модулей захоронения;
- требуется приведение в соответствие сроков службы ограждающих конструкций и сроков службы упаковок РАО класса 3;

3) Предложено использование полимерных и композитных контейнеров для захоронения РАО класса 4, дающих экономию затрат на приобретение контейнеров, а также затрат на захоронение РАО класса 4. Разработаны и обоснованы предложения по экономичному способу контейнеризации и окончательной изоляции РАО классов 3 и 4.

4) Рекомендован в качестве типового наземный способ захоронения. Для данного способа разработаны решения с размещением упаковок РАО класса 3 и упаковок РАО класса 4 в отдельных модулях с различными характеристиками ограждающих конструкций и буферных материалов, под единым покрывающим экраном и с единым подстилающим экраном из природных сорбентов, обеспечивающих отвод возможных протечек и препятствующих реализации сценария «перелива» ППЗРО.

5) С использованием данных, полученных автором в ходе настоящего диссертационного исследования, выполнены оценки эксплуатационной безопасности ППЗРО, оценки миграции радионуклидов из сооружений захоронения, оценки устойчивости модулей захоронения к внешним воздействиям, прогнозы проседания покрывающего экрана в зависимости от заполня-

емости упаковок РАО. Результаты оценок безопасности показали, что в ППЗРО могут быть размещены РАО классов 3 и 4, образующиеся при эксплуатации и выводе из эксплуатации АЭС.

б) Выполнены оценки экономической эффективности реализации предложений по захоронению РАО в перспективном наземном ППЗРО с дифференцированными требованиями к ИББ для РАО класса 3 и РАО класса 4. Исследованы зависимости удельной стоимости захоронения от вместимости ППЗРО. Экономический эффект при строительстве наземного ППЗРО составляет около 20 % по сравнению с заглублённым ППЗРО.

В ходе исследования разработан и применён метод выбора основных технических решений при проектировании ППЗРО на основе комплексного анализа факторов, влияющих на безопасность и экономику обращения с РАО на заключительных стадиях. Определен облик сооружений захоронения РАО классов 3 и 4 для будущих проектов ППЗРО. Оптимизированы транспортно-технологические процессы обращения с упаковками РАО и обоснована их безопасность согласно принципам радиационной защиты персонала и населения.

Цель диссертационного исследования – разработка и научное обоснование технических решений по захоронению низко- и среднеактивных отходов 3 и 4 классов, достигнута.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дёмин А.В., Сорокин В.Т., Кашеев В.В., Павлов Д.И. Создание ППЗРО в Северо-Западном регионе РФ (состояние и перспективы) // Сборник докладов научно-технического семинара «Глины как природный и инженерный барьер для захоронения РАО». – Брюссель, 2014 г.
2. Павлов Д.И., Сорокин В.Т., Гатауллин Р.М. и др. Состояние и основные направления создания парка контейнеров для кондиционирования и захоронения радиоактивных отходов // Ядерная и радиационная безопасность. – 2016. – №3 (81). – 12 с.
3. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Технические аспекты создания регионального пункта захоронения радиоактивных отходов на территории Ленинградской области // Радиоактивные отходы. – 2017. – № 1 (2). – С. 15-20.
4. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Технологии окончательной изоляции радиоактивных отходов: европейский опыт и тенденции // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 4 (5). – С. 24-32.
5. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Стоимость захоронения РАО: зарубежные оценки. // Радиоактивные отходы. – 2019. – № 6. – С. 46-55.
6. Сорокин В. Т., Павлов Д. И., Кашеев В. А., Мусатов Н. Д., Баринов А. С. Научные и проектные аспекты остекловывания жидких радиоактивных отходов АЭС с ВВЭР-1200 // Радиоактивные отходы. – 2020. – № 2 (11). – С. 56-65.
7. Павлов Д.И., Ильина О.А. О системном подходе к выбору барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 // Радиоактивные отходы. – 2020. – № 3 (12). – С. 54-65.
8. Богатов С. А., Крючков Д. В., Павлов Д. И., Сыченко Д. В. Анализ различных концепций захоронения РАО класса 1 в кристаллических породах // Радиоактивные отходы. – 2020. – № 3 (12). – С. 66-77.
9. Сорокин В.Т., Прохоров Н.А., Павлов Д.И. Технология кондиционирования отработавших ионообменных смол методом термовакuumной сушки // Радиоактивные отходы. – 2021. – № 2 (15). – С. 39-48.
10. Сорокин В.Т., Прохоров Н.А., Павлов Д.И. Технология кондиционирования отработавших ионообменных смол методом термовакuumной сушки // Сборник докладов научно-технического семинара «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов». – Санкт-Петербург, 2021 г.
11. Павлов Д. И., Сорокин В. Т., Баринов А. С., Дёмин А. В., Сыченко Д. В. Научно-технические и проектные основы создания конструкций приповерхностных пунктов захо-

