

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук
Сорокин Валерий Трофимович

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ТЕХНОЛОГИИ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАО	11
1.1 Анализ складывающейся в РФ практики приповерхностного захоронения РАО	11
1.2 Анализ зарубежных практик окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО	25
1.3 Обобщение мирового опыта	44
1.4 Тенденции в технологиях окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО	48
Выводы к главе 1	52
2 АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО	56
2.1 Анализ нормативных требований к барьерам безопасности	57
2.2 Анализ сроков службы и долговечности инженерных барьеров безопасности ППЗРО.....	61
2.3 Анализ функций барьеров безопасности ППЗРО. Ключевые свойства и параметры ИББ. ..	69
2.4 Анализ стоимостных показателей ППЗРО	74
Выводы к главе 2	83
3 ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ СПОСОБА ЗАХОРОНЕНИЯ РАО КЛАССОВ 3 И 4.....	85
3.1 Облик перспективного наземного ППЗРО для РАО классов 3 и 4	85
3.2 Предложения по усовершенствованию контейнерного парка для захоронения РАО	89
3.3 Технические решения по ограждающим конструкциям ППЗРО	94
3.4 Покрывающий экран ППЗРО	97
3.5 Подстилающий экран ППЗРО.....	102
3.6 Буферные материалы ППЗРО	106
Выводы к главе 3	110
4 ОЦЕНКИ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ВЫБОРУ СПОСОБОВ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО	112
4.1 Результаты оценок безопасности ППЗРО	113
4.2 Оценки экономической эффективности реализации технических решений по приповерхностному захоронению РАО	136
Выводы к главе 4	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
Список сокращений и условных обозначений	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А Таблицы и расчёты к диссертационному исследованию	172

ВВЕДЕНИЕ

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. м³ РАО суммарной активностью $1,86 \cdot 10^{20}$ Бк. Ежегодное образование жидких РАО составляет 0,79 млн. м³ с суммарной активностью $9,00 \cdot 10^{18}$ Бк, твердых РАО – 0,73 млн. м³, 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 г. «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» [2] и № 1929 от 29.10.2022 г. «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069» [3].

В 2011 году Федеральным законом № 190-ФЗ от 11.07.2011 г. «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [4] (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 [4] 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 [5], завершено проектирование ещё двух ППЗРО в Челябинской области [6] и Томской области [7]. Суммарная вместимость данных трёх пунктов захоронения составляет 0,425 млн. м³ 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 еще 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.

Тематика окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО исследуется со второй половины прошлого века. Технологии захоронения прошли путь от простых земляных траншей до достаточно сложных сооружений и на сегодняшний день отличаются многообразием возможных инженерных решений. За годы проектирования, 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 (ESA), в работах национальных агентств и операторов по обращению с РАО, таких, например, как SKB в Швеции, Andra во Франции, BGE Technology в Германии.

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 Тимофееву-Ресовскому Н.В. [8], Кузину А.М. [9], Циммеру К.Г. [10]. Основы радиоэкологии в отечественной науке заложены Вернадским В.И. [11], Клечковским В.М. [12], радиохимии –Хлопиным В.Г. [13], Никольским Б.П. [14]. Прикладные вопросы науки, связанные с изу-

чением миграции радионуклидов из сооружений захоронения, исследованы Румыниным В.Г. [15], Калмыковым С.Н. [16], Савоненковым В.Г., Андерсоном Е.Б. [17] и другими учёными. Характеристики и свойства материалов инженерных барьеров безопасности сооружений захоронения изучались Ожованом М.В. [18], Мартыновым К.В., Захаровой Е.В. [19], Сорокиным В.Т. [20]. Экономические аспекты окончательной изоляции РАО рассмотрены в трудах Чистякова В.Н. [21], Гупало В.С. [22], Нечаева А.Ф. [23].

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 сорбентов и глинистых материалов. Исследована роль ограждающих конструкций и подстилающего экрана при реализации сценария перелива 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 результатов исследований в данной и смежных областях науки. При выполнении оценок безопасности использовались методы моделирования с использованием специализированного расчетного программного обеспечения: программный продукт «ДОЗА 3.0» (паспорт аттестации программного средства ФБУ «НТЦ ЯРБ» № 338 от 12 сентября 2013 г.) [210], программный продукт ABAQUS (аттестационный паспорт ФБУ «НТЦ ЯРБ» с регистрационным номером № 486, дата выдачи 19.12.2019 г.) [211], программа для трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования GeRa/V1 (Регистрационный номер Ростехнадзора № 443 от 17.04.2018 г.) [207]. 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» [210], расчёты на устойчивость к внешним воздействиям – д.т.н. Шульманом Г.С. в программном продукте ABAQUS [211], расчёты миграции радионуклидов – к.т.н. Неуважаевым Г.С. в программе GeRa/V1) [207].
- 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.

1 ТЕХНОЛОГИИ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАО

Задача окончательной изоляции радиоактивных отходов (РАО) возникла во второй половине прошлого века в связи с активным развертыванием научно-исследовательских и военных ядерных программ и развитием в мире атомной энергетики. В своем решении она прошла путь от захоронения РАО в простых земляных траншеях и сбросов РАО в моря и океаны до создания сложных инженерных сооружений, обеспечивающих локализацию РАО на весь период их потенциальной опасности. Это позволило накопить большой международный опыт, который может быть полезен для стран, приступающих к созданию национальных пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО).

В настоящее время в мире выработана единая политика в вопросах конечной стадии обращения с РАО, в основе которой лежат принципы многобарьерной защиты окружающей среды, защиты жизни и здоровья населения, принцип необременения будущих поколений проблемами обращения с РАО.

Однако, несмотря на широкую международную кооперацию и единство в подходах к окончательной изоляции РАО, в разных странах имеются существенные различия при решении технических и организационных вопросов создания пунктов захоронения РАО. Это обусловлено особенностями нормативно-правовой базы, экономическими, политическими, социальными факторами, климатическими и геологическими особенностями расположения страны.

В настоящей главе выполнен обзор и анализ российской и зарубежной практики создания ППЗРО, выявлены тенденции в технологиях окончательной изоляции низко- и среднеактивных отходов, определены перспективные способы приповерхностного захоронения РАО.

1.1 Анализ складывающейся в РФ практики приповерхностного захоронения РАО

Практика захоронения РАО в РФ началась с вступлением в силу Федерального закона № 190-ФЗ от 11.07.2011 г. [4], согласно которому все накопленные и образующиеся РАО подлежат окончательной изоляции в пунктах захоронения. До этого не существовало единой политики обращения с отходами и на каждом предприятии были свои подходы к их учёту и контролю, переработке, кондиционированию, хранению. Часть сооружений для долговременного хранения РАО была создана без намерения их извлечения.

На сегодняшний день для решения задач окончательной изоляции РАО создана единая государственная система обращения с РАО (ЕГС РАО). Постановлением Правительства №1185 от 19.11.2012 г. [8] определены этапы её развития:

- 1) разработка нормативной и организационной основ системы, первичная регистрация РАО и мест их размещения;
- 2) создание системы захоронения низкоактивных и среднеактивных РАО;
- 3) создание системы захоронения высокоактивных РАО, перевод пунктов размещения особых РАО в пункты консервации особых РАО и пунктов консервации особых РАО в пункты захоронения РАО.

Первый этап создания ЕГС РАО завершён. В рамках первого этапа создана уполномоченная организация по вопросам захоронения РАО – ФГУП «НО «РАО», разработана нормативная документация, предъявляющая требования к обращению с РАО на заключительных стадиях, положены основы классификации РАО по способам захоронения, утверждены тарифы на захоронение РАО, зарегистрированы все накопленные на территории РФ РАО с отнесением к категории «особых» – подлежащих захоронению на месте и «удаляемых» – подлежащих кондиционированию и захоронению в ПЗРО.

По результатам первичной регистрации РАО установлено, что на предприятиях РФ накоплено около 555,75 млн. м³ РАО суммарной активностью $1,86 \cdot 10^{20}$ Бк. Ежегодное образование жидких РАО составляет 0,80 млн. м³ с суммарной активностью $5,89 \cdot 10^{18}$ Бк, твердых РАО – 0,72 млн. м³, общей активностью $3,06 \cdot 10^{17}$ Бк.

В рамках второго этапа создания ЕГС РАО введен в эксплуатацию первый в РФ ПЗРО – в Свердловской обл., на территории АО «УЭХК», рядом с г. Новоуральск и запроектированы ещё два ПЗРО – в Челябинской области, на территории комбината ФГУП «ПО «Маяк», рядом с г. Озёрск и в Томской области, на территории АО «СХК», рядом с г. Северск. Планируется создание еще нескольких региональных приповерхностных ПЗРО.

Третий этап создания ЕГС РАО находится в стадии реализации. В рамках него создан пункт захоронения особых РАО на месте промышленного уран-графитового реактора на площадке АО «СХК» (ОДЦ УГР), ведётся строительство подземной исследовательской лаборатории и пункта глубинного захоронения РАО в Красноярском крае (Нижне-Канский массив), разрабатываются решения по созданию пунктов захоронения особых РАО на площадках ФГУП «ПО «Маяк», ФГУП «ГХК», АО «СХК» и других предприятий атомной отрасли.

1.1.1 Нормативная база РФ для создания ПЗРО

В основе российской нормативной базы в области окончательной изоляции РАО и создания ПЗРО лежат положения ФЗ № 190-ФЗ [4], нормы и правила, определяющие общие принципы безопасности объектов использования атомной энергии, а также ряд положений градостроительного кодекса и регламентов по безопасности зданий и сооружений. Перечень нормативной

документации в области обращения с РАО [2,3, 24 – 45] на заключительных стадиях представлен в таблице А.1 Приложения А.

Способы захоронения РАО определяются с учётом требований Постановления Правительства РФ №1069 [2], а также Постановления Правительства РФ №1929 [3], согласно которым удаляемые РАО разделены на 6 классов, каждому из которых определён способ захоронения (см. таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Российская классификация удаляемых РАО по способам захоронения

Класс	Критерии	Способ захоронения
1	– ТРО, которые не относятся к классам 3, 4 и 6; – энерговыделение более 100 Вт/м ³ .	Захоронение в ПГЗРО
2	– ТРО, которые не относятся к классам 3, 4 и 6; – энерговыделение менее 100 Вт/м ³ .	
3	– ТРО, которые не относятся к классам 4 и 6; – удельная активность радионуклидов с периодом полураспада более 31 года не превышает 10 ⁶ Бк/г – для бета-излучающих радионуклидов и 4000 Бк/г – для альфа-излучающих радионуклидов; – ОЗИИ, активность которых через 300 лет не превысит значения минимально значимой активности.	Захоронение в ППЗРО
4	– ТРО, которые не относятся к классу 6; – удельная активность радионуклидов с периодом полураспада более 31 года не превышает 10 ⁴ Бк/г – для бета-излучающих радионуклидов и 400 Бк/г – для альфа-излучающих радионуклидов.	
5	– ЖРО, подлежащие захоронению в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов, сооруженных и эксплуатируемых на день вступления в силу ФЗ №190.	Захоронение в ПГЗЖРО
6	– ТРО, которые образуются при добыче и переработке урановых руд, а также при осуществлении видов деятельности по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов.	Захоронение в ППЗРО

Большая часть накопленных и образующихся удаляемых РАО является низко- и среднеактивными, после кондиционирования относится к классам 3 и 4 и подлежит захоронению в ППЗРО.

Согласно ФЗ № 190-ФЗ [4] ППЗРО – это пункт захоронения радиоактивных отходов, включающий в себя сооружение, размещенное на одном уровне с поверхностью земли или на глубине до ста метров от поверхности земли. Согласно НП-069-14 [26] ППЗРО подразделяются на:

- наземные сооружения, в которых верхний уровень размещенных РАО расположен выше или на уровне нулевой отметки естественного рельефа земной поверхности;
- заглубленные сооружения – сооружения или подземные полости естественного или искусственного (техногенного) происхождения (например, горные выработки), в которых верхний уровень размещенных РАО расположен ниже нулевой отметки естественного рельефа земной поверхности.

В п. 5 НП-069-14 [26] указано, что выбор способа приповерхностного захоронения РАО (наземный или заглубленный), конструкции сооружений ППЗРО, состава и свойств барьеров безопасности должен определяться и обосновываться в проектной документации.

В редакции Постановления Правительства РФ №1069 от 19.10.2012 г. [2] содержались требования по глубине размещения РАО классов 3 и 4:

- РАО 4 класса – «подлежат ..., захоронению ... на одном уровне с поверхностью земли»;
- РАО 3 класса – «подлежат ..., захоронению ... на глубине до 100 метров».

Эти требования определили концепцию захоронения РАО для трёх российских ППЗРО в Свердловской, Челябинской и Томской обл., согласно которой РАО класса 3 и РАО класса 4 размещаются в заглублённых сооружениях захоронения таким образом, что упаковки РАО класса 3 находятся ниже уровня земли, а РАО класса 4 выше уровня земли.

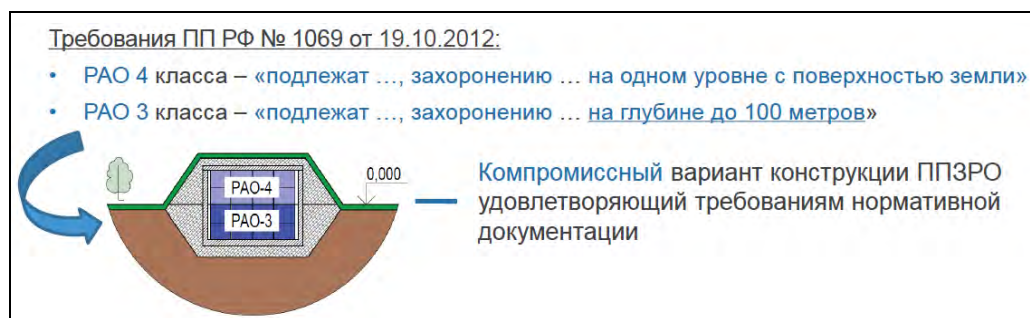


Рисунок 1.1 – Концепция захоронения РАО классов 3 и 4 для российских ППЗРО в Свердловской, Челябинской и Томской обл., проистекающая из требований Постановления Правительства РФ №1069 от 19.10.2012 г. [2]

Далее, в разделах 1.1.2 ÷ 1.1.4 приведено краткое описание основных технических решений по захоронению РАО, принятых в проектах ППЗРО Свердловской, Челябинской и Томской обл.

1.1.2 Технические решения по захоронению РАО в Свердловской обл. (г. Новоуральск)

Пункт захоронения РАО в Свердловской обл. введен в эксплуатацию в 2016 году. ПЗРО представляет собой комплекс зданий и сооружений, предназначенных для приёма, временного хранения, и окончательной изоляции кондиционированных РАО классов 3 и 4. Основным источником поступления РАО – АО «Уральский электрохимический комбинат» (отходы от производственной деятельности и вывода из эксплуатации объектов комбината). Согласно материалам обоснования лицензии [5] вместимость ПЗРО составляет 54289 м³ РАО (объём по внешним габаритам упаковок РАО, поступающих на захоронение). Окончательная изоляция РАО осуществляется на 4 картах (карты №10 ÷ 13 по титульному списку зданий и сооружений ПЗРО) в заглублённых относительно планировки площадки железобетонных ограждающих конструкциях.

Ситуационный план ПЗРО в Свердловской обл. с данными по размещению карт захоронения, данные по конструкции покрывающего экрана представлены в [5]

Конструкция сооружений захоронения приведена на рисунке 1.2.

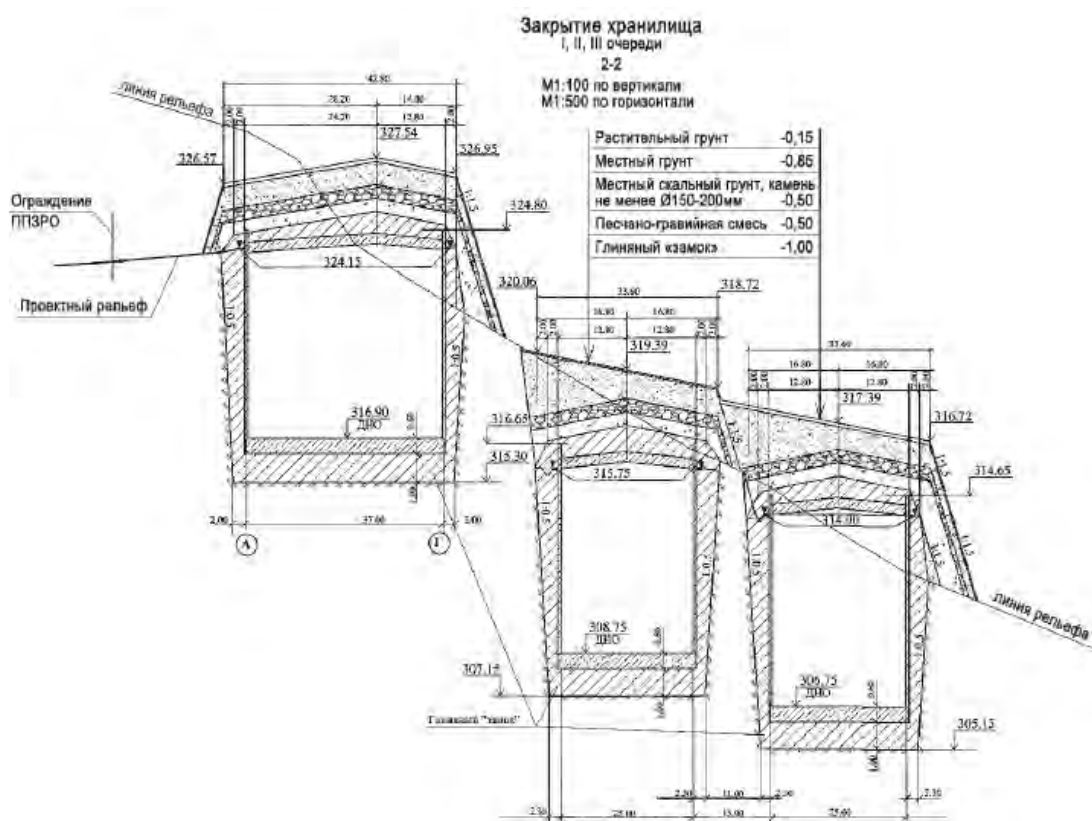


Рисунок 1.2 – Конструкция сооружений захоронения ПЗРО в Свердловской обл.

На захоронение в ПЗРО поступают упаковки РАО на основе контейнеров типа НЗК, ЖБУ, ЖЗК, КРАД и КМЗ.

Упаковки РАО в сооружениях захоронения размещаются в несколько ярусов: упаковки РАО класса 3 занимают до трёх нижних ярусов, над ними размещаются упаковки РАО 4 класса. Установка упаковок в сооружения захоронения осуществляется с помощью козлового крана.

Согласно проектной документации на ППЗРО действует система физических барьеров на пути распространения РВ с установленными сроками службы, включающая пять барьеров.

Первый барьер – стенки контейнеров. Срок службы железобетонных контейнеров типа НЗК, ЖБУ, ЖЗК при котором сохраняется их работоспособность как инженерного барьера (непроницаемость, механическая прочность) в ППЗРО, составляет не менее 300 лет.

Назначенный срок службы металлических контейнеров типа КМЗ и КРАД 50 и 30 лет соответственно.

Второй барьер – буферный материал, заполняющий свободное пространство между упаковками РАО в отсеках (бентонитовые глины по ГОСТ 28177-89 [47]).

Буферный материал выполняет изолирующую (противофильтрационную и противомиграционную) функцию в течение как минимум 100 лет. В дальнейшем продолжает выполнять функцию сорбционного барьера.

Третий барьер – бетонные сооружения стен и перекрытий карт ППЗРО.

Срок службы конструкций – 100 лет (на основании СП 63.13330-2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» [48], таблицы 1 ГОСТ 27751-2014 [49], ГОСТ 31384-2017 [50]).

Четвертый барьер – глиняный экран и бентонитовые маты по периметру (стены, пол) карт ППЗРО. Глиняный экран по периметру выполняет изолирующую функции как минимум в течение 500 лет – установленный в проекте срок службы без технического обслуживания и ремонта.

Пятый барьер – покрывающий гидроизолирующий экран, состоящий из:

- гидроизолирующего экрана из глины;
- дренажного слоя (поверх глины) из гравийно-песчаной смеси;
- защитного слоя из дробленого камня;
- защитного слоя из суглинка и почвенно-растительного покрова.

Данных по срокам службы покрывающего экрана в проектной документации и материалах обоснования лицензии не представлено, однако отмечено, что надежность покрывающего экрана обеспечивается применением в его конструкции природных гидроизолирующих и дренирующих материалов с высокой долговечностью, слабо подверженных разрушению с течением времени.

Годовая производительность ППЗРО составляет 4500 м³ упаковок РАО. Режим работы ПЗРО – 250 дней в году.

Проектом предусмотрена сеть наблюдательных скважин по периметру ППЗРО. Мониторинг за ППЗРО осуществляется посредством отбора проб из наблюдательных скважин. Данных по срокам контроля за ППЗРО после его закрытия в проектной документации и материалах обоснования лицензии не представлено.

По потенциальной радиационной опасности, ППЗРО относится к III категории: радиационное воздействие при возможной проектной аварии ограничивается территорией объекта, санитарно-защитная зона ограничивается территорией объекта, зона наблюдения не устанавливается.

Для ППЗРО по результатам оценок безопасности установлены локальные критерии приемлемости.