- ронения низко- и среднеактивных отходов // Радиоактивные отходы. – 2021. – № 4 (17). – С.65-77.
12. Павлов Д. И., Ирошников В. В., Максименко Д. А., Дёмин А. В., Сыченко Д. В. Анализ требований нормативной базы Российской Федерации к захоронению очень низкоактивных радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. – 2022. – №1 (18). – С. 91-106.
  13. Сорокин В. Т., Прохоров Н. А., Гатауллин Р. М., Бабкин А. Н., Березовский А. В., Павлов Д. И. Исследование осушки и оптимизация кондиционирования отработавших ионообменных смол без включения в матрицу для захоронения // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 2 (19). – С. 25-34.
  14. Сорокин В. Т., Гатауллин Р. М., Свиридов Н. В., Павлов Д. И. Долговечность железобетонных контейнеров типа НЗК-150-1,5П при захоронении радиоактивных отходов 2 класса // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 3 (20). – С. 37-49.
  15. Пензин Р.А., Павлов Д.И., Сиротюк В.А. и др. Инновационная технология обращения с РАО при ВЭ Билибинской АЭС // Сборник докладов научно-технического семинара «Проблемы переработки и кондиционирования радиоактивных отходов». – Санкт-Петербург, 2024 г.
  16. Павлов Д.И., Неуважаев Г.Д., Дёмин А.В., Шульман Г.С., Демченко Е.Д. К вопросу выбора способа захоронения низко- и среднеактивных РАО // Радиоактивные отходы. – 2024. – № 1 (26). – С. 69-83.
  17. Жемжуров М.Л., Павлов Д.И., Жемжуров А.М. Разработка технической концепции сооружений приповерхностного захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС. Часть 1. Актуальность и нормативные требования // Энергетическая стратегия. – 2024. – № 5 (101). – С. 44-47.
  18. Жемжуров М.Л., Павлов Д.И., Жемжуров А.М. Разработка технической концепции сооружений приповерхностного захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС. Часть 2. Зарубежный опыт и возможные концептуальные решения для Беларуси // Энергетическая стратегия. – 2024. – № 6 (102). – С. 51-55.
  19. Жемжуров М. Л., Павлов Д. И., Жемжуров А. М. Варианты концептуальных решений для сооружений приповерхностного захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС // Радиоактивные отходы. – 2024. – № 4 (29). – С. 53-65.
  20. Жемжуров М.Л., Павлов Д.И., Жемжуров А.М. Варианты Различных Технических Решений для Приповерхностного Захоронения Радиоактивных Отходов Белорусской АЭС // Сборник докладов научно-технического семинара «Nonlinear Dynamics and Applications». – Минск, 2024 г.

21. Жемжуров М.Л., Павлов Д.И. О конечных формах упаковок для захоронения радиоактивных отходов низкой активности Белорусской АЭС // Энергетическая стратегия. – 2024. – № 5 (101). – С. 51-56.