1.1.3 Технические решения по захоронению РАО в Челябинской обл. (г. Озёрск)

Приповерхностный пункт захоронения РАО в Челябинской обл. по состоянию на 2024 г. находится на стадии проектирования. ППЗРО представляет собой комплекс зданий и сооружений, предназначенных для приёма, временного хранения, и окончательной изоляции кондиционированных РАО классов 3 и 4. Основным источником поступления РАО – ФГУП «ПО «Маяк» (отходы от производственной деятельности и вывода из эксплуатации объектов предприятия). Согласно материалам обоснования лицензии [6] вместимость ПЗРО составляет 225000 м³ РАО (объём по внешним габаритам упаковок РАО, поступающих на захоронение), в том числе отходов 3 класса – 42000 м³ (18,7%), 4 класса – 183000 м³ (81,3%).

Окончательная изоляция РАО осуществляется в пятнадцати железобетонных модулях, заглублённых относительно планировки площадки ПЗРО. Ситуационный план ППЗРО в Челябинской обл. с данными по размещению модулей захоронения, данные по конструкции покрывающего экрана представлены в [6]. Конструкция сооружений захоронения приведена на рисунке 1.3.

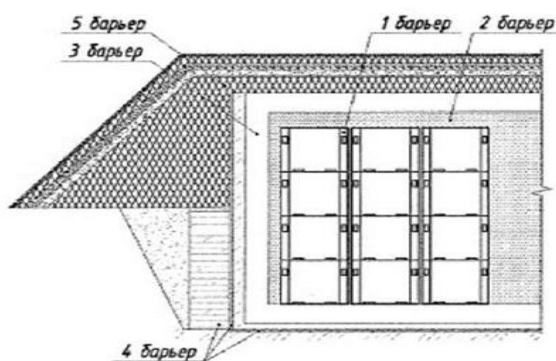


Рисунок 1.3 – Конструкция сооружений захоронения ППЗРО в Челябинской обл.

На захоронение в ППЗРО поступают упаковки РАО на основе контейнеров типа НЗК, ЖБУ, ЖЗК, КРАД, КМЗ, РАО в металлических бочках и фильтр-контейнерах (ФК), установленных в металлических клетях, а также РАО в мягких контейнерах типа БИГ-БЭГ.

Упаковки РАО в сооружениях захоронения размещаются в несколько ярусов: упаковки РАО класса 3 занимают нижние ярусы (ниже уровня земли), над ними размещаются упаковки РАО 4 класса. Упаковки РАО размещаются в сооружениях захоронения с помощью вилочного погрузчика.

Согласно проектной документации на ППЗРО действует система физических барьеров на пути распространения РВ с установленными сроками службы, включающая пять барьеров.

Первый барьер – стенки контейнеров. Срок службы железобетонных контейнеров типа НЗК, ЖБУ, ЖЗК при котором сохраняется их работоспособность как инженерного барьера (непроницаемость, механическая прочность) в ППЗРО, составляет не менее 300 лет.

Назначенный срок службы металлических контейнеров типа КМЗ и КРАД 50 и 30 лет соответственно.

Бочки, фильтр-контейнеры и мягкие контейнеры типа БИГ-БЭГ не рассматриваются проектом в качестве инженерных барьеров и элементов многобарьерной системы в долгосрочной перспективе.

Второй барьер – буферный материал на основе бентонитовых гранул, заполняющий свободное пространство между упаковками РАО в отсеках.

Согласно проектной документации, буферный материал выполняет изолирующую (противофильтрационную и противомиграционную) функцию в течение 300 лет.

Третий барьер – бетонные сооружения стен и перекрытий сооружений захоронения ППЗРО.

Срок службы конструкций – 100 лет (на основании СП 63.13330-2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» [48], таблицы 1 ГОСТ 27751-2014 [49], ГОСТ 31384-2017 [50]).

Четвертый барьер – глиняный экран и бентонитовые маты по периметру (стены, дно, перекрытие) модульных сооружений ППЗРО. Глиняный экран по периметру выполняет изолирующую функцию в течение 300 лет – установленный в проекте срок службы без технического обслуживания и ремонта.

Пятый барьер – покрывающий гидроизолирующий экран, состоящий из:

- гидроизолирующего экрана из глины;
- дренажного слоя (поверх глины) из гравийно-песчаной смеси;
- защитного слоя из дробленого камня;
- защитного слоя из суглинка и почвенно-растительного покрова.

Данных по срокам службы покрывающего экрана в проектной документации и материалах обоснования лицензии не представлено.

Проектом предусмотрена сеть наблюдательных скважин по периметру сооружений захоронения, разработаны решения по мониторингу за ППЗРО. Данных по срокам мониторинга после закрытия сооружений захоронения в проектной документации и материалах обоснования лицензии не представлено.

Годовая производительность ППЗРО составляет 15000 м³ упаковок РАО. Режим работы ПЗРО – 250 дней в году.

По потенциальной радиационной опасности, ППЗРО относится к III категории: радиационное воздействие при возможной проектной аварии ограничивается территорией объекта, ППЗРО расположен в границах санитарно-защитной зоны ФГУП «ПО «Маяк».

Допустимая суммарная активность РАО, захораниваемых в ППЗРО, по альфа излучающим нуклидам (включая трансурановые) составляет $2,3 \cdot 10^{13}$ Бк. Допустимая суммарная активность РАО по бета-излучающим радионуклидам составляет $8,5 \cdot 10^{17}$ Бк.

Для ППЗРО по результатам оценок безопасности установлены локальные критерии приемлемости.

1.1.4 Технические решения по захоронению РАО в Томской обл. (г. Северск)

Приповерхностный пункт захоронения РАО в Томской обл. по состоянию на 2024 г. находится на стадии проектирования. ППЗРО представляет собой комплекс зданий и сооружений, предназначенных для приёма, временного хранения, и окончательной изоляции кондиционированных РАО классов 3 и 4. Основным источником поступления РАО – АО «СХК» (отходы от производственной деятельности и вывода из эксплуатации объектов предприятия).

Общий объем захоронения РАО 3 и 4 классов за весь период эксплуатации (брутто – с учетом упаковок) составляет 138 000 м³ [7], в том числе:

- РАО 3 класса – 43 000 м³;
- РАО 4 класса – 95 000 м³.

По проекту упаковки РАО размещаются в железобетонных ограждающих конструкциях с габаритами 185,8×24×6,3 м, расположенных в девять рядов [7]. Ряды частично или полностью (в зависимости от рельефа) заглублены в землю. В каждом ряду размещается по 6 ячеек захоронения. Конструкция ячеек захоронения представлена на рисунке 1.4.

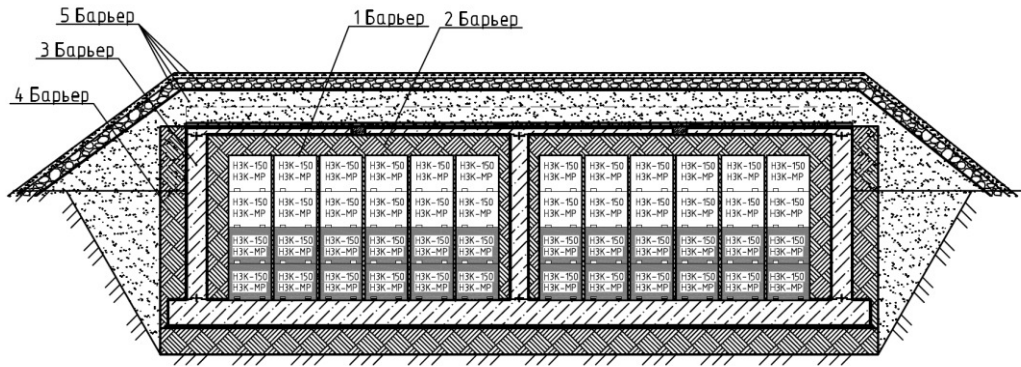


Рисунок 1.4 – Конструкция сооружений захоронения ППЗРО в Томской обл.

На захоронение в ППЗРО поступают упаковки РАО на основе контейнеров типа НЗК, ЖБУ, ЖЗК, КРАД, КМЗ, РАО в металлических бочках и фильтр-контейнерах (ФК), установленных в металлических клетях, а также РАО в мягких контейнерах типа БИГ-БЭГ.

Упаковки РАО в сооружениях захоронения размещаются в несколько ярусов: упаковки РАО класса 3 занимают нижние ярусы (ниже уровня земли), над ними размещаются упаковки РАО 4 класса. Упаковки РАО размещаются в сооружениях захоронения с помощью вилочного погрузчика.

Согласно проектной документации на ППЗРО действует система физических барьеров на пути распространения РВ с установленными сроками службы, включающая пять барьеров.

Первый барьер – стенки контейнеров. Срок службы железобетонных контейнеров типа НЗК, ЖБУ, ЖЗК при котором сохраняется их работоспособность как инженерного барьера (непроницаемость, механическая прочность) в ППЗРО, составляет не менее 300 лет.

Назначенный срок службы металлических контейнеров типа КМЗ и КРАД 50 и 30 лет соответственно.

Бочки, фильтр-контейнеры и мягкие контейнеры типа БИГ-БЭГ не рассматриваются проектом в качестве инженерных барьеров и элементов многобарьерной системы в долгосрочной перспективе.

Второй барьер – буферный материал на основе глин (смесь бентонита и песка). Буферный материал подаётся в сооружения захоронения через отверстия в верхнем перекрытии ячеек захоронения.

Согласно проектной документации, буферный материал выполняет изолирующую (противофильтрационную и противомиграционную) функцию в течение, как минимум, 300 лет. В дальнейшем продолжает выполнять функцию сорбционного барьера.

Третий барьер – бетонные сооружения стен и перекрытий сооружений захоронения ППЗРО.

Срок службы конструкций – 100 лет (на основании СП 63.13330-2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» [48], таблицы 1 ГОСТ 27751-2014 [49], ГОСТ 31384-2017 [50]).

Четвертый барьер – глиняный замок из жирной мятой глины по периметру (стены, дно) сооружений захоронения ППЗРО. Глиняный замок выполняет изолирующую и сорбционную функции в течение, как минимум, 500 лет.

Пятый барьер – покрывающий многослойный экран, состоящий из:

- гидроизолирующего экрана из глины и бентоматов;
- защитно-дренажного слоя из гравия и песка;
- противоэрозионного почвенно-растительного покрова.

Покрывающий экран выполняет изолирующую функцию в течение, как минимум, 500 лет.

Годовая производительность ППЗРО составляет 10000 м³ упаковок РАО. Режим работы ПЗРО – 250 дней в году.

Проектом предусмотрена сеть наблюдательных скважин по периметру сооружений захоронения, разработаны решения по мониторингу за ППЗРО. Данных по срокам мониторинга после закрытия сооружений захоронения в проектной документации и материалах обоснования лицензии не представлено.

По потенциальной радиационной опасности, ППЗРО относится к III категории: радиационное воздействие при возможной проектной аварии ограничивается территорией объекта, ППЗРО расположен в границах санитарно-защитной зоны АО «СХК».

Для ППЗРО по результатам оценок безопасности установлены локальные критерии приемлемости.

1.1.5 Обобщение данных по российским проектам ППЗРО

В РФ введён в эксплуатацию один и в процессе создания еще два ППЗРО для РАО классов 3 и 4. Общие данные по вместимости, месту размещения, составу барьеров безопасности и другим параметрам ППЗРО, включая данные по воздействию на население и окружающую среду приведены в материалах обоснования лицензии и отчетных документах эксплуатирующей организации – ФГУП «НО «РАО» [5-7, 51]. Технические решения по всем сооружениям захоронения данных ППЗРО идентичны – это полузаглублённые железобетонные ограждающие конструкции, поделённые перегородками на отсеки, в нижнюю часть которых (ниже уровня земли) устанавливаются упаковки РАО класса 3, а над ними размещаются упаковки РАО класса 4. В нижней части ограждающих конструкций и по периметру организуется барьер из глины – глиняный замок. Устанавливаемые в ограждающие конструкции упаковки РАО созданы на основе железобетонных контейнеров типа НЗК, ЖБУ, ЖЗК, металлических контейнеров типа КРАД,

КМЗ и металлических бочек. Пустоты между стенками ограждающих конструкций и упаковками РАО заполняются буферными материалами на основе бентонита.

Над ограждающими конструкциями возводится многослойный покрывающий экран, состоящий в основном из глины (противофильтрационный слой), щебня или гравия (защитно-дренажный слой) и растительного покрова (противоэрозионный слой). Конструкция покрывающего экрана для трёх российских ППЗРО разработана концептуально и подлежит уточнению при разработке проектов закрытия сооружений захоронения.

Основные технические характеристики сооружений захоронения российских ППЗРО приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики сооружений захоронения российских ППЗРО

Параметр	Значение		
	ППЗРО в Свердловской обл. (г. Новоуральск)	ППЗРО в Челябинской обл. (г. Озёрск)	ППЗРО в Томской обл. (г. Северск)
Год ввода в эксплуатацию	2016	2025 (ориентировочно)	2025 (ориентировочно)
Тип сооружений захоронения	Полузаглублённый (упаковки РАО класса 3 размещаются под упаковками РАО класса 4)		
Вместимость общая	55 тыс. м ³	225 тыс. м ³	138 тыс. м ³
Объём захораниваемых РАО класса 3	16 тыс. м ³ (~30 % от общей вместимости ППЗРО)	42 тыс. м ³ (~20 % от общей вместимости ППЗРО)	95 тыс. м ³ (~30 % от общей вместимости ППЗРО)
Объём захораниваемых РАО класса 4	39 тыс. м ³ (~70 % от общей вместимости ППЗРО)	183 тыс. м ³ (~80 % от общей вместимости ППЗРО)	43 тыс. м ³ (~70 % от общей вместимости ППЗРО)
Объём принимаемых в год на захоронение РАО	4,5 тыс. м ³ / год	15 тыс. м ³ / год	10 тыс. м ³ / год
Материалы барьеров безопасности и их сроки службы:	-		
-контейнеры для РАО класса 3			
-контейнеры для РАО класса 4			
	Железобетон (контейнеры НЗК, ЖБУ, ЖЗК), срок службы до 300 лет	Сталь углеродистая (бочки, контейнеры КРАД, КМЗ), срок службы до 50 лет	
-буферный материал	Бентонитовый глинопорошок, срок службы 100 лет	Бентонитовые pellets, срок службы 300 лет	Смесь песка и бентонита, срок службы 300 лет
- подстилающий экран	Глина, бентоматы, срок службы 500 лет		

Параметр	Значение		
	ППЗРО в Свердловской обл. (г. Новоуральск)	ППЗРО в Челябинской обл. (г. Озёрск)	ППЗРО в Томской обл. (г. Северск)
- покрывающий экран	Песок, щебень, бентоматы, глина, данных по срокам службы нет	Песок, щебень, бентоматы, глина, данных по срокам службы нет	Песок, гравий, бентоматы, глина, срок службы 500 лет
Уровень подземных вод на площадке размещения ППЗРО	16,3-24,3 м,	7,5-12,45 м	1,2-8,5 м
Допустимая суммарная активность захораниваемых РАО:	-		
- по бета-излучающим радионуклидам	нет данных	$8,5 \cdot 10^{17}$ Бк.	нет данных
- по альфа-излучающим радионуклидам (включая трансурановые)	нет данных	$2,3 \cdot 10^{13}$ Бк	нет данных
Критерии приемлемости упаковок РАО по удельной активности для РАО класса 3:	-		
- бета (гамма)-излучающие радионуклиды	$1,0 \times 10^7$ Бк/г		
- альфа-излучающие радионуклиды	$1,0 \times 10^3$ Бк/г		
- трансурановые радионуклиды	$1,0 \times 10^2$ Бк/г		
Критерии приемлемости упаковок РАО по удельной активности для РАО класса 4:	-		
- бета (гамма)-излучающие радионуклиды	$1,0 \times 10^4$ Бк/г		
- альфа-излучающие радионуклиды	$1,0 \times 10^2$ Бк/г		
- трансурановые радионуклиды	$1,0 \times 10^1$ Бк/г		
Сроки мониторинга за ППЗРО	нет данных		

Размещение ППЗРО осуществляется на площадках крупных предприятий, являющихся источниками образования РАО. Площадки данных предприятий, имеют ограничения на использование согласно [52], так как в их пределах имеются радиационные загрязнения [53, 54] и другие объекты использования атомной энергии, потенциальная опасность которых выше, чем строящихся ППЗРО. В связи с этим возможность применения принятых для данных ППЗРО решений на других площадках (например, вне территорий крупных предприятий атомной промышленности) требует отдельной оценки.

Однотипность решений, используемых в конструкции сооружений захоронения ППЗРО в Свердловской, Челябинской и Томской обл. обусловлена:

- существующим парком контейнеров, используемых предприятиями-поставщиками для кондиционирования низко- и среднеактивных РАО;
- попыткой разместить РАО классов 3 и 4 в одних сооружениях захоронения и при этом учесть требования Постановления Правительства РФ №1069 от 19.10.2012 г [2]. по глубине размещения РАО классов 3 и 4 (рисунок 1.1 в разделе 1.1.1, выше по тексту);
- отсутствием опыта проектирования и эксплуатации других сооружений захоронения (при разработке проектов ППЗРО в Челябинской и Томской обл. за основу были взяты решения из проектной документации ППЗРО в Свердловской обл., как референтного аналога, получившего положительное заключение главной государственной экспертизы [5]).

Для принятых решений по конструкции сооружений захоронения в Свердловской, Челябинской и Томской обл. обоснована безопасность [5-7], при этом нет сведений об обосновании выбора решений по конструкции сооружений захоронения из многообразия других различных технологий окончательной изоляции РАО.

По состоянию на 2024 г. имеется ряд публикаций, отражающих опыт эксплуатации первой очереди сооружений захоронения в Свердловской обл. и опыт обоснования безопасности ППЗРО в Челябинской и Томской обл. Так же имеются данные об эксплуатации аналогичных сооружений, но предназначенных для долговременного хранения РАО (заглублённые хранилища РАО предприятий «Радон», созданные в прошлом веке без намерения извлечения из них РАО). В числе проблемных вопросов, в публикациях отмечается:

- слишком большая номенклатура поступающих на захоронение контейнеров, что создаёт проблемы с унификацией грузоподъёмного и транспортного оборудования [55];
- необходимость конкретизации требований к параметрам буферных материалов, влияющих на безопасность ППЗРО [56, 57];
- возможность разрушения покрывающих экранов вследствие проседания нижележащих слоёв, появления трещин в гидроизоляционных материалах, попадания в них влаги и её промерзания / оттаивания в межсезонный период [58];
- возможность обводнения упаковок РАО классов 3 в нижней части сооружений захоронения вследствие поднятия уровня грунтовых вод или нарушения целостности гидроизолирующих слоёв [59, 60];
- несоответствие сроков службы барьеров безопасности (например, срок службы контейнеров НЗК в условиях захоронения – 300 лет, ограждающих конструкций – 100 лет) [61];
- отсутствие системы отвода протечек, возможных после закрытия ППЗРО [62];
- применение одних и тех же сооружений захоронения для разных классов РАО [59, 62].

Для перспективных ППЗРО целесообразно учесть опыт эксплуатации и проектирования первых российских сооружений захоронения, а также мировой опыт окончательной изоляции РАО.

1.2 Анализ зарубежных практик окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО

На сегодняшний день в мире 32 страны эксплуатируют атомные электростанции. В большинстве из них захоронение низко- и среднеактивных отходов с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов (РАО классов 3 и 4 по российской классификации [2]) – это реализованная задача.

В вопросах обращения с РАО на заключительных стадиях в мире выработаны единые подходы, заключающиеся в реализации основополагающих принципов безопасности жизни и здоровья людей и окружающей среды.

Основные подходы к задачам обращения с РАО на заключительных стадиях приведены в серии изданий МАГАТЭ (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Перечень основных изданий МАГАТЭ в области приповерхностного захоронения РАО

Обозначение документа	Наименование документа
SSR-5 [63]	Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности.
SSG-29 [64]	Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды. Пункты приповерхностного захоронения радиоактивных отходов
SSG-31 [65]	Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды. Мониторинг пунктов захоронения радиоактивных отходов.
SSG-23 [66]	Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды. Обоснование безопасности и оценка безопасности захоронения радиоактивных отходов
GS-G-3.4 [67]	Система менеджмента для захоронения радиоактивных отходов. Руководство по безопасности
NW-T-1.27 [68]	Принципы и подходы, применяемые при проектировании пунктов захоронения радиоактивных отходов
GSG-1 [69]	Классификация радиоактивных отходов
NW-G-1.1 [70]	Политика и стратегии обращения с радиоактивными отходами
NW-T-1.14 [71]	Состояние и тенденции в области обращения с РАО и ОЯТ
IAEA-TECDOC-1380 [72]	Определение пределов активности при захоронении радиоактивных отходов в пунктах приповерхностного захоронения
GSR Part 4 [73]	Стандарты безопасности. Оценка безопасности объектов и деятельности. Общие требования безопасности

Обозначение документа	Наименование документа
IAEA-TECDOC-1260 [74]	Порядок и способы закрытия пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов
IAEA-TECDOC-1255 [75]	Характеристики инженерных барьерных материалов в пунктах приповерхностного захоронения радиоактивных отходов
Technical reports series №493 [76]	Технические аспекты, связанные с проектированием и строительством инженерных барьеров для защиты окружающей среды

Согласно нормам безопасности SSR-5 [63] выбор способа захоронения должен осуществляться исходя из классификации РАО, определяемой удельной активностью и содержанием долгоживущих радионуклидов, а глубина размещения ПЗРО должна быть тем больше, чем большую потенциальную опасность представляют захораниваемые отходы (рисунок 1.5).

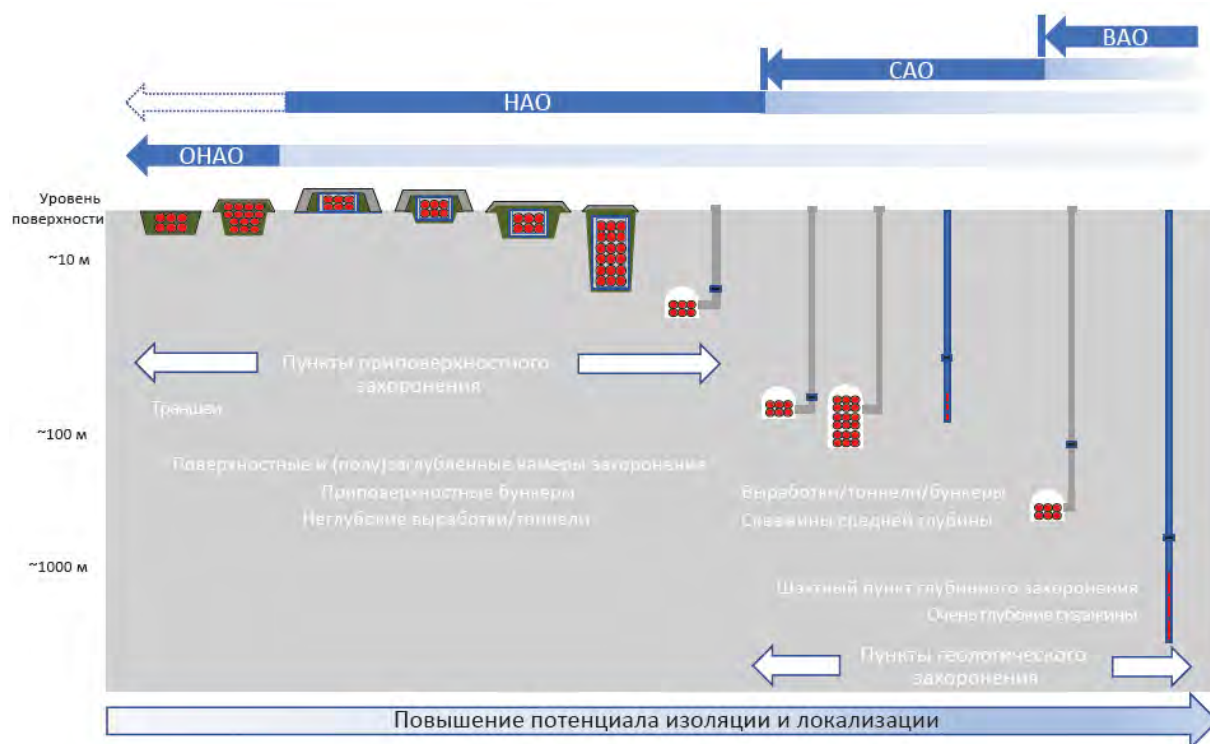


Рисунок 1.5 – Варианты захоронения применительно к различным классам РАО [63]

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, некоторые страны в качестве предпочтительного варианта выбирают захоронение низко- и среднеактивных отходов с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов в сооружениях, размещенных около земной поверхности (наземных или заглублённых) или в сооружениях более глубокого заложения. От глубины размещения сооружений захоронения зависят риски, связанные с потенциальным вторжением человека и воздействием климатических и экзогенных процессов (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Варианты сооружений захоронения приповерхностного ППЗРО различного заложения [70]

Долгосрочная безопасность ПЗРО обеспечивается сочетанием благоприятных характеристик площадки, инженерно-технических характеристик проекта, соответствующего вида и состава отходов, эксплуатационных процедур и мер ведомственного контроля. Согласно [77] система захоронения предназначена для изоляции отходов от доступной окружающей среды, для контроля выбросов радионуклидов, попадающих в доступную окружающую среду, и для смягчения последствий любых неприемлемых выбросов в неё. Этот подход определяет мировой опыт создания ППЗРО.

Обзор различных способов приповерхностного захоронения РАО, используемых в разных странах, представлен в разделах 1.2.1 ÷ 1.2.4.

1.2.1 Наземные сооружения захоронения

Современная концепция наземного захоронения низко- и среднеактивных отходов с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов одной из первых была реализована во Франции на объекте CSA в регионе Aube, спроектированном на базе опыта эксплуатации сооружения захоронения CSM, действующего в период с 1969 по 1994 годы [78, 79], а также опыта эксплуатации траншейных сооружений захоронения [79, 80].

Конструкция сооружения захоронения CSA (рисунок 1.7) представляет собой железобетонный модуль 25 м шириной и 8 м высотой, поделенный на отсеки. В отсеки мостовым краном под временным надвижным каркасным сооружением устанавливаются в штабель упаковки РАО. По мере заполнения отсеков пространство между упаковками заполняется буферным материалом (цементным раствором или песчано-бentonитовой смесью). Заполненный отсек хранения сверху бетонируется, образуя железобетонный куб. Над модулями захоронения после заполнения и бетонирования всех отсеков возводится многослойный покрывающий экран [81-84].

Под отсеками захоронения предусмотрена инспекционная галерея, в которой размещаются трубопроводы и отборные устройства для контроля возможных протечек воды в отсеках захоронения.

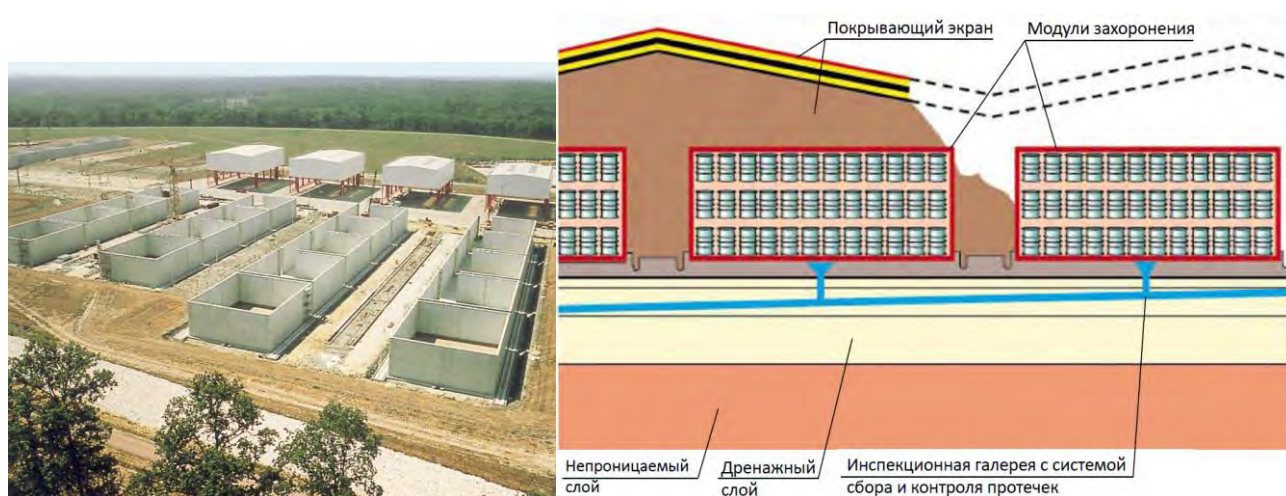


Рисунок 1.7 – Наземный ППЗРО CSA во Франции (слева – модули захоронения в процессе строительства, справа – сооружения захоронения после закрытия ППЗРО) [81-84]

Объект CSA состоит из нескольких десятков модулей захоронения. Общая вместимость модулей составляет около 1 млн. м³ РАО. Данный ППЗРО успешно эксплуатируется с 1992 года и в настоящее время технические решения, реализованные для него, тиражируются для других стран.

Аналогичные конструкции ППЗРО приняты для захоронения РАО в Испании [85-87], Литве [88, 89], Украине [90], Корее [91], Болгарии [92, 93] (рисунки 1.8 ÷ 1.9).

Для захоронения САО в данных ППЗРО используются железобетонные контейнеры, для захоронения НАО – металлические контейнеры. Удельная активность и состав РАО таков, что большая часть захороненных радионуклидов должна распасться в течение срока около 500 лет [94]. Срок ведомственного контроля таких ППЗРО составляет до 300 лет [95]. Считается, что для инженерных барьеров безопасности это достижимый срок с учётом эволюции их свойств во времени. Данный срок определён также исходя из условий потенциального дозового воздей-

ствия на население при реализации сценария вторжения человека не более 1 мЗв/год. Из сценариев вторжения рассматриваются: строительство дороги, возведение зданий, бурение скважин на месте ППЗРО и другие сценарии, которые могут быть реализованы после снятия ведомственного контроля.



Рисунок 1.8 – Наземные сооружения захоронения в Испании (сверху) [85], Литве (внизу слева) [88] и Корее (внизу справа) [91]

Несмотря на типизацию решений для наземных ППЗРО в части подстилающего экрана используются различные решения, с учётом гидрогеологических особенностей площадки. Для Болгарского ППЗРО, например, интересен опыт применения местных грунтов (лёссов) в основе подстилающего экрана, обеспечивающих сорбцию радионуклидов при инфильтрации воды через сооружения захоронения (рисунок 1.9) [93].

В Бельгии реализуется похожая концепция наземного ППЗРО, но позволяющая осуществлять долговременное хранение РАО (с возможностью извлечения упаковок) до принятия решения о закрытии ППЗРО – концепция так называемого обратимого захоронения.

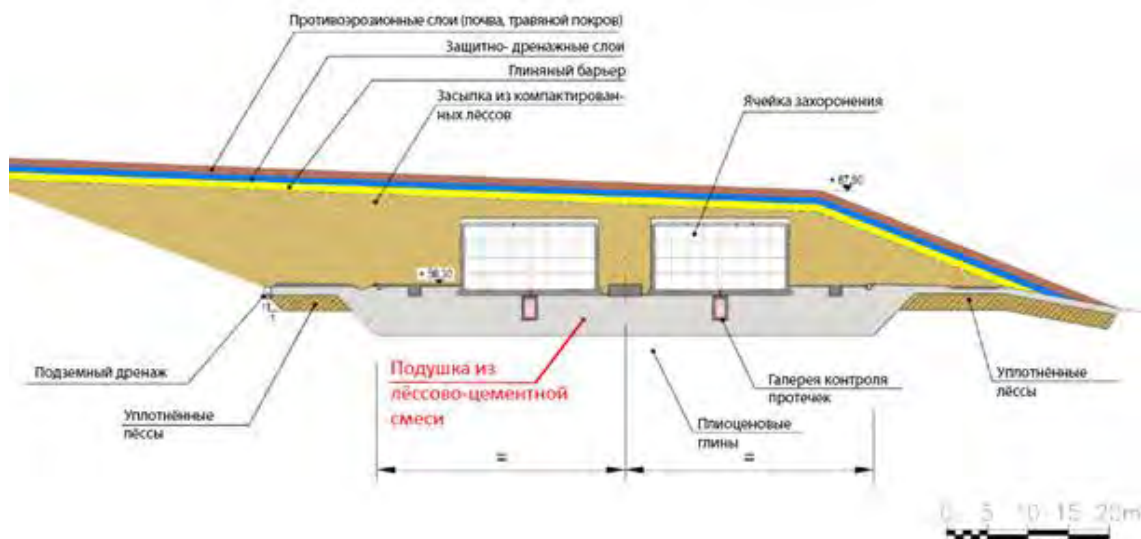


Рисунок 1.9 – Наземные сооружения захоронения в Болгарии [93]

Для этого отсеки для хранения / захоронения целиком находятся под стационарным укрытием [96-99]. Принятие решения об окончательной изоляции, после которого осуществляется заполнение отсеков буферными материалами, разборка укрытия, создание покрывающего экрана, отложено на неопределённый период. Данное решение будет приниматься с учётом опыта эксплуатации ПЗРО в других странах, а также по результатам наблюдения за состоянием упаковок в процессе их длительного хранения.

Концептуально процесс захоронения в Бельгийском ППЗРО осуществляется по следующей схеме:

- РАО (в бочках или навалом) помещают в железобетонные контейнеры. Пустоты в контейнере заполняют цементным раствором, образуя таким образом единый железобетонный блок (т.н. «monolith»). Данный блок является первым барьером безопасности в системе захоронения.

- Контейнеры с омоноличенными РАО размещаются в модуле захоронения (железобетонный бункер с толстыми усиленными стенами). Установка контейнеров производится под укрытием, защищающем модуль захоронения от внешних природных факторов. После заполнения модуля осуществляется засыпка установленных контейнеров бентонитной смесью и организация железобетонного перекрытия.

- Укрытие демонтируется и на модуле захоронения организуется защитное покрытие, основу которого составляют слои глины, песка, геотекстиля и грунта для высадки зеленых насаждений.

Конструкция бельгийских сооружений захоронения представлена на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Наземные сооружения захоронения в Бельгии (сверху слева – план площадки ППЗРО, сверху справа – сооружение захоронения в разрезе, внизу слева – вид на конструкции для сбора возможных протечек, внизу справа – вид на ППЗРО после возведения покрывающего экрана) [96-99]

Состав покрывающего экрана для наземных ППЗРО в Бельгии, Франции Испании, Болгарии (рисунок 1.11) приблизительно одинаков.

Покрывающий экран состоит из:

- слоя местного грунта для заполнения пустот между сооружениями захоронения и формирования уклонов;
- противофильтрационного слоя из глины и рулонных гидроизолирующих материалов (бентоматов, полиэтилена);
- дренажно-защитного слоя из щебня или гравия;
- противозрозионного слоя (грунт и растительный покров);
- рулонных материалов (геотекстиль, георешётка), используемых при возведении экрана во избежание осыпания сыпучих фракций и проникания мелких сыпучих фракций в более крупные.

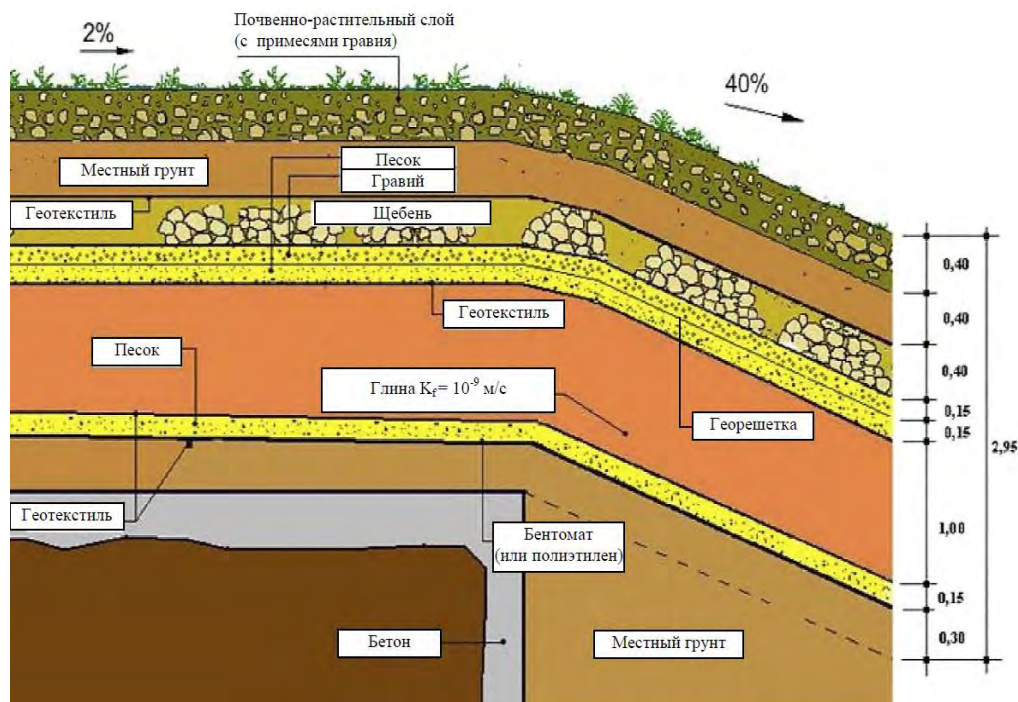


Рисунок 1.11 – Конструкция покрывающего экрана сооружения захоронения РАО в Испании [86]

В бельгийском ППЗРО, также как и во французском ППЗРО CSA и его аналогах применяется система с инспекционными галереями для контроля за состоянием сооружений захоронения, а также для сбора и контроля возможных протечек воды.

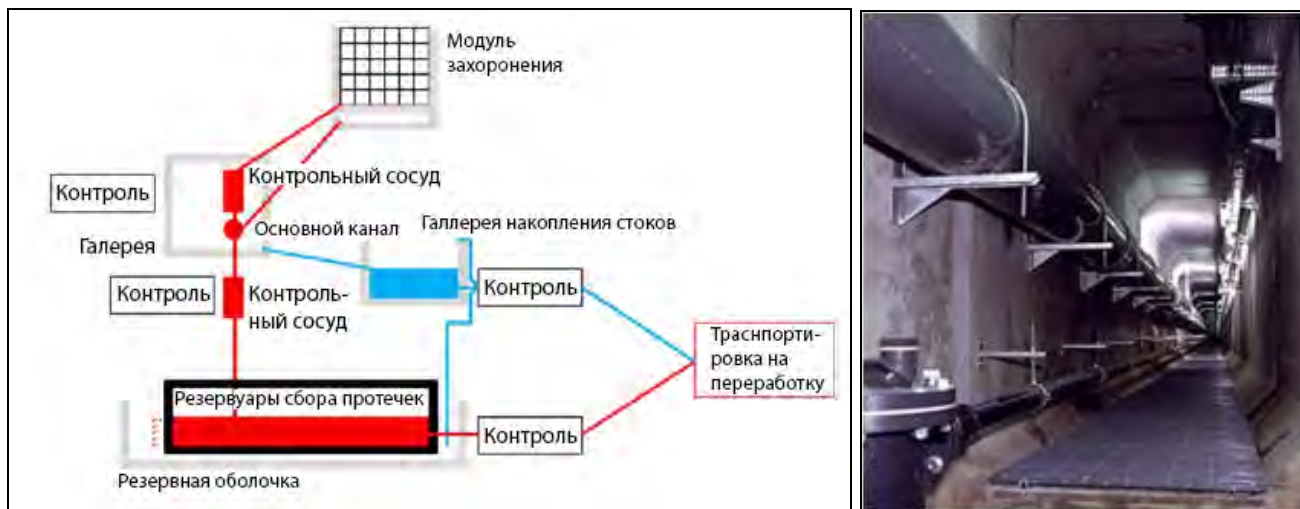


Рисунок 1.12 – Конструкция системы сбора и контроля возможных протечек наземного ППЗРО (слева – схема системы бельгийского ППЗРО [97], справа – вид на инспекционную галерею с трубопроводами сбора протечек под французскими сооружениями захоронения [80])

Система сбора и контроля возможных протечек (рисунок 1.12) представляет собой достаточно сложный комплекс, состоящий из емкостного оборудования, трубопроводов, контрольно-

измерительных приборов, систем инженерного обеспечения. Такой комплекс требует регулярного обслуживания и доступа персонала.

Применение инспекционных галерей позволяет контролировать состояние сооружений захоронения ППЗРО, но вместе с тем создает потенциальные каналы связи между границей подстилающего экрана и внешней средой, а также создаёт трудности, связанные с необходимостью обслуживания галерей после закрытия ППЗРО.

Вопросы по продолжительности эксплуатации инспекционных галерей и способам их закрытия (заполнения буферными материалами) на сегодняшний день находятся в процессе решения.

1.2.2 Заглублённые сооружения захоронения, расположенные в траншеях или котлованах

Объекты окончательной изоляции, в которых упаковки РАО размещаются в траншеях или котлованах, были одними из первых сооружений захоронения РАО. К таким сооружениям относится, например, ППЗРО Бетти (Beatty), введённый в эксплуатацию в 1962 г. в штате Невада, США (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – ППЗРО Бетти (с) в штате Невада, США (1962 г.) [100]

Сооружения захоронения ППЗРО Beatty представляют собой простую траншею без каких-либо ограждающих конструкций, на дно которой укладываются упаковки низкоактивных отходов в металлических бочках и контейнерах. Загрузка упаковок осуществляется на открытом

воздухе. Грунт, извлечённый при рытье траншеи, используется для обратной засыпки и создания покрывающего экрана. Объект находится в засушливой пустыне Амаргоса, траншеи вырыты в плотных ненасыщенных аллювиальных отложениях, что даёт потенциальные преимущества для захоронения РАО.

Похожие сооружения создавались в прошлом веке и на других площадках США, расположенных в штатах Вашингтон, Кентукки, Иллинойс, Невада, Нью-Йорк и Южная Каролина [101-103].

Несмотря на благоприятные условия размещения в итоге четыре из семи площадок (в штатах Невада, Кентукки, Иллинойс и Нью-Йорк) были закрыты из-за обнаружившейся миграции радионуклидов. Причинами выхода радионуклидов являлись:

- недостаточность инженерных барьеров безопасности (основным барьером являлась вмещающая порода);
- недостаточная изученность гидрогеологических характеристик площадок (несмотря на малое количество осадков, характер и движение грунтовых вод приводили к постепенному вымыванию радионуклидов из мест захоронения);
- отсутствие (в то время) требований к форме РАО, размещаемых в ППЗРО, и ограничений по содержанию долгоживущих и слабосорбируемых радионуклидов.

В настоящее время в США продолжается эксплуатация пунктов захоронения низкоактивных РАО траншейного типа, с учётом опыта эксплуатации первых сооружений захоронения, также имеются планы по созданию такого ППЗРО для НАО в Канаде [104].

Выбор траншейного способа захоронения обусловлен экономическими соображениями (это один из наиболее простых вариантов создания ППЗРО), а также наличием в Америке благоприятных для такого ППЗРО мест размещения – регионов с сухим климатом и низким уровнем грунтовых вод.

Например, подземные воды на площадке ППЗРО Andrews в штате Техас залегают на глубине более 150 м от основания сооружений захоронения (рисунок 1.14). Сухой жаркий климат (менее 40 см осадков в год) позволяет захоранивать РАО в этом ППЗРО без каких-либо инженерных систем, предназначенных для защиты от осадков. Извлеченная при создании котлована красная глина используется для засыпки пустот и возведения покрывающего экрана. Для захоронения используются различные типы упаковок: бетонные, металлические, полимерные. Допускается размещение в ППЗРО крупногабаритного радиоактивно загрязнённого оборудования (например, парогенераторов АЭС).

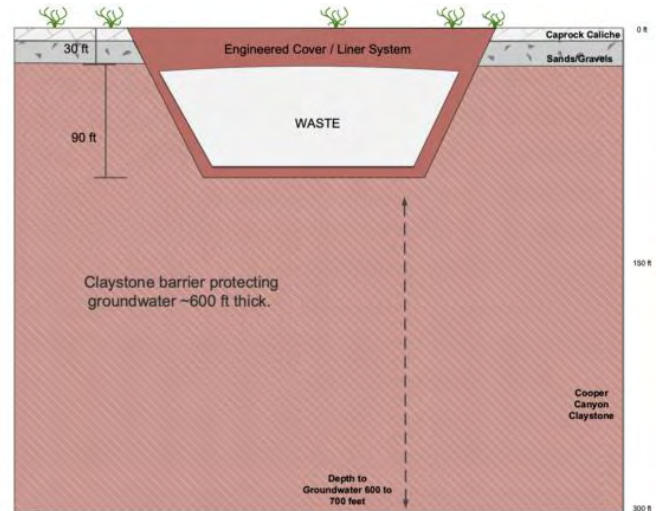


Рисунок 1.14 – Захоронение РАО в штате Техас, США [105] (слева – засыпка упаковок РАО глиной, справа – схема размещения сооружений захоронения)

Сроки ведомственного контроля ППЗРО в США определены исходя из американской классификации РАО [106], согласно которой отходы, допустимые для размещения в ППЗРО делятся на три класса:

- «class A» (объёмная активность <0.1 Ки/фут³, срок потенциальной опасности до 100 лет);
- «class B» (объёмная активность <2 Ки/фут³, срок потенциальной опасности менее 300 лет);
- «class C» (объёмная активность <7 Ки/фут³, срок потенциальной опасности менее 500 лет).

В США на сегодняшний день действует 4 траншейных ППЗРО: Clive (class A), Hanford (class C), Barnwell (class A, B, C), Andrews (class A, B, C).

В Европе в середине прошлого века, также как и в США, создавались сооружения захоронения траншейного типа. Первые сооружения были созданы в Великобритании и Франции. Ввиду особенностей климата и размещения данных стран выявились проблемы с эксплуатацией таких сооружений, так как они подвержены затоплению во время осадков и при сезонном поднятии грунтовых вод [80]. В итоге Франция перешла на концепцию наземного захоронения РАО [82], а в Великобритании в единственном в стране централизованном ППЗРО Drigg [107] траншейная концепция сохранилась, но была модернизирована (часть траншей была закрыта, уровень заглубления сооружений захоронения поднят, предусмотрены дополнительные барьеры безопасности).

ППЗРО Drigg [108] действует в Великобритании с 1950-х годов. Исторические захоронения на данной площадке реализованы в простых протяжённых траншеях, расположенных параллельно друг другу в глиняных грунтах, с возведением многослойного покрывающего экрана.

Современная часть ППЗРО представляет собой несколько заглублённых на глубину около 5 м широких бетонированных площадок с цементно-бентонитными стенами по периметру. На

данные площадки загружаются в несколько ярусов металлические контейнеры типа ISO. После заполнения площадок поверх массива контейнеров должен возводиться многослойный покрывающий экран, единый на всю площадку ППЗРО (рисунок 1.15).

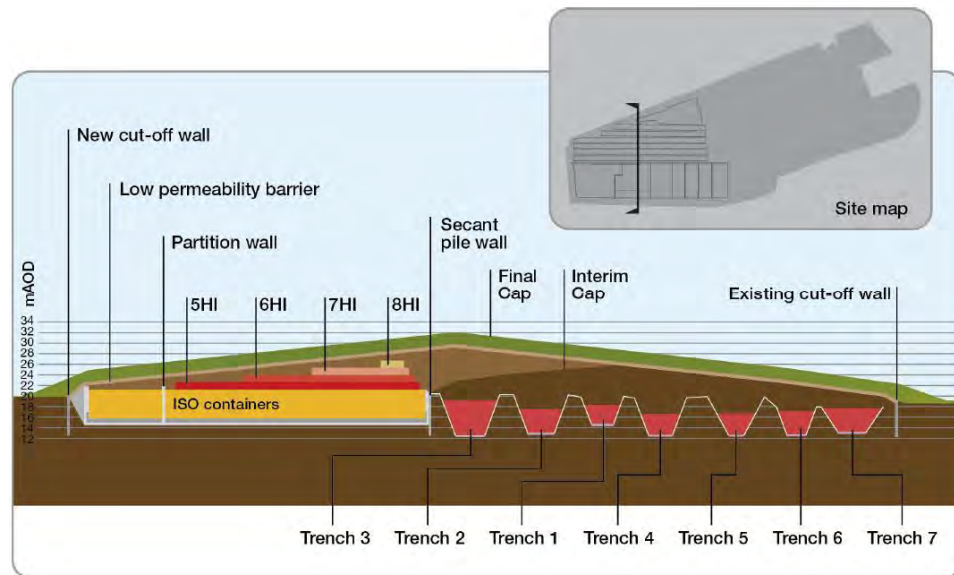


Рисунок 1.15 – Полузаглублённый ППЗРО для НАО в Великобритании (правая часть кургана (траншеи 1-7) – закрытая часть ПЗРО, загрузка которой осуществлялась с середины прошлого века по 1995 г., левая часть (жёлтая) – загружаемая в настоящее время площадка) [107]

Вместимость ППЗРО Drigg составляет около 1 млн. м³ РАО. Срок ведомственного контроля – 100 лет. Данный ППЗРО предназначен для захоронения только низкоактивных отходов. Концепция окончательной изоляции среднеактивных РАО в Великобритании разрабатывается (рассматриваются различные способы, включая геологическое захоронение в ППЗРО [108]).

В Японии окончательная изоляция низкоактивных отходов осуществляется в сооружениях, расположенных в заглублённых котлованах. Согласно японской классификации РАО [109], на глубине до 50 м допускается захоранивать отходы, содержащие преимущественно короткоживущие радионуклиды. Для таких отходов в 1992 г. в регионе Rokkasho создан ППЗРО, размещаемый в котловане на глубине от 10 до 16 м (рисунок 1.16).

В отличие от США, где траншейные ППЗРО располагаются в пустынях, японская площадка размещения ППЗРО характеризуется большим количеством осадков и умеренно холодным климатом. В связи с этим ППЗРО оснащено более сложными инженерными системами, похожими на системы современных наземных ППЗРО, описанных в разделе 1.2.1.

Сооружения захоронения ППЗРО Rokkasho представляют собой железобетонные ограждающие конструкции, разделённые на отсеки (ячейки). Ограждающие конструкции оснащены инспекционными галереями для сбора, контроля и отвода возможных протечек. В ячейки свер-

ху загружаются упаковки РАО (стальные бочки) с помощью козлового крана, на который установлено укрытие для защиты зоны проведения работ от осадков. Ячейки захоронения закрываются съёмными железобетонными плитами (плиты снимаются на время загрузки упаковок РАО). По мере заполнения ячеек захоронения пустоты между упаковками РАО заполняются цементным раствором (рисунок 1.17).

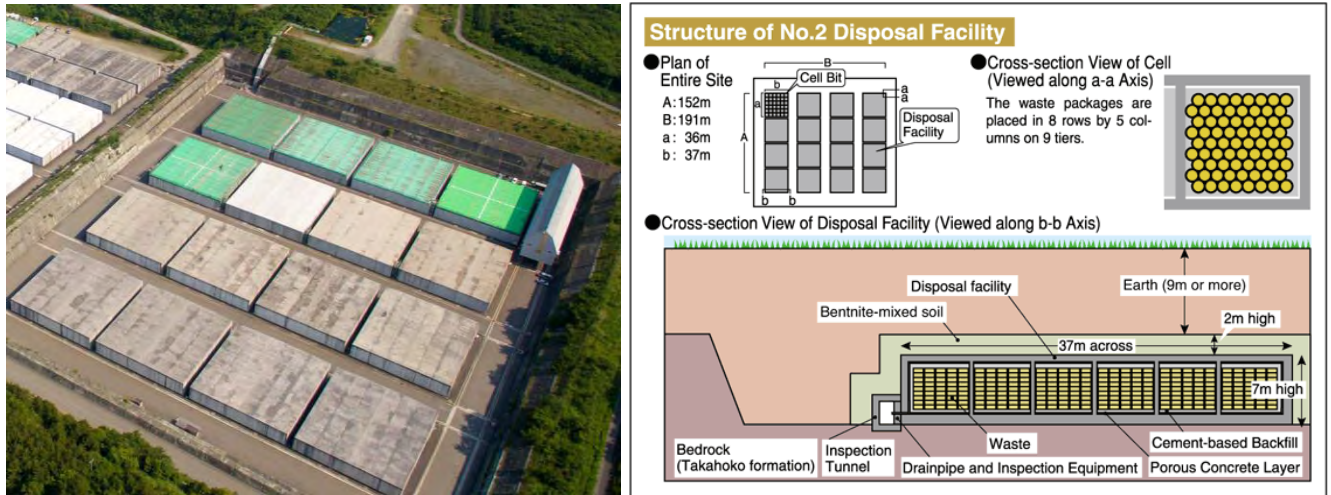


Рисунок 1.16 – Захоронение РАО в Японии в регионе Rokkasho
(слева – вид на модули захоронения, справа – схема с основными конструктивными решениями ППЗРО) [110]

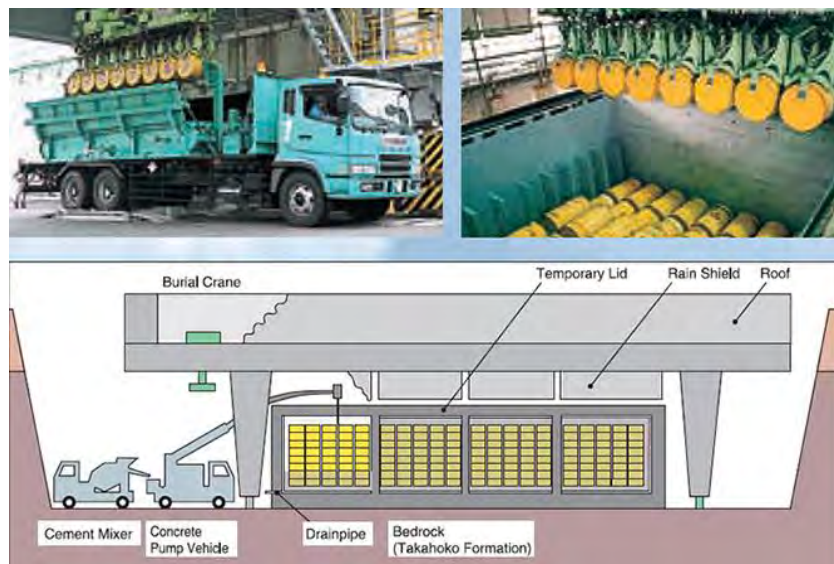


Рисунок 1.17 – ППЗРО в регионе Rokkasho [110]
(сверху – операции по обращению с упаковками РАО, внизу – схема заполнения пустот цементным раствором)

После заполнения всех ячеек захоронения над ограждающими конструкциями возводится покрывающий экран на основе бентонитовых глин, на который сверху укладывается слой местного грунта мощностью от 4 до 9 м.

Вместимость ППЗРО в регионе Rokkasho составляет 125 тыс. м³ РАО. Срок ведомственного контроля составляет 300 лет [110].

Аналогичная японскому ППЗРО Rokkasho конструкция сооружений захоронения, размещаемых в котловане на глубине около 15 м используется в Чехии, на площадке АЭС Dukovany, однако для чешского ППЗРО не используется укрытие для защиты зоны проведения работ от погодных условий (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 – ППЗРО для низко- и среднеактивных РАО в Чехии, на площадке АЭС Dukovany [111]

Заглублённые ППЗРО траншейного типа для низко- и среднеактивных РАО эксплуатируются также в Индии [112, 113], ЮАР [114] и Китае [115].

С учётом проблем траншейных сооружений с обводнением, при проектировании китайского ППЗРО рассматривались различные варианты организации дренажных систем (рисунок 1.19) и размещения упаковок РАО (рисунок 1.20), в частности – решение с размещением упаковок САО под упаковками НАО в одних сооружениях захоронения – аналогично решениям, принятым для российских ППЗРО в Томской, Свердловской и Челябинской обл. (рисунки 1.2-1.4) [5-7]. В последствии было принято решение о размещении в китайском ППЗРО упаковок САО и НАО отдельно друг от друга.

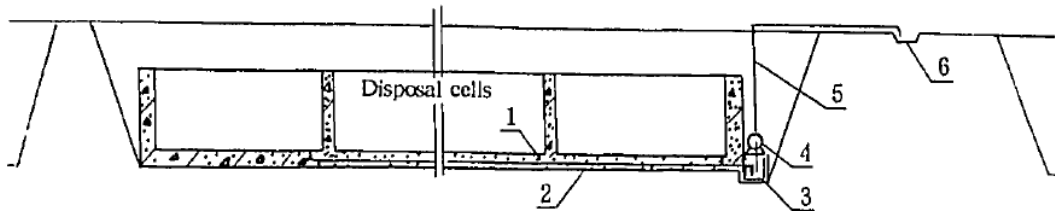


Рисунок 1.19 – Один из вариантов организации дренажной системы траншейных сооружений захоронения РАО в Китае (1 – ограждающие конструкции, 2 – дренажный трубопровод, 3 – колодец, 4 – насос, 5 – трубопровод, 6 – водоотводная канавка) [115]

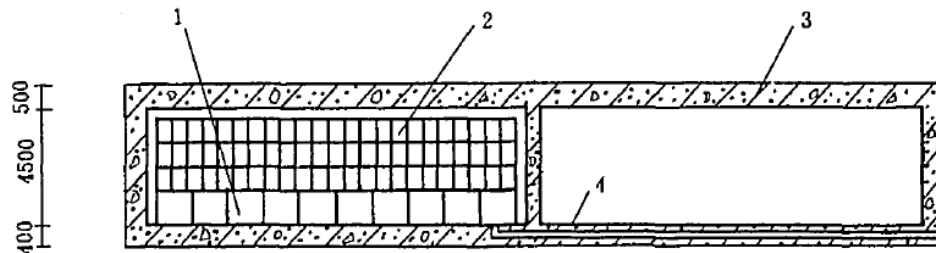


Рисунок 1.20 – Чертеж ограждающих конструкций для низко- и среднеактивных РАО китайского ППЗРО (1 – упаковки САО, 2 – упаковки НАО, 3 – ограждающие конструкции, 4 – дренажная система) [115]

Опыт использования траншейных сооружений захоронения имеется также во Франции и Испании применительно к задаче окончательной изоляции отходов категории ОНАО [116, 117].

1.2.3 Подземные сооружения захоронения

Захоронение НАО и САО в подземных ПЗРО осуществляется или планируется осуществлять в Германии, Венгрии, Чехии, Швейцарии, Швеции, Финляндии, Словении. В ряде стран принято решение о захоронении НАО в наземных или слабо заглублённых ППЗРО, а захоронение САО в подземных ПЗРО. К таким странам относится, например, Великобритания.

Подземные сооружения захоронения для НАО и САО имеют разную конструкцию: в виде шахт с выходом устья на дневную поверхность и шахт, свод которых скрыт под землёй, в виде подземных горизонтальных выработок различной конфигурации, связанных с дневной поверхностью как вертикальными стволами, так и наклонными съездами.

Сооружение захоронения НАО и САО ППЗРО Vrbina [118] в Словении представляет собой шахту, проходка которой выполнена с дневной поверхности. Диаметр шахты около 27 м, глубина около 55 м. Нижняя часть шахты, в которой должны размещаться РАО, находится в третичном слое миоценового ила с коэффициентами проницаемости от 10^{-9} до 10^{-7} м/с, который расположен под песчано-гравийными отложениями реки Сава (рисунок 1.21).

ПЗРО Vrbina рассчитано на приём около 18 тыс. м³ РАО. Упаковки РАО представляют собой железобетонные контейнеры с установленными в них металлическими бочками. На вре-

мя загрузки упаковок РАО над шахтой устанавливается сооружение для защиты зоны проведения работ от осадков. Под укрытием размещается козловой кран. Стены шахты выполнены из бетона. В нижней части шахты предусмотрено основание из бетона, способного пропускать воду, под которым размещается инспекционная галерея, оснащенная трубопроводами и насосами для сбора и отвода возможных протечек. Инспекционная галерея связана с дневной поверхностью вспомогательным стволом, используемым для доступа персонала и прокладки трубопроводов системы отвода протечек.

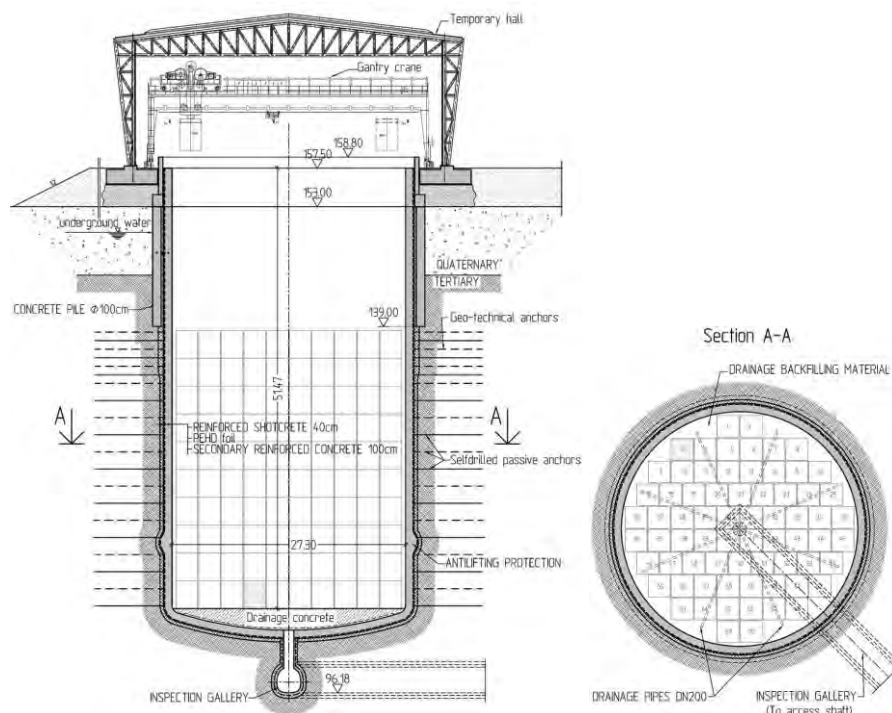


Рисунок 1.21 – Подземное сооружение захоронения в виде шахты для НАО и САО в Словении [119]

Проект закрытия сооружения захоронения ПЗРО Vrbina предполагает заполнение шахты от верха упаковок РАО до дневной поверхности глиной. Толщина глинистого слоя составляет около 15 м. ПЗРО по состоянию на 2024 год находится в завершающей стадии строительства. Ввод ПЗРО в эксплуатацию планируется в 2028 г. Срок ведомственного контроля за ППЗРО будет составлять 300 лет.

Шахты сопоставимого с ПЗРО Vrbina размера, но полностью локализованные под землёй (без выхода устья шахты на дневную поверхность), используются для захоронения САО в Швеции и Корее и для захоронения НАО и САО в Финляндии (рисунок 1.22).

В шведском подземном ПЗРО SFR упаковки САО размещаются в шахте, а НАО – в четырёх горизонтальных выработках длиной 160 м. Для обеспечения надёжной изоляции упаковок с

САО, между железобетонными стенками шахты и вмещающей породой предусмотрен бентонитовый слой.

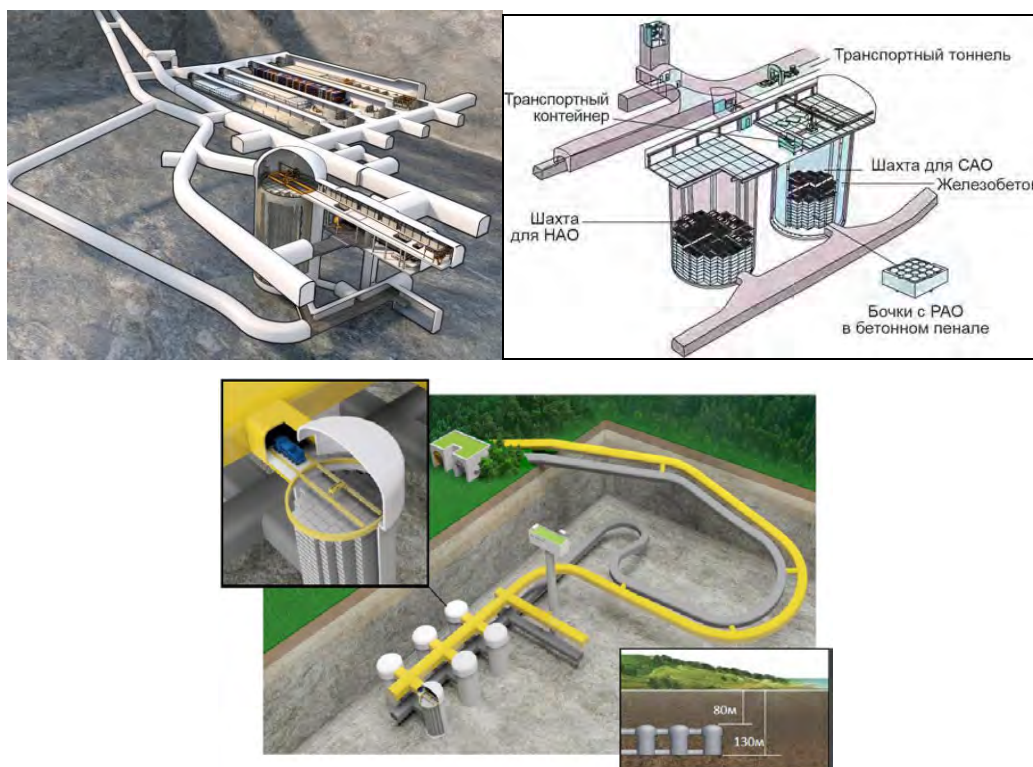


Рисунок 1.22 – Подземные сооружения захоронения в виде шахт в Швеции (сверху слева) [120], Финляндии (сверху справа) [121], Корее (внизу) [122]

Для ПЗРО в Швеции, Финляндии и Корее характерен приблизительно одинаковый набор барьеров безопасности: упаковки РАО на основе железобетонных контейнеров для САО и металлических контейнеров для НАО, бетонные стенки шахты, буферный материал на основе бентонита для САО и цемента для НАО и кристаллические вмещающие формации. Глубина сооружений захоронения в Швеции – 60 м, в Финляндии – до 110 м, в Корее – 210 м (130 м ниже уровня моря).

Сооружения захоронения для НАО и САО в виде горизонтальных протяженных выработок (камер, тоннелей) эксплуатируются в Венгрии, в ПЗРО Bataapati [123], введенным в эксплуатацию в 2012 г. Данный ПЗРО предназначен для захоронения низко- и среднеактивных РАО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов. ПЗРО размещается в скальном массиве на глубине около 250 м и рассчитан на приём 40 тыс. м³ РАО.

Сооружения захоронения ПЗРО Bataapati представляют собой шесть камер в гранитном массиве, соединённые с дневной поверхностью двумя наклонными тоннелями длиной 1,7 км с углом наклона 10° (рисунок 1.23).

Описанные выше по тексту сооружения захоронения созданы специально под задачу окончательной изоляции РАО. Их габариты и конфигурация изначально разработаны для раз-

мещения упаковок РАО и заполнения пустот буферным материалом с учётом гидрогеологических особенностей площадки. При этом в Чехии и Германии имеется опыт использования существующих подземных выработок, оставшихся после закрытия рудников полезных ископаемых.

В Чехии захоронение РАО осуществляется с конца 1960-х годов в бывшем известняковом руднике Richard [125]. В Германии захоронение РАО осуществлялось в бывших соляных рудниках на объектах ASSE (с 1967 по 1978 годы) [126] и Morsleben (с 1970-х по 1998 годы) [127], планируется создание ПЗРО на основе выведенного из эксплуатации железорудного рудника Konrad [128].

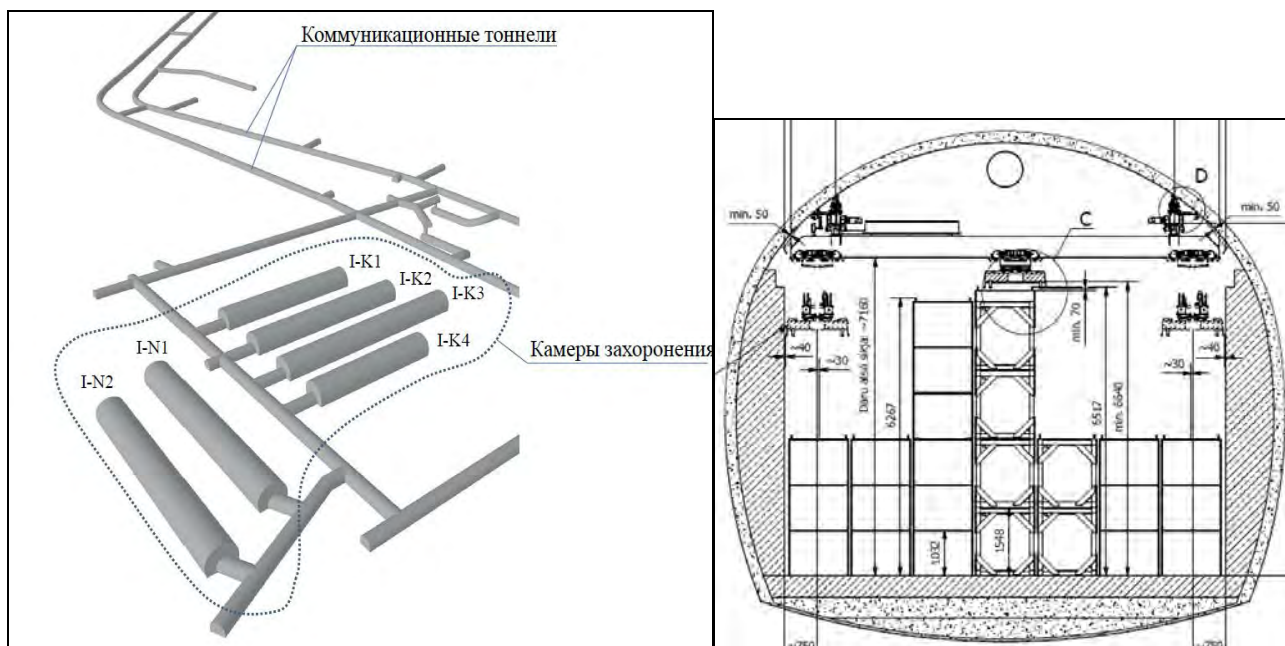


Рисунок 1.23 – Подземные сооружения захоронения в виде камер в Венгрии (слева – конфигурация подземных выработок ПЗРО, справа сечение одной из камер захоронения (IK-4) [124]

Для ПЗРО Richard (Чехия) характерны небольшие сечения подземных выработок, в то время как, например, в ПЗРО Morsleben (Германия) захоронение РАО осуществлялось в выработках большого объёма с высоким сводом (рисунок 1.24).

Наличие больших объёмов пустот в таких сооружениях как Morsleben требует соответствующих объёмов обратной засыпки, что удорожает стоимость закрытия ПЗРО. В ПЗРО Morsleben работы по засыпке буферным материалом подземных выработок, в которых размещены РАО, завершены. Для сооружений захоронения Richard вопросы заполнения пустот в выработках пока не решены – несмотря на меньшие, по сравнению с рудниками Morsleben, объёмами пустот, их количество и конфигурация не позволяют разработать простые и экономически приемлемые решения по их заполнению буферными материалами.



Рисунок 1.24 – Подземные сооружения захоронения в закрытых рудниках по добыче полезных ископаемых (слева – ПЗРО Richard, Чехия [125], справа - ПЗРО Morsleben, Германия) [127]

ПЗРО на месте соляного рудника ASSE (Германия) в настоящее время выводится из эксплуатации по причине выявленного в 1988 г. свища соляного раствора, потенциально способного размыть упаковки РАО. В числе вариантов вывода из эксплуатации рассматривается в том числе и извлечение упаковок РАО из рудника и захоронение в новом месте.

С учётом опыта эксплуатации подземных выработок ПЗРО в прошлом веке проект современного ПЗРО Konrad для НАО и САО предполагает создание новых подземных выработок в существующем закрытом железорудном руднике.

Упаковки РАО планируется размещать в горизонтальных сводчатых выработках (тоннелях захоронения) шириной 7 м, высотой 6 м и длиной до 1 км. Расстояние между тоннелями захоронения составляет 28 м (толщина целика). В подземной части упаковки перемещаются погрузчиками в тоннели захоронения и укладываются в штабель, заполняя сечение тоннеля. По мере заполнения тоннеля через каждые 50 м формируются секции – массив контейнеров закрывается бетонной перегородкой и через систему трубопроводов, проложенную в верхней части тоннеля, подается буферный материал, заполняя пространство между контейнерами. В качестве упаковок для захоронения используются железобетонные и металлические контейнеры (рисунок 1.25).

Объекты захоронения ПЗРО Konrad размещаются на глубине от 800 до 1300 м в оолитовых известняках, находящихся под слоем глин мощностью от 160 до 400 м, т.е. Konrad, также как ASSE и Morsleben относится к пунктам глубинного захоронения (ПГЗРО), что для задач окончательной изоляции НАО и САО является редкой практикой. Кроме Германии захоронение НАО и САО в ПГЗРО планируется осуществлять только в Швейцарии [129] и Канаде [130].

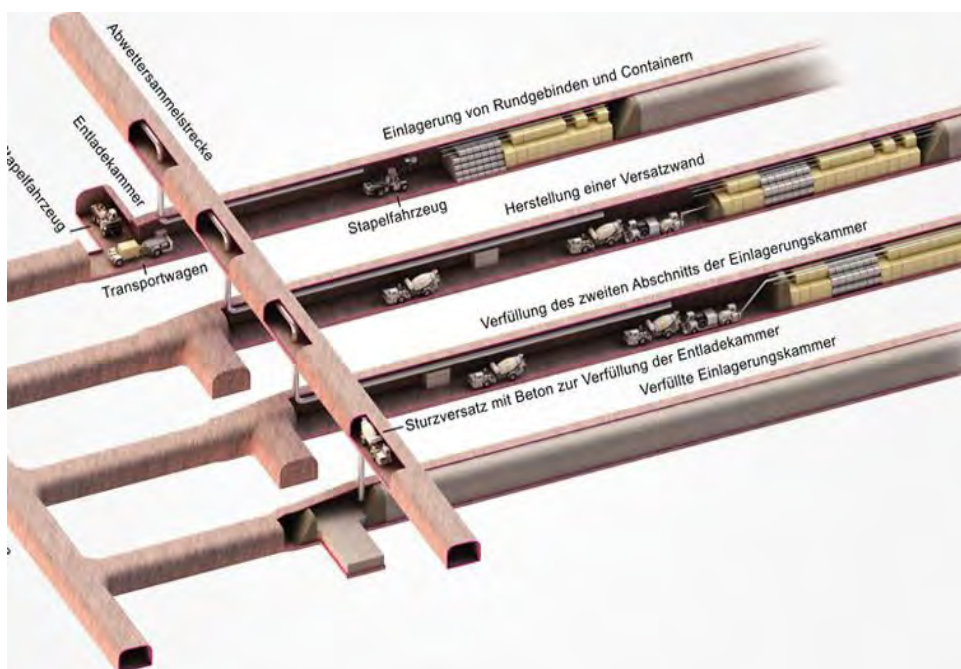


Рисунок 1.25 – Подземные сооружения захоронения ПЗРО Konrad, Германия [128]

1.3 Обобщение мирового опыта

По данным МАГАТЭ [131] в настоящее время во всем мире безопасно функционирует около 40 объектов для приповерхностного захоронения низко- и среднеактивных РАО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов, и ожидается, что в ближайшем будущем будут введены в эксплуатацию еще несколько десятков объектов. Около трети стран, в которых расположены атомные станции, не имеют действующих объектов для захоронения отходов низкого и среднего уровня активности. Среди них несколько крупных ядерных стран, включая, например, Канаду (25 реакторов) и Швейцарию (пять реакторов). В этих странах отходы в настоящее время хранятся на площадках атомных электростанций или во временных хранилищах отходов.

Сведения по мировым практикам окончательной изоляции РАО собраны и систематизированы в ряде публикаций [101, 132-135] и сборниках МАГАТЭ [71, 77, 95, 136, 137].

В части захоронения НАО и САО обзор существующих способов захоронения представлен в [101, 133, 134, 136]. Обзоры по материалам и конструкциям контейнеров для захоронения НАО и САО представлены в [138, 139].

В таблице А.2 Приложения А на основании источников [71 – 146] приведены данные по способам захоронения, вместимости, месте и глубине размещения, срокам ведомственного контроля пунктов захоронения НАО и САО для всех стран, в которых принята стратегия окончательной изоляции РАО, в которых эксплуатировались или эксплуатируются ПЗРО, а также для

стран, в которых пока не созданы ПЗРО, но имеются конкретные планы по их созданию. В таблице А.2 не приводятся данные по пунктам захоронения, созданным в середине прошлого века, которые закрыты и опыт эксплуатации которых признан не удачным (как правило, это траншейные сооружения без каких-либо инженерных барьеров безопасности).

В разных странах используются различные способы захоронения НАО и САО: окончательная изоляция таких отходов осуществляется в наземных, заглублённых, среднеглубинных и даже глубинных ПЗРО, отличающихся как по показателям безопасности, так и по стоимости.

В ряде стран выбор способа захоронения НАО и САО определён без учёта экономических факторов – исходя из национального законодательства. Например, в Германии и Швейцарии на законодательном уровне все РАО подлежат глубинному захоронению, несмотря на то что это наиболее дорогостоящий способ захоронения, потенциал по изоляции РАО которого избыточен для низко- и среднеактивных отходов.

Анализ стоимостных показателей различных вариантов захоронения РАО выполнен в [147-155]. Ключевым фактором, оказывающим влияние на удельную стоимость захоронения РАО, является способ окончательной изоляции (приповерхностный или подземный – среднеглубинный) и вместимость ПЗРО (объём).

Анализ зависимости стоимости захоронения кубометра РАО от объемов сооружений захоронения (рисунок 1.26) [155] показывает многократное сокращение удельной стоимости захоронения РАО с увеличением вместимости ПЗРО. Это объясняет мировую практику возведения крупных централизованных объектов окончательной изоляции отходов. Страны, нарабатывающие большие количества РАО (Великобритания, Франция, США), эксплуатируют пункты окончательной изоляции, рассчитанные на захоронение около 1 млн. м³ отходов.

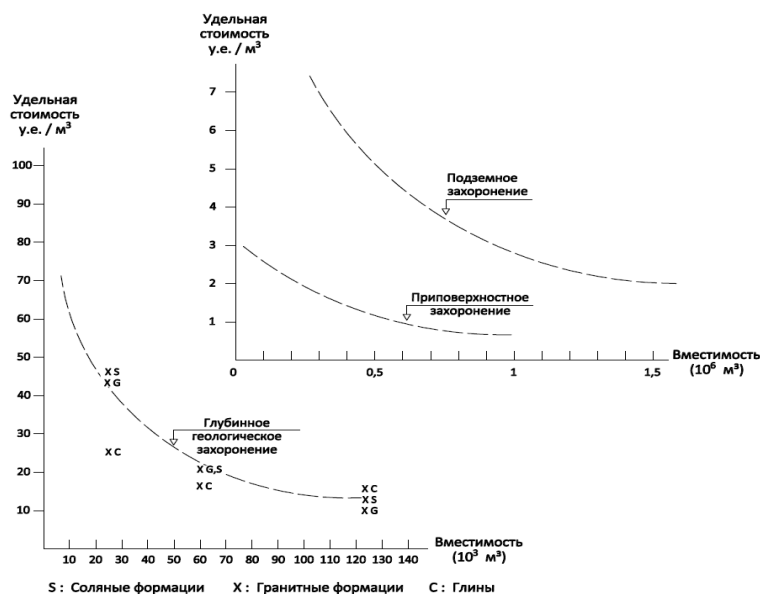


Рисунок 1.26 – Зависимость стоимости захоронения РАО от вместимости ПЗРО [155]

Каждый способ окончательной изоляции РАО имеет свои достоинства и недостатки и выбор того или иного варианта захоронения должен осуществляться с учётом стоимостных показателей ПЗРО. Достоинства и недостатки различных способов захоронения РАО представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – достоинства и недостатки различных способов захоронения РАО

Конструкция ПЗРО	Достоинства	Недостатки
Наземный	• Невысокие капитальные затраты на строительство • Менее жесткие требования к геологии участка • Простота транспортно-технологической схемы загрузки упаковок	• Влияние сезонных колебаний температур • Большие площади отчуждаемой территории • Сложная многослойная конструкция покрывающего экрана • Необходимость обслуживания покрывающего экрана; • Чувствительность к внешним воздействиям (особенно на период загрузки)
Заглубленный (траншейный)	• Невысокие капитальные затраты на строительство • Простота транспортно-технологической схемы загрузки упаковок • Меньшие габариты покрывающего экрана по сравнению с наземным ПЗРО	• Те же недостатки, что и у наземного варианта, плюс: – дополнительные объёмы земляных работ; – возможность обводнения при колебании уровня грунтовых вод.
Подземный (средне-глубинный)	• Устойчивость к внешним воздействиям, к экзогенным процессам • Отсутствие сезонных перепадов температур • Наличие геологического барьера безопасности • Небольшие площади отчуждаемой территории (наземной части ПЗРО) • Возможность размещать РАО, содержащие долгоживущие и слабосорбируемые радионуклиды (за счёт наличия геологического барьера безопасности)	• Высокие капитальные затраты на строительство • Особые требования к геологии участка • Особые требования к спуско-подъёмному оборудованию для РАО
Глубинный	• Те же достоинства, что и у подземного (среднеглубинного) способа и при этом: – наибольшая устойчивость к внешним воздействиям; – наибольшее удаление РАО от наземных экосистем; – малая вероятность вторжения человека.	• Те же недостатки, что и у подземного (среднеглубинного) способа, но преумноженные за счёт глубины залегания сооружений захоронения

Опыт эксплуатации первых сооружений захоронения для НАО и САО [79, 133], достоинства и недостатки различных способов захоронения [59, 62], данные по стоимости захоронения РАО [147-155] обусловили современные общие подходы к созданию ПЗРО. Такие подходы, представлены в руководствах МАГАТЭ [63-77], национальных стандартах стран, обращающихся с РАО.

Применительно к задаче выбора способа приповерхностного захоронения РАО общие подходы заключаются в следующем:

- выбор способа захоронения определяется исходя из характеристик РАО и условий площадки размещения ПЗРО (климатических, гидрогеологических, инфраструктурных и др.);
- наиболее экономичным и при этом достаточным для обеспечения безопасного захоронения низкоактивных РАО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов считается наземный и траншейный тип ПЗРО. Согласно [147] капитальные затраты на среднеглубинные сооружения захоронения в среднем на 30% больше, чем на наземные/траншейные сооружения. Для захоронения среднеактивных РАО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов используются как наземный и траншейный тип ПЗРО, так и среднеглубинные ПЗРО;
- современные приповерхностные сооружения захоронения (наземные, траншейные) проектируются с учетом срока ведомственного контроля около 300 лет [95], который считается достижимым с точки зрения сроков службы инженерных барьеров безопасности. По истечении этого срока рассматриваются сценарии вторжения человека в систему захоронения РАО согласно основным подходам к оценкам безопасности МАГАТЭ [63-65]. При реализации сценариев вторжения максимальное потенциальное дозовое воздействие на население не должно превышать 1 мЗв/год. Исходя из этого определяются характеристики РАО, допустимые для приповерхностного захоронения (критерии приемлемости ППЗРО);
- сооружения захоронения создаются простой формы и конфигурации преимущественно из природных материалов для обеспечения надёжности и долговечности, а также для возможности достоверного прогнозирования эволюции их свойств [75];
- основным механизмом попадания радионуклидов в окружающую среду является выход их с водой, попадающей в сооружения захоронения при деградации ИББ. По этой причине сооружения захоронения проектируются с учётом климатических и гидрогеологических характеристик площадки и как правило оснащаются системой отвода протечек;
- контейнеры для захоронения НАО в ППЗРО как правило не выполняют функцию барьера на пути миграции радионуклидов и изготавливаются из стали или полимерных материала-

лов, а контейнеры для захоронения САО являются барьером безопасности и изготавливаются из бетона;

- при захоронении НАО и САО для инженерных барьеров безопасности повсеместно используются материалы на основе бетона и глины (бетон как материал для ограждающих конструкций, контейнеров для САО и заполнения пустот между упаковками РАО, глина как материал для создания гидроизолирующих слоёв подстилающего и покрывающего экрана, а также для заполнения пустот между упаковками РАО);

- захоронение НАО и САО осуществляется как правило в разных сооружениях захоронения;

- несмотря на то, что для создания приповерхностных ПЗРО основными барьерами безопасности являются инженерные барьеры, очень важны гидрогеологические характеристики площадки.

Для задач выбора способа приповерхностного захоронения НАО и САО обобщение мирового опыта позволяет сузить спектр рассматриваемых вариантов создания ППЗРО. Для этих задач интересен также анализ изменений подходов к выбору способов захоронения РАО во времени – определение тенденций и перспективных направлений в технологиях окончательной изоляции НАО и САО.

1.4 Тенденции в технологиях окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО

Более чем полувековой опыт строительства и эксплуатации ПЗРО позволяет определить статистические данные по используемым в разных странах типам ПЗРО и проанализировать изменения, происходящие в технологиях окончательной изоляции РАО.

Данные по использованию на сегодняшний день в мире различных типов сооружений захоронения представлены на рисунке 1.27.

Самыми экономичными в части капитальных затрат на строительство вариантами являются наземный и заглублённый (траншейный) тип сооружений захоронения. Все ПЗРО большой вместимости (свыше 0,5 млн. м³), за исключением ПЗРО Konrad в Германии, являются наземными или траншейными.

Траншейными были первые сооружения захоронения, создаваемые в конце 1950-х начале 1960-х годов. Опыт их эксплуатации показал, что создание таких сооружений наиболее эффективно на площадках с сухим климатом и низким уровнем грунтовых вод. По этой причине в Европе практически отказались от использования траншейных типов ППЗРО для НАО и САО и перешли на наземные сооружения – наиболее универсальные и менее зависимые от уровня

грунтовых вод на площадке захоронения. Для диаграммы, представленной на рисунке 1.27, характерно, что бóльшая часть траншейных ППЗРО эксплуатируется в США и Индии. В Европе же всего 4 из 21 существующих пунктов захоронения являются траншейными (остальные – наземные или подземные и глубинные).

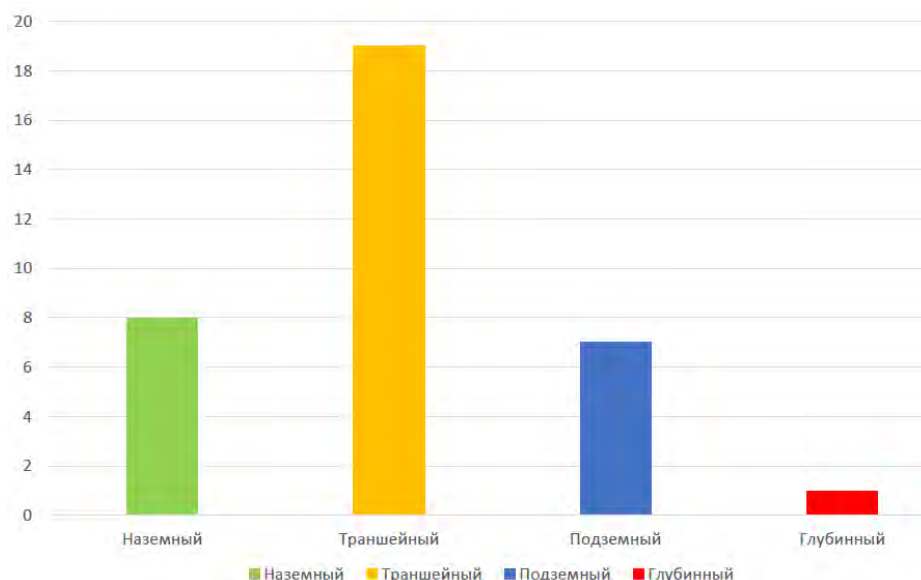


Рисунок 1.27 – Количество действующих ПЗРО для НАО и САО по типам на 2024 г.

Динамика ввода в эксплуатацию наземных и траншейных ППЗРО в мире и в странах Европы представлена в виде диаграмм с количеством действующих ППЗРО на каждое десятилетие на рисунках 1.28, 1.29.

Рост численности наземных ППЗРО в Европе прогнозируется перспективой ввода в эксплуатацию наземных сооружений захоронения для НАО и САО в Литве и Белоруссии.

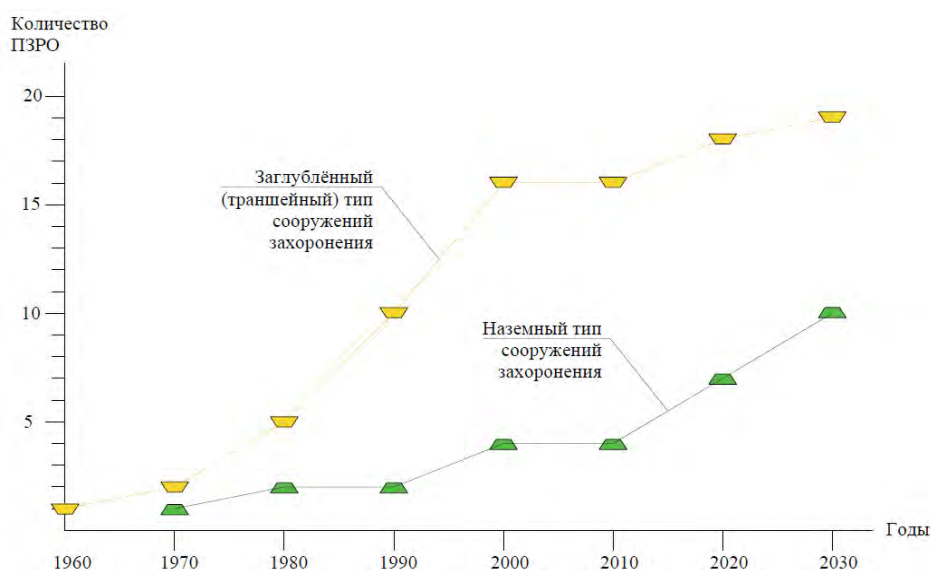


Рисунок 1.28 – Количество ППЗРО наземного и траншейного типов для НАО и САО в мире

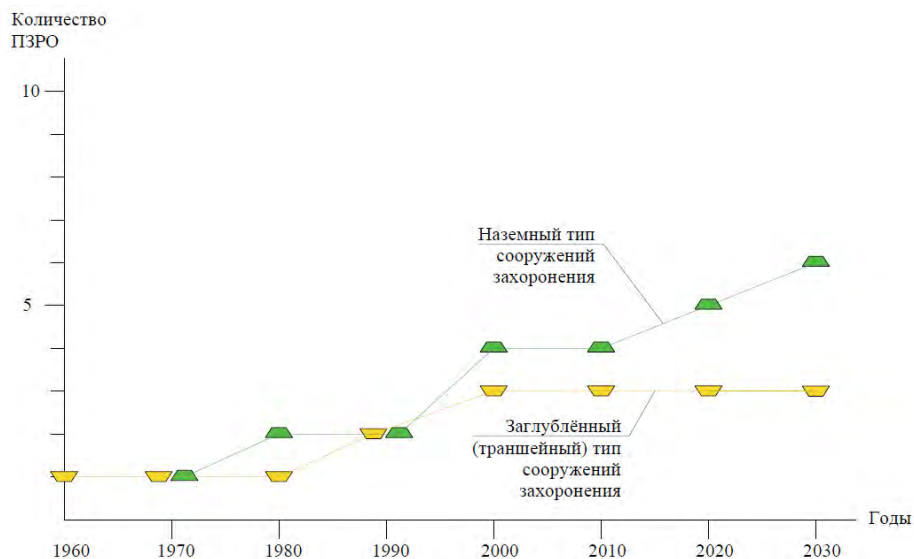


Рисунок 1.29 – Количество ППЗРО наземного и траншейного типов для НАО и САО в Европе

С момента ввода в эксплуатацию ППЗРО CSA во Франции в регионе Aube в 1992 г. наметилась тенденция использования основных технических решений этого ППЗРО в других странах в качестве типовых. К таким решениям относятся:

- наземное размещение сооружений захоронения;
- ограждающие конструкции в виде типовых бетонных модулей, поделённых на отсеки, верхнее перекрытие которых бетонируется по мере заполнения отсеков упаковками РАО;
- захоронение упаковок САО и НАО в разных модулях захоронения;
- использование лёгкого металлического каркасного сооружения для защиты от ветра и осадков, перемещаемого между отсеками захоронения и между модулями захоронения;
- покрывающий экран в виде многослойной конструкции из местного грунта, глины, песка, щебня и рулонных материалов (геотекстиля, георешетки, бентоматов или полиэтилена);
- оснащение ППЗРО системой отвода протечек.

Данные решения являются результатом многолетнего опыта эксплуатации различных сооружений захоронения (рисунок 1.30).



Рисунок 1.30 – Тенденции по выбору технологий захоронения РАО во Франции (вверху слева – захоронение РАО в заглубленных траншеях (1969 г.); вверху справа – захоронение РАО на открытом воздухе на наземном бетонном основании (1985 г.); внизу – современный наземный ПЗРО с бетонными отсеками, укрытием для защиты от осадков, и инспекционной галереей для сбора и контроля протечек (внизу справа показан отбор проб в инспекционной галерее) [80]

В зарубежных ППЗРО намечается тенденция на использование проницаемых оснований, препятствующих накоплению воды в сооружениях захоронения и реализации сценария «перелива», описанного в руководстве МАГАТЭ по обоснованию безопасности ППЗРО [66]. Проницаемые основания создают на основе пористого бетона, крупных фракций природных сорбентов, смесей песка и бентонита, с использованием естественных и инженерных систем для сбора и отвода воды. Системы отвода воды создают даже для ППЗРО, создаваемых в засушливых регионах с низким уровнем грунтовых вод, таких как в ЮАР (рисунок 1.31).

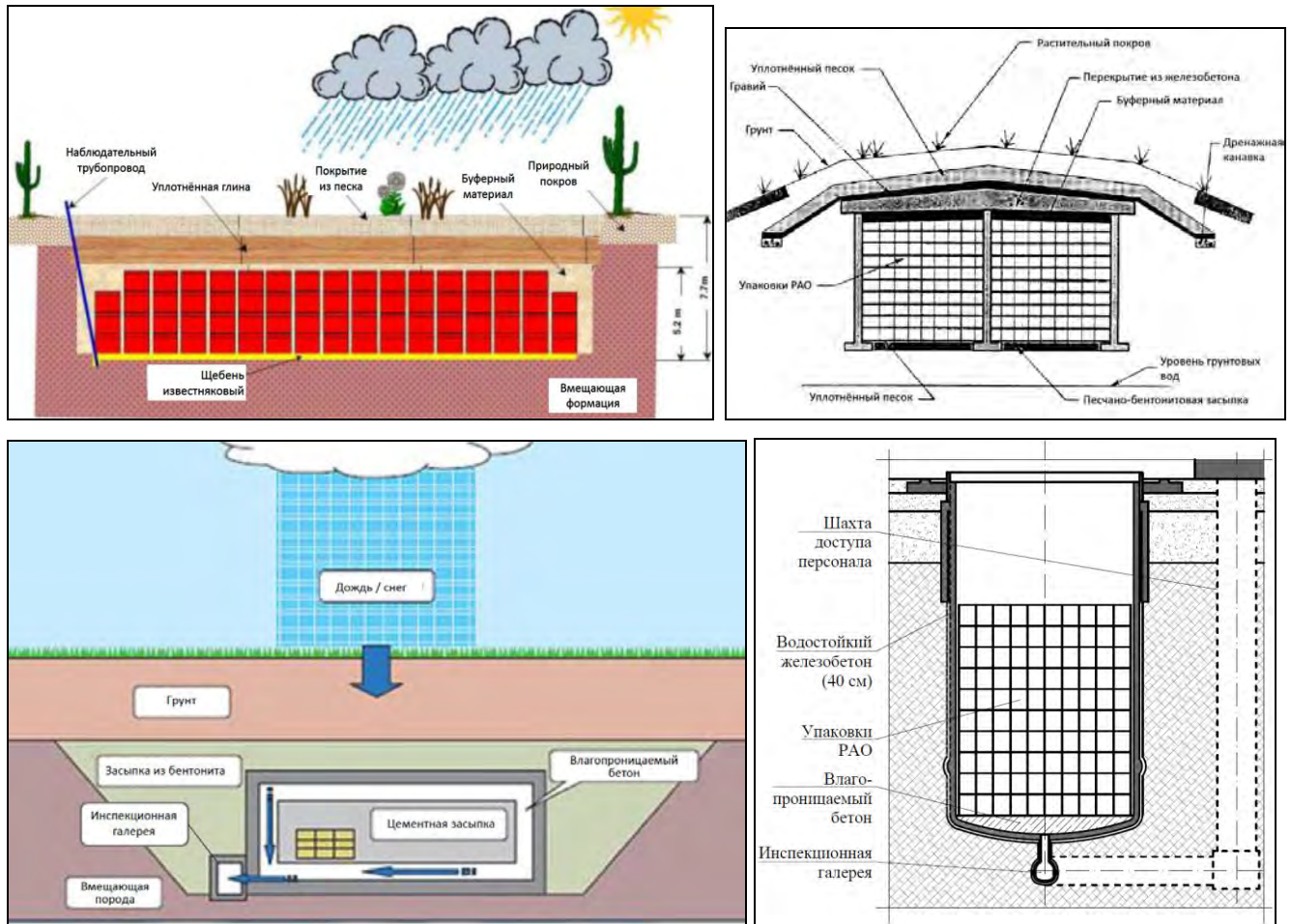


Рисунок 1.31 – Тенденции на создание проницаемых оснований для отвода протечек (вверху слева – основание из известнякового щебня ППЗРО в ЮАР [114]; вверху справа – основание из песка с бентонитом ППЗРО в Канаде [136]; внизу слева – основание из влагопроницаемого бетона ППЗРО в Японии [110]; внизу справа – основание из влагопроницаемого бетона ППЗРО в Словении [119])

Из числа геологических формаций, признанных наиболее благоприятными для окончательной изоляции РАО (глины, кристаллические породы и соли) намечается тенденция на использование глин в качестве основных вмещающих формаций для заглублённых (траншейных) и подземных пунктов захоронения НАО и САО. Из всех закрытых, действующих и планируемых к вводу в эксплуатацию ПЗРО только 4 объекта размещаются в солях, это глубинные пункты захоронения в Германии и США: Asse [126], Morsleben [127], Gorleben [156], WIPP [157]. В таких странах как Швеция и Финляндия выбор кристаллических пород обусловлен отсутствием альтернативных вмещающих формаций.

Выводы к главе 1

В мире накоплен многолетний опыт создания и эксплуатации пунктов захоронения низко- и среднеактивных РАО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов (РАО

классов 3 и 4 по российской классификации РАО [2]). Перспектива распада в таких отходах большей части радионуклидов через несколько сотен лет после закрытия ПЗРО позволяет использовать сооружения на основе преимущественно инженерных барьеров безопасности, и размещать их около земной поверхности при условии соответствующего контроля за местом захоронения. При этом в ряде стран используются и среднеглубинные и даже глубинные пункты захоронения, основу безопасности которых составляют геологические барьеры, однако стоимость таких ПЗРО значительно выше, чем приповерхностных.

Наиболее экономичные способы окончательной изоляции РАО – это захоронение в наземных сооружениях, или в слабо заглублённых – траншеях или котлованах. Захоронение в траншеях / котлованах применимо только в регионах с сухим климатом, низким уровнем грунтовых вод и вмещающими формациями, способными сорбировать радионуклиды. В остальных случаях целесообразно применение наземного способа захоронения, экономичного и универсального, наименее зависимого от гидрогеологических условий площадки размещения ППЗРО. Это подтверждает опыт создания различных типов ППЗРО, в результате которого в Европе практически отказались от траншейных сооружений захоронения, подверженных в европейском климате затоплению, и используют или наземные или среднеглубинные сооружения. Согласно статистическим данным, использование траншейных сооружений захоронения в мире начинает сокращаться, а наземных увеличиваться.

С момента создания первых ППЗРО технологии захоронения РАО существенно изменились. Современные ППЗРО предусматривают:

- ведомственный контроль за сооружениями захоронения в пределах 300-500 лет;
- ограничение на содержание долгоживущих радионуклидов и активность захораниваемых РАО исходя из оценки потенциальных дозовых воздействий на население для сценариев вторжения по истечении сроков ведомственного контроля;
- использование различных барьеров безопасности для захоронения НАО и САО;
- использование сооружений захоронения с многобарьерной системой безопасности (упаковки РАО, ограждающие конструкции, буферные материалы, подстилающий и покрывающие экраны);
- использование систем контроля: за соответствием упаковок критериям приемлемости ПЗРО, за состоянием барьеров безопасности (для тех барьеров, которые доступны для проведения контроля), систем контроля возможных протечек.

Несмотря на многообразие способов окончательной изоляции, различия в характеристиках РАО и площадок размещения ПЗРО на сегодняшний день созданы типовые сооружения захоронения. К ним относятся наземные сооружения с бетонными ограждающими конструкция-

ми, устанавливаемыми на основание, обеспечивающее дренаж возможных протечек, над которыми сверху возводится многослойный покрывающий экран.

На основе статистических данных по способам окончательной изоляции РАО, опыта эксплуатации сооружений хранения и захоронения РАО, данных, полученных при оценках безопасности российских проектов ППЗРО, и других факторов следует, что для задач окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО классов 3 и 4 целесообразно для будущих ППЗРО рассмотреть вариант наземного размещения сооружений захоронения (рисунок 1.32).



Рисунок 1.32 – Факторы, на основе которых определена целесообразность перехода от практики использования полузаглублённых ППЗРО к наземным ППЗРО

Использование наземных сооружений позволит для перспективных ППЗРО использовать решения, не подверженные влиянию уровня грунтовых вод на площадке захоронения и обеспечить типизацию решений, что позволит сократить затраты на проектирование и предлагать универсальные решения как для регионов РФ, так и для стран, в которых РФ является поставщиком услуг ядерного топливного цикла.

Обзор зарубежных практик окончательной изоляции РАО позволяет констатировать, что для наземного способа захоронения существуют различные варианты решений по конструкции сооружений захоронения и материалам ИББ: для наземного способа захоронения используются различные контейнеры, буферные материалы, различные решения по отводу воды из сооружений захоронения, по созданию покрывающих и подстилающих экранов. Для выбора оптимальных решений по захоронению РАО в наземном ППЗРО в РФ необходимо:

- выполнить анализ возможных решений по конструкции и материалам ИББ;

- определить нормативные требования к основным конструктивным элементам сооружений захоронения, исследовать функции, выполняемые ИББ, определить параметры, отвечающие за выполнение барьерных функций, и на основе этих данных предъявить требования к конструкции и материалам ИББ;
- исследовать стоимостные показатели ПЗРО и вклад каждого ИББ в общую стоимость захоронения РАО.

Анализ системы ИББ ППЗРО представлен в главе 2. Предложения по облику ППЗРО, разработанные по результатам анализа системы ИББ, представлены в главе 3, оценка разработанных предложений – в главе 4.

2 АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПУНКТОВ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО

Для приповерхностных сооружений захоронения и в особенности наземных сооружений инженерные барьеры являются основными в системе безопасности ППЗРО. Несмотря на наличие типовых решений по наземному захоронению РАО для каждого ИББ возможны различные варианты технических решений.

Возможные решения по конструкции и материалам ИББ ППЗРО, разработанные автором настоящего исследования по результатам обзора мировых практик окончательной изоляции РАО, приведены на рисунке 2.1.

С учётом неопределённостей в площадке размещения перспективного ППЗРО между наземным и заглублённым способом окончательной изоляции РАО в главе 1 сделан выбор в пользу наземного способа, как менее подверженного влиянию уровня грунтовых вод.

Для выбора оптимальных решений по конструкции каждого ИББ в настоящей главе проведён анализ:

- требований нормативной базы к ИББ;
- функций и назначения каждого барьера безопасности;
- показателей долговечности различных материалов ИББ;
- технико-экономических показателей сооружений захоронения ППЗРО.

По результатам анализа технико-экономических показателей ППЗРО определен вклад каждого ИББ в общую стоимость захоронения РАО и определены пути оптимизации затрат на приповерхностное захоронение РАО.

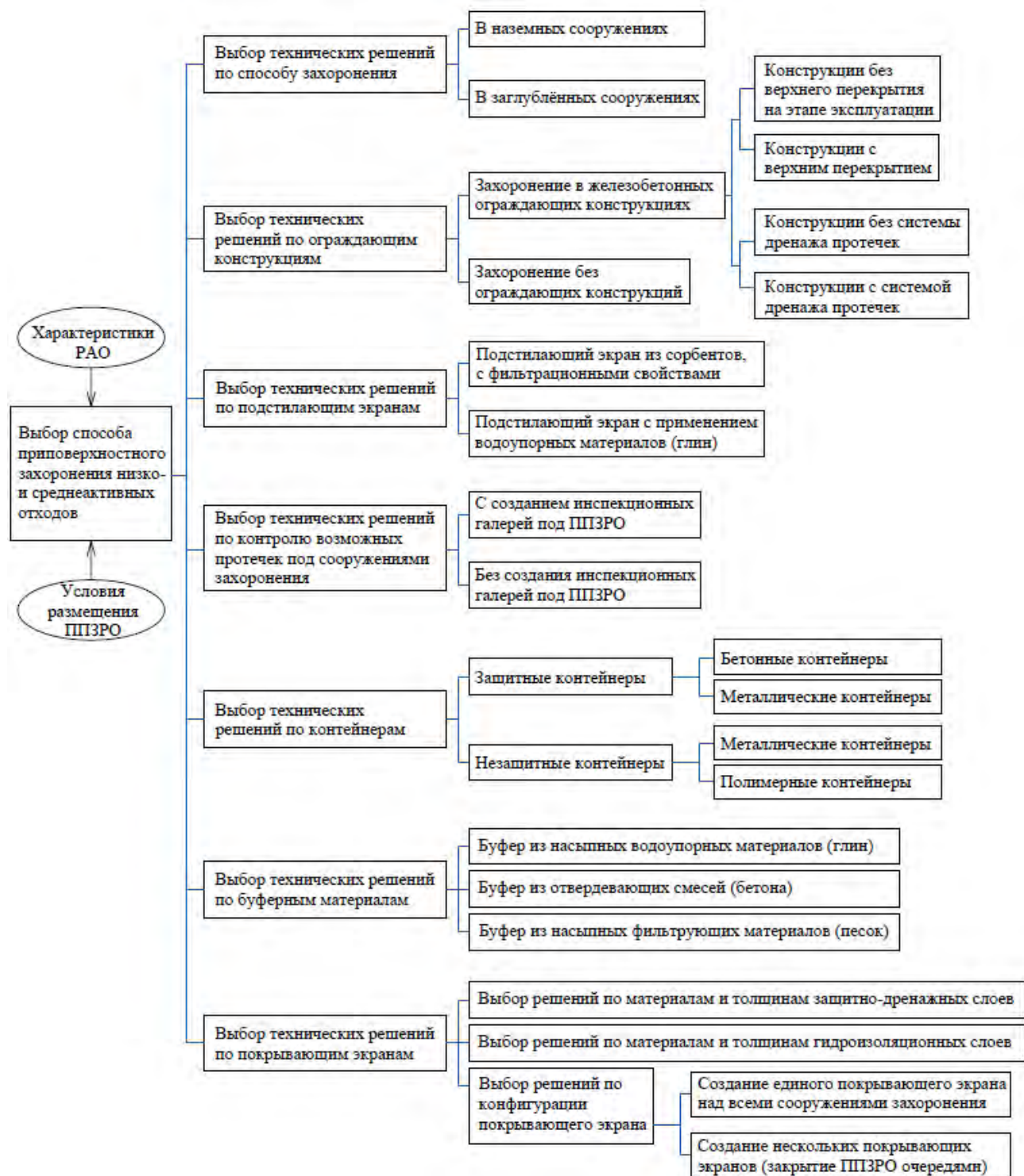


Рисунок 2.1 – Матрица технических решений для приповерхностного захоронения РАО

2.1 Анализ нормативных требований к барьерам безопасности

Сводный перечень нормативной документации, распространяющейся на обращение с РАО на завершающих стадиях представлен в главе 1 и приложении А (нормативная база РФ – таблица А.1 Приложения А, стандарты и руководства МАГАТЭ – таблица 1.4 главы 1).

В перечне документов МАГАТЭ основные требования к ППЗРО предъявлены в руководстве по безопасности SSG-29 [64]. Обзор различных решений по материалам и конструкциям ИББ ППЗРО и рекомендации по функциям и параметрам ИББ приведены в документе IAEA-TECDOC-1255 [75]. Применительно к сооружениям захоронения, создаваемым на месте радиационно-загрязнённых территорий, технические аспекты создания ИББ приведены в документе Technical reports series № 493 [76].

В российской нормативной базе общие принципы захоронения РАО, базовые требования к способам окончательной изоляции, сооружениям захоронения РАО представлены в нормах и правилах НП-055-14 [25], согласно которым целью обеспечения безопасности при захоронении РАО является их надежная изоляция, обеспечивающая радиационную безопасность человека и окружающей среды на весь период потенциальной опасности РАО, а при захоронении РАО должны соблюдаться следующие принципы обеспечения безопасности:

- оптимизации;
- многобарьерности;
- защиты будущих поколений;
- невозложения чрезмерного бремени на будущие поколения.

В НП-055-14 [25] в числе общих требований обеспечения безопасности захоронения РАО приведены также перечни воздействий, на которые должны быть рассчитаны ПЗРО.

Требования к приповерхностным пунктам захоронения содержатся в нормах и правилах НП-069-14 [26], в которых приведены требования к общему составу системы барьеров безопасности ППЗРО, функциям барьеров безопасности, к проектированию, оценке безопасности, эксплуатации и закрытию ППЗРО.

Применительно к упаковкам РАО требования предъявлены в НП-093-14 [27]. Так как упаковки РАО применяются не только в системе захоронения РАО, но и при эксплуатации ОИАЭ и при транспортировании, требования к ним указаны также в НП-053-16 [158], определяющих нормы и правила транспортирования РВ и РАО. Содержимое упаковок РАО (форма РАО) также влияет на безопасность захоронения и согласно п. 20 НП-055-14 [25] является элементом системы ИББ. Требования к форме РАО предъявлены в НП-019-15 [159], НП-020-15 [160], стандартах на конечную форму процессов отверждения РАО: ГОСТ Р 50927-96 [161], ГОСТ Р 50926-96 [162], ГОСТ Р 51883-2002 [163].

Косвенно на конструкцию контейнеров и формы РАО влияют требования РБ-155-20 [29], НП-067-16 [164] и ГОСТ Р 59968-2021 [31], в которых предъявляются требования по контролю и характеристикам упаковок РАО, направляемых на захоронение.

На ограждающие конструкции, как объекты капитального строительства, распространяются требования строительных норм, правил и стандартов: СП 63.13330-2018 [48], СП 70.13330.2012 [165], ГОСТ 13015-2012 [166], НП-041-22 [167].

Требования к барьерам из глин (буферным материалам, элементам покрывающих и подстилающих экранов) находятся в стадии разработки [168]. Данных о разработке требований к буферу из других материалов (например, материалов на основе цемента, песка, щебня) в настоящее время не имеется, при этом НП-069-14 [26] допускает применение различных буферных материалов, обладающих как гидроизоляционными, так и фильтрационными свойствами.

На сооружения захоронения распространяются требования НП-031-01 [36] (в части сейсмостойкости) и НП-016-05 [35] (в части классификации и обеспечения качества), несмотря на то что данные документы выпущены до вступления в силу федерального закона от 11.07.11 г. №190-ФЗ [4] и в них не упоминаются пункты захоронения РАО.

Перечень барьеров безопасности ППЗРО с указанием основных нормативных документов, в которых предъявлены требования к ним, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Требования нормативной документации к конструкции и материалам ИББ ППЗРО.

№ п/п	ИББ	Нормативный документ, в котором предъявлены требования ИББ	Примечание
1	Форма РАО	НП-019-15 [159] НП-020-15 [160] НП-093-14 [27] ГОСТ Р 50927-96 [161] ГОСТ Р 50926-96 [162] ГОСТ Р 51883-2002 [163]	-
2	Контейнер	НП-093-14 [27] НП-053-16 [158] ГОСТ Р 51824-2001 [169]	-
3	Буферный материал	НП-069-14 [26] НП-055-14 [25]	В стадии разработки руководства по безопасности по выбору ИББ из глин [168]
4	Ограждающие конструкции	СП 63.13330-2018 [48] СП 70.13330.2012 [165] ГОСТ 13015-2012 [166]	-
5	Подстилающий экран	НП-069-14 [26] НП-055-14 [25]	В стадии разработки руководства по безопасности по выбору ИББ из глин [168]
6	Покрывающий экран		

Применительно к задаче выбора технических решений по конструкции и материалам ИББ из множества возможных вариантов (рисунок 2.1) требования нормативной документации не дают ответа какой из вариантов должен быть выбран, так как ни один из вариантов не противоречит нормативным требованиям.

В нормативной документации РФ в области захоронения РАО в общем применён подход, согласно которому технические решения по выбору конструкций и материалов ИББ выбираются и разрабатываются при проектировании. Эти положения приведены в НП-055-14 [25] и НП-069-14 [26], например:

- согласно НП-055-14 [25]: «Выбор способа захоронения РАО (приповерхностное или глубинное захоронение РАО), конструкции сооружений, состава и свойств барьеров безопасности определяется и обосновывается в проектной документации»;
- согласно НП-069-14 [26]: «Выбор способа приповерхностного захоронения РАО (наземный или заглубленный), конструкции сооружений ППЗРО, состава и свойств барьеров безопасности должен определяться и обосновываться в проектной документации»; «Состав системы барьеров безопасности, их назначение и свойства должны быть определены и обоснованы в проекте ППЗРО».

Подход, применённый в нормативной документации РФ в области окончательной изоляции РАО, согласно которому конкретных требований к конструкциям барьеров безопасности не предъявляется, соответствует и международной практике, так как конкретные требования к ППЗРО определяются исходя из условий размещения площадки для захоронения и характеристик РАО.

С учётом того, что безопасность сооружений захоронения РАО обосновывается на большие периоды времени (сотни лет и более), при проектировании таких сооружений применяются принципы, согласно которым требования к системам и элементам ППЗРО конкретизируются и уточняются на всём жизненном цикле ППЗРО, так как очевидно, что достаточно сложно разработать единственно верные решения, основываясь на источниках информации, доступных в начале проектирования. Такой подход указан в проектных основах, разработанных для пунктов захоронения РАО в документе МАГАТЭ №NW-T-1.27 [68], (рисунок 2.2).

Требования к системам и элементам сооружений захоронения, определяются исходя из назначения им функций безопасности, которые в общем виде для ИББ представлены в [75].

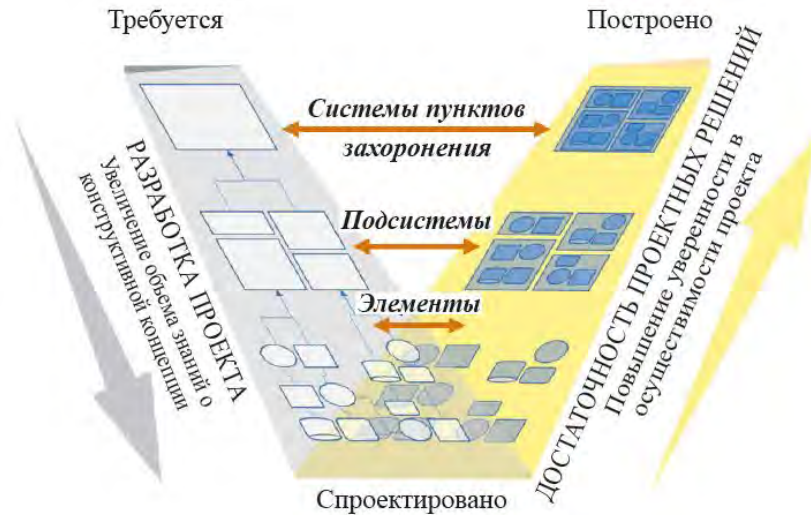


Рисунок 2.2 – Иерархия проектных основ согласно принципам и подходам при проектировании ПЗРО №NW-T-1.27 [68]

В российской нормативной базе требования к системам и элементам ПЗРО определяются с учётом их классификации согласно общим положениям обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла [35]. Для систем и элементов ПЗРО согласно НП-100-17 [39] «...должны быть указаны их классификация по назначению, влиянию на безопасность и выполняемым функциям, а для элементов, кроме того, – классы безопасности».

Анализ функций ИББ выполнен с учётом данных по срокам службы и долговечности ИББ, представленных в разделе 2.2.

2.2 Анализ сроков службы и долговечности инженерных барьеров безопасности ПЗРО

Согласно руководству по безопасности МАГАТЭ SSG-29 [64]: «Роль инженерных барьеров в удержании отходов зависит от ...их соответствующих характеристик ..., изменения этих характеристик со временем...». Это обуславливает необходимость рассмотрения вопросов долговечности ИББ при назначении им функций безопасности, а также вопросов, связанных с установлением сроков службы ИББ при проектировании ПЗРО.

Применительно к приповерхностным сооружениям захоронения низко- и среднеактивных РАО периоды, на которые даются оценки безопасности, исчисляются сотнями лет. Например, снижение удельной активности Cs^{137} с 10^7 Бк/кг (что соответствует нижней границе среднеактивных ТРО согласно таблице 3.12.1 ОСПОРБ 99/2010 [33]) до 100 Бк/кг (что соответствует значению, при котором допускается неограниченное использование твёрдых материалов согласно приложению 3 ОСПОРБ 99/2010 [33]) происходит в течение 500 лет (рисунок 2.3).

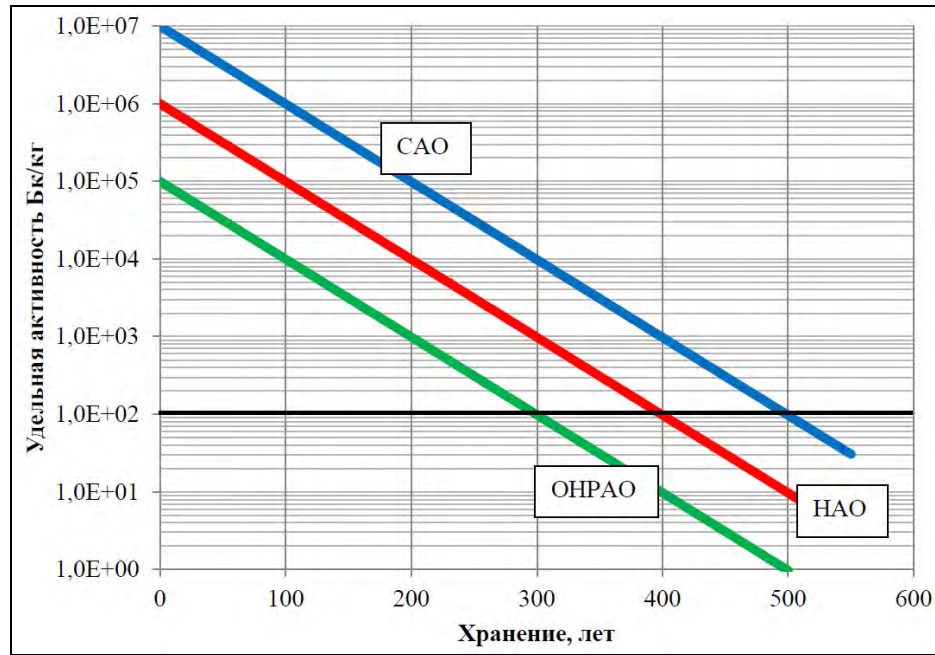


Рисунок 2.3 – Снижение удельной активности Cs^{137} в отходах категории ОНРАО, НАО и САО

При выполнении оценок безопасности необязательно исходить из допущения, что сроки службы ИББ должны соответствовать срокам, за которые происходит распад радионуклидов до значений, при которых допускается их неограниченное использование. Согласно, подходам к оценкам безопасности ППЗРО [66], сроки службы сооружений захоронения должны позволять удерживать радионуклиды в течение периодов времени, в течение которых воздействие на население не превышает пределов, установленных в SSR-5 [63] и IAEA-TECDOC-1380 [72]. По истечении срока ведомственного контроля при оценках безопасности рассматриваются сценарии непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения и выполняются оценки полученных при этом доз облучения населения. Пределом дозы для лиц из состава населения в отношении доз во всех планируемых ситуациях облучения является эффективная доза в размере 1 мЗв/год [63, 73].

Согласно методике, представленной в IAEA-TECDOC-1380 [72] и SSG-31 [65], в 2024 году для ППЗРО в Республике Беларусь выполнен НИР по определению сроков ведомственного (активного) контроля за сооружениями захоронения низко- и среднеактивных РАО Белорусской АЭС [173], в рамках которого установлена зависимость сроков ведомственного контроля и допустимой удельной активности упаковок РАО, размещаемых на захоронение. При установлении зависимости рассмотрены сценарии с разрушением ИББ и вторжением человека в систему захоронения РАО. Например для упаковок РАО с осушенными ОИОС (радионуклидный состав: Cs^{137} – 75%, Co^{60} – 20%, Cs^{134} – 1,5%, Sr^{90} – 3,3%, др. радионуклиды – 0,2%) основным дозаобра-

зующим радионуклидом в выполненных оценках в период времени до 100 лет с момента закрытия ППЗРО являлся Co^{60} , а после 100 лет – Cs^{137} (рисунок 2.4).

Допустимая начальная удельная активность в ПЗРО с учетом не-превышения индивидуальной дозы облучения 1 мЗв/год (логарифмическая шкала)

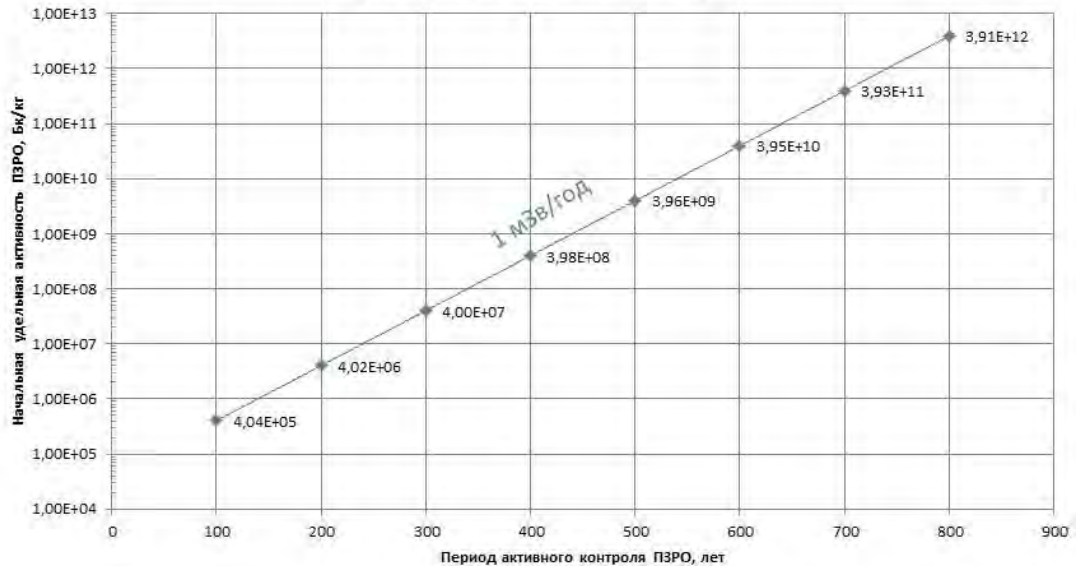


Рисунок 2.4 – Зависимость удельной активности упаковок РАО и сроков ведомственного контроля для ППЗРО в Республике Беларусь, определённая для упаковок с радионуклидным составом: Cs^{137} – 75%, Co^{60} – 20%, Cs^{134} – 1,5%, Sr^{90} – 3,3%, др. радионуклиды – 0,2% [171]

Как видно из рисунка 2.4 сроки ведомственного контроля (и соответственно минимально необходимые сроки службы сооружений захоронения) для удельной активности по Cs^{137} на уровне 10^7 Бк/кг составляют менее 250 лет, что вдвое меньше, чем период, за который данный радионуклид распадётся до значений, при которых допускается его неограниченное использование (рисунок 2.3). Установленная зависимость актуальна для радионуклидного состава эксплуатационных низко- и среднеактивных РАО Белорусской АЭС, в которых основной вклад в удельную активность вносят короткоживущие радионуклиды, в частности Cs^{137} . При большом содержании долгоживущих радионуклидов (в пределах норм, установленных для РАО классов 3 и 4 в [3] и [172]) сроки активного контроля могут значительно увеличиться. Однако, для приповерхностных сооружений захоронения, в которых защита окружающей среды и человека от радиоактивных веществ обеспечивается преимущественно инженерными барьерами безопасности, установление длительных периодов активного контроля (более 300-500 лет) нецелесообразно (в данном случае необходимо накладывать ограничения на содержание долгоживущих радионуклидов в локальных критериях приемлемости ППЗРО или рассматривать применение среднеглубинных сооружений, в которых маловероятно непреднамеренное вторжение человека по истечении сроков активного контроля).

Поскольку требования к срокам службы ИББ определяются исходя из характеристик РАО, направляемых на захоронение, для эксплуатационных РАО Белорусской АЭС с удельной активностью на уровне нижней границы САО (10^7 Бк/кг), в которых основной вклад в активность вносит Co^{60} и Cs^{137} сроки службы сооружений захоронения должны составлять не менее 250 лет, для отходов с удельной активностью 10^8 Бк/кг – 350 лет, 10^9 Бк/кг – 450 лет и т.д. (в данном случае (для рассмотренного в [171] радионуклидного состава) линейная зависимость сроков ведомственного контроля от удельной активности обусловлена периодом полураспада Cs^{137} , активность которого снижается приблизительно в 10 раз за 100 лет).

На примере данных, представленных на рисунке 2.4 и выше по тексту можно оценить порядок времени, в течение которого в сооружениях захоронения должны выполняться функции обеспечения безопасности. Эти данные соответствуют требованиям руководства МАГАТЭ SSG-29 [64], согласно которому: «4.29 Изолирующая способность пунктов приповерхностного захоронения должна быть обеспечена на срок до нескольких сотен лет». Необходимость обоснования безопасности сооружений захоронения ППЗРО на большие периоды времени отражается на подходах к выбору материалов ИББ и назначению функций ИББ, так как сроки службы в сотни лет трудно достижимы для некоторых изделий и материалов.

Ниже рассмотрены данные по срокам службы и долговечности основных материалов и конструктивных элементов ИББ ППЗРО, основанных на заявленных производителем данных или оценок, выполненных в публикациях по данной теме.

В российской нормативной базе конкретные значения сроков сохранения изолирующей способности барьеров установлены только для упаковок РАО и приведены в НП-093-14 [27]. Вопросы долговечности контейнеров для захоронения РАО и других ИББ рассмотрены в [48, 61, 173].

Для металлических тонкостенных контейнеров (бочек, контейнеров типа КРАД, КМЗ, УКТН и др.) сроки службы ограничиваются периодами до 50 лет. Например, согласно [59, 174] срок службы стального контейнера КРАД-1,36 с толщиной стенок и крышки 4 мм и 3 мм соответственно составляет 30 лет, срок службы стального контейнера КМЗ с толщиной стенок и крышки 5 мм и 8 мм – 50 лет. Основной механизм деградации стальных упаковок обусловлен коррозионными процессами, а также потерей герметичности соединения крышки и корпуса. У большинства металлических контейнеров соединение «крышка-корпус» выполнено с применением прокладок, подверженных растрескиванию и утрате своих уплотнительных свойств (для стандартных 100 л и 200 л бочек это хомутовое соединение с резиновой прокладкой, для контейнеров КРАД и КМЗ – болтовое соединение с резиновыми прокладками). В связи с этим при

оценках долговременной безопасности ППЗРО такие упаковки не рассматриваются как барьер на пути миграции радионуклидов.

Для железобетонных контейнеров (НЗК, ЖБК, ЖБУ) сроки службы составляют до 300 лет. Согласно [175] срок службы обычного бетона в неагрессивной среде не имеет предела, однако в условиях захоронения на железобетонные упаковки могут воздействовать различные факторы, обуславливающие протекание процессов деградации в бетоне. Основными факторами, влияющими на долговечность железобетонных упаковок в условиях захоронения, являются:

- карбонизация;
- морозное разрушение;
- коррозия бетона (в том числе биокоррозия);
- коррозия стальной арматуры;
- радиационное воздействие;
- воздействие материалов радиоактивных отходов.

Значительная толщина корпуса и крышки железобетонного контейнера (порядка 150 мм) и герметичное соединение крышки и корпуса цементным связующим обеспечивают хорошие изоляционные качества и обуславливают большие сроки службы железобетонных контейнеров. Например, для контейнера НЗК согласно [176] срок сохранения изолирующей способности составляет 300 лет. В публикации [173] подробно рассматривались вопросы долговечности железобетонных контейнеров, по результатам выполненных оценок отмечено, что достижимым сроком сохранения изолирующей способности является период около 500 лет.

Ограждающие конструкции сооружений захоронения (ячейки, отсеки, модули) изготавливаются из железобетона. На их долговечность влияют те же факторы, что и для железобетонных контейнеров, однако, в отличие от железобетонных контейнеров, для ограждающих конструкций нет расчётных данных о сроках сохранения изолирующей способности более 100 лет. Возможно, это связано с тем, что для ограждающих конструкций сложнее создать условия производства, гарантирующие сохранение своих эксплуатационных качеств на большие периоды времени, особенно если на ограждающие конструкции возлагаются функции удержания радионуклидов, требующие герметичности конструкций. При этом сохранение несущей способности бетонных строительных конструкций на протяжении сотен лет можно считать достижимым по причине сохранности даже в наши дни древних сооружений из бетона [177].

Природные материалы (такие как глина, цеолит, песок, щебень и др.) применяемые для засыпки пустот, используемые в конструкциях подстилающих и покрывающих экранов не имеют ограничений по срокам службы. Однако, в условиях захоронения на такие материалы также воздействуют факторы, оказывающие влияние на выполнение ими своих функций.

Например, дренажные системы из фракций колотого камня или щебня подвержены заиливанию / кольматации, сорбирующие материалы ограничены во времени своей сорбционной ёмкостью, гидроизолирующие материалы из глин подвержены растрескиванию при пересыхании.

Синтетические материалы (полиэтилен, геотекстиль, георешетка и др.), используемые в основном при строительстве покрывающих экранов, имеют сроки службы не более 50 лет [178]. Такие материалы используются для удобства и технологичности выполнения работ по укладке слоёв покрывающего экрана и не рассматриваются как элемент ИББ при оценках безопасности.

Данные по срокам службы ИББ, факторы, оказывающие влияние на сроки службы ИББ, а также механизмы деградации ИББ приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Сроки службы материалов ИББ и факторы, оказывающие влияние на сроки службы ИББ

Наименование ИББ	Материал	Срок службы	Факторы, оказывающие влияние на сроки службы ИББ, механизмы деградации
1 Контейнер	Металл	До 50 лет	Коррозия (аэробная до заполнения буферным материалом, после – анаэробная)
	Железобетон	Около 300 лет	Коррозия в результате процессов выщелачивания (растворение и вынос гидроокиси кальция из тела бетона) Процессы химического взаимодействия между цементным камнем и агрессивными агентами, карбонизация бетона. Процессы накопления кристаллических новообразований в порах и капиллярах бетона.
2 Буферный материал	Бетон	Для выполнения функции заполнения пустот срок службы не ограничен, для препятствия доступу воды – до 100 лет	Растрескивание бетона в отсутствии арматурных стержней, коррозия цементного камня, карбонизация, вымывание кальция
	Глинистые материалы	Срок службы не ограничен	Химическая деструкция смектитов, растрескивание вследствие пересыхания, водная эрозия и суффозия
3 Ограждающие конструкции	Железобетон	Для выполнения функции по препятствию доступа воды к упаковкам – до 100 лет Для выполнения несущих функций – до 300 лет	Коррозия в результате процессов выщелачивания (растворение и вынос гидроокиси кальция из тела бетона) Процессы химического взаимодействия между цементным камнем и агрессивными агентами, карбонизация бетона. Накопление кристаллических новообразований в порах и капиллярах бетона.

Наименование ИББ	Материал	Срок службы	Факторы, оказывающие влияние на сроки службы ИББ, механизмы деградации	
			Длительно действующие нагрузки (от покрывающего экрана) при напряжениях в бетоне, превышающих предел длительной прочности	
4 Подстилающий экран	Песок	Срок службы не ограничен*	Водная эрозия, осыпание, кольматация	
	Глинистые материалы		Химическая деструкция монтмориллонита (для бентонитовых глин), растрескивание вследствие пересыхания	
	Цеолиты		Кольматация, сорбционная емкость	
5 Покрывающий экран	Бентомат	Не более 50 лет	Разрыв вследствие неравномерного проседания нижележащих слоёв, вследствие попадания воды и промерзания	
	Геотекстиль		Срок службы не ограничен*	Кольматация, осыпание
	Щебень			Водная эрозия, осыпание, кольматация
	Песок	Химическая деструкция монтмориллонита (для бентонитовых глин), растрескивание вследствие пересыхания		
	Глинистые материалы	Эрозия, осыпание, проникновение животных, корней растений, растрескивание в засушливые периоды, нарушения сплошности вследствие попадания воды и промерзания		
	Грунт			
* Для природных материалов срок службы не ограничен, так как они не теряют своих свойств со временем. Однако для материалов в сборе (в виде инженерного сооружения – покрывающего экрана) сроки службы конечны и определяются интенсивностью протекания эволюционных процессов.				

Применительно к материалам ИББ целесообразно рассматривать не только «срок службы», а более широкое понятие – эволюцию свойств ИББ во времени в условиях захоронения. Для бетонов, например, эволюция их свойств достаточно хорошо изучена. Зависимость характеристик бетона от времени, принимаемая для оценок долговременной безопасности ППЗРО в [60], представлена на рисунке 2.5.

Механизмы и скорости деградации свойств ИББ зависят от технических решений, принятых при проектировании ППЗРО и являются параметрами, поддающимися регулированию. Например, деградация гидроизоляционных материалов покрывающего экрана вследствие промерзания в межсезонный период может быть исключена или сведена к минимуму выбором достаточной толщины вышележащих слоёв (превышающей глубину промерзания грунтов, установленную для площадки размещения ППЗРО), а риски снижения со временем гидроизоляционных свойств глин вследствие растрескивания могут быть снижены предъявлением требований к плотности укладки глиняных слоёв.

С учётом снижения удельной активности РАО во времени за счёт радиоактивного распада и постепенной деградации свойств материалов сооружений захоронения, для установления тре-

бований к сохранности свойств ИББ во времени может быть использован подход с наложением зависимости начальной удельной активности захораниваемых РАО от времени с учётом не превышения индивидуальной дозы облучения (рисунок 2.4) и кривой, отражающей разрушение ИББ во времени (по типу кривой степени разрушения бетона, представленной на рисунке 2.5). Пример реализации такого подхода, предлагаемый автором настоящего исследования, представлен на рисунке 2.6.

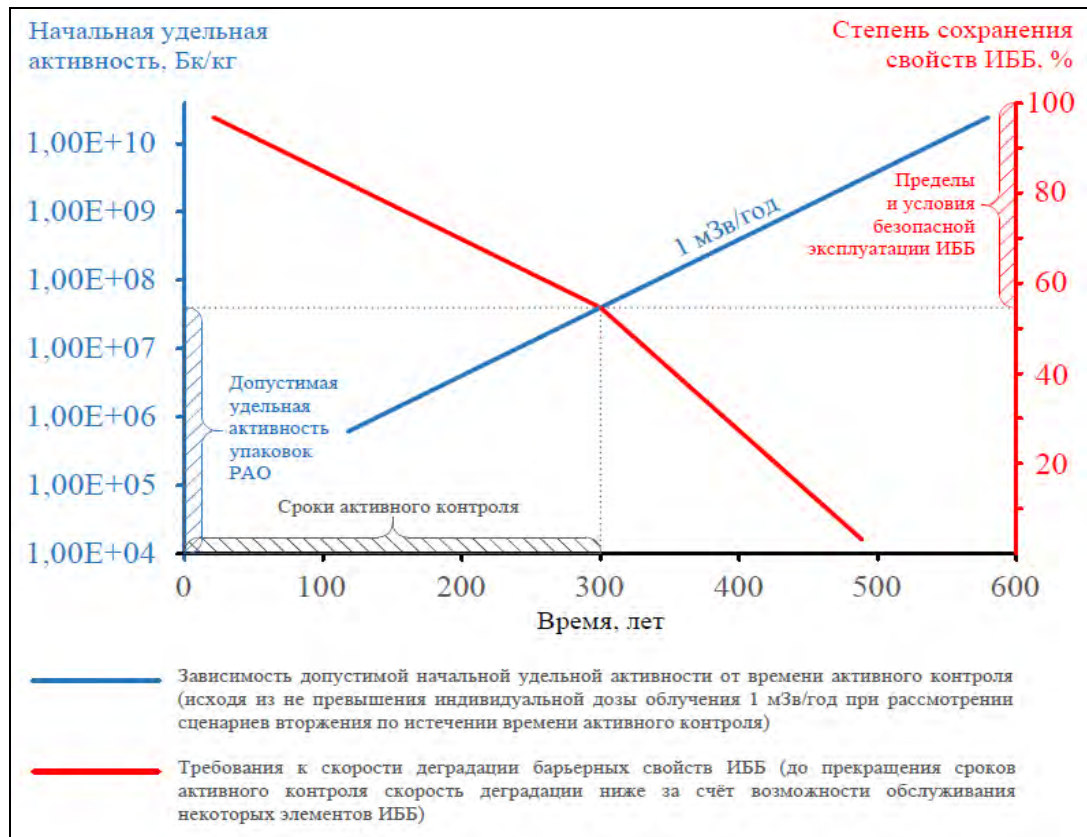


Рисунок 2.6 – Взаимозависимость начальной удельной активности захораниваемых РАО, сроков активного контроля и требований к эволюции свойств ИББ (на примере РАО, в которых основной вклад в удельную активность вносит Cs^{137})

Линия синего цвета на рисунках 2.4 и 2.6 зависит от радионуклидного состава и удельной активности РАО и отражает взаимосвязь сроков активного контроля и начальной удельной активности. Линия красного цвета на рисунке 2.6 представляет собой линейную аппроксимацию данных по изменению свойств ИББ во времени и является визуализацией требований к срокам службы ИББ. На рисунке 2.6 показан подход, согласно которому линия красного цвета проведена таким образом, чтобы до завершения активного контроля ключевые параметры ИББ в процессе эволюции своих свойств лежали в пределах и условиях безопасной эксплуатации, установленных при проектировании.

Ключевые свойства и параметры, отвечающие за выполнение ИББ своих функций, и отвечающих за пределы и условия безопасной эксплуатации ППЗРО рассмотрены в разделе 2.3.

2.3 Анализ функций барьеров безопасности ППЗРО. Ключевые свойства и параметры ИББ.

Общие требования к функциям, выполняемым ИББ ППЗРО, и ключевые параметры, отвечающие за выполнение барьерами своих функций, представлены в IAEA-TECDOC-1255 [75] (см. таблицу 2.3).

Таблица 2.3 – Элементы ИББ, их функции и ключевые параметры согласно IAEA-TECDOC-1255 [7]

Тип	Функция	Материал	Ключевые параметры
Форма РАО и контейнер	– Сохранение целостности – Ограничение доступа воды – Задержание радионуклидов	– Цемент – Битум – Полимеры – Бетонный контейнер – Металлический контейнер	– Прочность – Влагопроницаемость – Скорость выщелачивания – Срок службы / частота отказов
Буфер	– Заполнение пустот – Ограничение доступа воды – Сорбция, осаждение радионуклидов – Препятствие накоплению газов – Возможность извлечения упаковок РАО	– Глины – Цемент и глины – Цемент – Смеси на основе глин	– Сорбционная ёмкость – Влагопроницаемость – Пористость – Механические свойства
Ограждающие конструкции и основания	– Физическая стабильность – Защита от воздействий	– Бетон – Железобетон – Глина – Асфальтовые или органические мембраны – Стальные листы	– Влагопроницаемость – Прочность – Толщина – Срок службы / частота отказов
Дренажи	– Фильтрация влаги – Мониторинг стоков	– Гравий / песок – Керамические и цементные трубы	– Влагопроницаемость – Пропускная способность
Покрывающий экран	– Ограничение доступа воды – Препятствие накоплению газов – Защита от вторжения людей и животных – Защита от эрозии	– Глина – Асфальтовые или полимерные мембраны – Песок / почва – Гравий / крупный камень – Геотекстиль – Бетонные плиты – Растительный слой	– Влагопроницаемость – Водоотводящая способность – Пластичность – Срок службы / частота отказов

В связи с тем, что ИББ ППЗРО выполняют различные функции, требования к ключевым параметрам ИББ могут существенно отличаться и даже быть противоположными. Например, для дренажных слоёв покрывающего экрана целесообразно выбирать материалы с большим коэффициентом фильтрации, в то время как для гидроизоляционных слоёв – с малым коэффициентом фильтрации.

В таблице 2.4 приведены предложения по установлению функций ИББ. В связи с тем, что данные по срокам службы ИББ накладывают соответствующие ограничения на функции, возлагаемые на ИББ, в таблице 2.4 применён подход, согласно которому функции назначены исходя из данных о сохранности барьерами своих свойств во времени, представленных в разделе 2.2. Так, например, с учётом сроков службы металлических контейнеров (не более 50 лет), на такие контейнеры не накладываются функции удержания радионуклидов, а на ограждающие железобетонные конструкции возложены функции, обеспечивающие безопасность преимущественно на этапе эксплуатации и закрытия, так как на сегодняшний день отсутствуют данные о возможности создания ограждающих конструкций, обладающих герметичностью на протяжении сотен лет.

Таблица 2.4 – Данные по выполняемым ИББ функциям на различных этапах жизненного цикла ППЗРО

Наименование барьера (элемента системы захоронения)	Назначение (функции)	Эксплуатация	Закрытие	Активный контроль
Форма отходов (матрица РАО класса 3)	Фиксация радионуклидов в матричном материале.	+	+	+
Контейнер для РАО класса 4	Обеспечение огнестойкости упаковки (для горючих РАО).	+	+	-
	Обеспечение безопасной транспортировки РАО до ППЗРО.	+	-	-
Контейнер для РАО класса 3	Предотвращение проникновения воды к содержимому контейнера.	+	+	+
	Замедление выхода радионуклидов из матричного материала или из первичной упаковки.	+	+	+
	Биологическая защита (защита персонала и населения от ионизирующего излучения РАО).	+	+	-
	Восприятие механических нагрузок от штабеля вышестоящих упаковок РАО и буферных материалов.	+	+	+

Наименование барьера (элемента системы захоронения)	Назначение (функции)	Эксплуатация	Закрытие	Активный контроль
	Обеспечение безопасной транспортировки РАО.	+	-	-
	Обеспечение огнестойкости упаковки (для горючих РАО).	+	+	-
Буфер для РАО класса 4	Заполнение пустот и свободных объёмов, структурная стабильность штабеля.	+	+	+
	Предотвращение накопления воды за счёт свойств буферного материала.	+	+	+
Буфер для РАО класса 3	Заполнение пустот и свободных объёмов, структурная стабильность штабеля.	+	+	+
	Предотвращение накопления воды за счёт свойств буферного материала.	+	+	+
	Сорбция радионуклидов, выходящих из упаковок РАО при деградации их защитных свойств.	+	+	+
Ограждающие строительные конструкции модуля (отсека) захоронения	Препятствие техногенным и природным воздействиям	+	+	-
	Восприятие механических нагрузок от покрывающего экрана	-	+	*
	Ограждение для засыпки буферного материала.	+	+	-
	Защита человека от воздействия ионизирующего излучения.	+	+	-
	Обеспечение структурной стабильности штабеля упаковок РАО.	+	+	-
Подстилающий экран	Восприятие механических нагрузок от упаковок РАО, засыпки, покрывающего экрана, ограждающих конструкций.	+	+	+
	Предотвращение накопления воды.	+	+	+
	Задержание радионуклидов, выходящих из модулей захоронения при деградации защитных свойств других ИББ за счёт сорбции.	-	+	+
Покрывающий экран	Формирование устойчивого покрытия из природных материалов, препятствующего проникновению животных и корней растений, предотвращающего эрозию.	-	+	+

Наименование барьера (элемента системы захоронения)	Назначение (функции)	Эксплуатация	Закрытие	Активный контроль
	Препятствие техногенным и природным воздействиям.	-	+	+
	Дренаж атмосферных осадков и поверхностных вод.	-	+	+
	Препятствие капиллярному поднятию влаги.	-	+	+
	Предотвращение доступа воды к модулям захоронения РАО.	-	+	+
	Задержание радионуклидов, выходящих из модулей захоронения при деградации защитных свойств других ИББ за счет сорбции.	-	+	+
* Функция «Восприятие механических нагрузок от покрывающего экрана» ограждающих конструкций для РАО класса 4 может выполняться только на этапе закрытия.				

Для выполнения представленных в таблице 2.4 функций инженерным барьерам безопасности необходимо назначение численных параметров, определяющих качество и надёжность, параметров, которые могут быть заданы при проектировании и контролироваться в процессе изготовления, поставки и возведения элементов ИББ в составе сооружений захоронения. Ключевые параметры в IAEA-TECDOC-1255 [75] (таблица 2.2), приведены в общем виде, более детально с указанием допустимых диапазонов численных значений перечень таких параметров представлен в:

- НП-093-14 [27] – применительно к упаковкам РАО;
- НП-019-15 [159], НП-020-15 [160], ГОСТ Р 50927-96 [161], ГОСТ Р 50926-96 [162], ГОСТ Р 51883-2002 [163] – применительно к матрицам РАО;
- публикациях [57, 59, 61] – применительно к ограждающим конструкциям, элементам покрывающего и подстилающего экранов, а также буферных материалов;
- введенных в действие и разрабатываемых руководствах по безопасности и стандартах [170÷173] – для ИББ из глинистых материалов.

За функции, связанные с удержанием (локализацией) радионуклидов, отвечают такие параметры как скорость выщелачивания, сорбционная ёмкость, коэффициенты распределения и диффузии, за функции, связанные с отводом воды – скорость фильтрации, плотность, связанная

пористость, за функции, связанные с препятствием внешним воздействиям – прочность на сжатие и разрыв, модуль упругости.

Практически для всех функций, выполняемых ИББ, важным параметром является толщина слоя ИББ, срок службы.

Основные параметры, отвечающие за выполнение барьерами своих функций, сведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Перечень основных параметров, определяющих качество ИББ ППЗРО

№ п/п	Наименование параметра	Размерность
1	Скорость выщелачивания	г/(см ² сут)
2	Толщина слоя	мм
3	Водопроницаемость (коэффициент фильтрации)	м/с
4	Плотность	м ³ /т
5	Коэффициент распределения между жидкой и твёрдой фазами при сорбции радиологически значимых радионуклидов	см ³ /г
6	Коэффициент диффузии радиологически значимых радионуклидов	м ² /с
7	Катионообменная емкость	мг-экв./г
8	Связанная пористость	%
9	Паропроницаемость	мг/(м·ч·Па)
10	Морозостойкость	цикл (минус 40 °С ÷ плюс 40 °С)
11	Прочность на сжатие	МПа
12	Модуль упругости	МПа
13	Прочность на разрыв	МПа
14	Радиационная стойкость	Гр
15	Срок службы	лет

Численные значения параметров, отвечающих за выполнение барьерами своих функций, приведены в разделе 3 настоящей работы при разработке предложений по облику перспективного ППЗРО и выбору решений по материалам и конструкции каждого ИББ.

2.4 Анализ стоимостных показателей ППЗРО

Решение задачи окончательной изоляции РАО, не имея перспективы принесения прибыли, требует значительных финансовых затрат и согласно современным общемировым подходам, как правило, финансируется из фондов, формируемых с доходных проектов атомной отрасли. В целях сокращения объёмов образования РАО широко используется принцип «загрязняющий платит», который в российской практике применяется в виде тарифов на захоронение [183], используются подходы с разделением РАО на классы для рационального (соизмеримого с потенциальной опасностью РАО) расходования средств на создание сооружений захоронения. С учётом длительности процесса окончательной изоляции РАО (от момента проектирования до закрытия сооружений захоронения и фазы активного контроля) разработаны подходы к финансированию проектов создания ПЗРО на различных стадиях жизненного цикла. Подробно вопросы стоимости захоронения РАО рассмотрены в [155]. Данные по величине капитальных вложений и эксплуатационных затрат для различных ПЗРО приведены в [148-152].

Поиск оптимальных решений по способам захоронения РАО выполнялся в работах [150, 151]. В ходе исследований определены соотношения капитальных затрат на строительство приповерхностных и подземных сооружений захоронения, отмечена существенная разница в стоимости работ по обращению с РАО в разных странах, выявлены закономерности влияния вместимости ПЗРО на стоимость захоронения 1 м³ РАО (рисунок 1.26 раздела 1.3 настоящей работы).

Применительно к задачам выбора экономичных решений для приповерхностного захоронения РАО представляет интерес анализ стоимости сооружений захоронения в масштабе капитальных затрат на всю инфраструктуру ППЗРО и вклад в стоимость сооружений захоронения каждого ИББ. Такая задача достаточно сложна в связи с тем, что затраты на переработку и кондиционирование РАО (т.е. на создание первых двух барьеров в системе захоронения – форму РАО и контейнеры) учитываются в проектах предприятий, передающих отходы на захоронение, затраты на создание подстилающего экрана и ограждающих конструкций – в проектах строительства ППЗРО, затраты на создание покрывающего экрана – в проектах закрытия ППЗРО. При этом для российских ППЗРО в Свердловской, Челябинской и Томской обл. проектно-сметная документация на закрытие еще не разработана (выполнены только концептуальные проработки по закрытию в составе проектов строительства ППЗРО).

Для определения соотношений в величине затрат на создание каждого ИББ в сооружениях захоронения ППЗРО приняты данные, представленные в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Исходные данные для определения стоимостных показателей ИББ ППЗРО

№ п/п	Барьер	Исходные данные для определения стоимости создания барьера
1	Форма РАО	– Методические указания по укрупнённой оценке стоимости работ по обращению с РАО. Приложение №3 к приказу ГК «Росатом» №1/1061-П [187]. – Данные по удельной стоимости операций по переработке РАО [184, 185].
2	Контейнер	По данным технико-коммерческих предложений заводов-изготовителей контейнерного оборудования
3	Ограждающие конструкции	Проектная документация на строительство ППЗРО в Челябинской обл., 2019 г. [186].
4	Буферный материал	
5	Подстилающий экран	
6	Покрывающий экран	– Концептуальные решения по закрытию сооружений захоронения проектной документацией на строительство ППЗРО в Челябинской обл., 2019 г. [6]. – Расчёт прямых затрат на создание экрана с применением федеральных расценок.

Согласно проектной документации на строительство ППЗРО в Челябинской обл. полная сметная стоимость строительства ППЗРО в ценах 2019 г. составляет 6,06 млрд. руб., в ценах 2000 г. – 0,76 млрд. руб. В данную стоимость входят сооружения захоронения (15 железобетонных модулей общей вместимостью 225 тыс. м³ упаковок РАО, работы и материалы для создания подстилающего экрана), объекты инфраструктуры ППЗРО (здание входного контроля упаковок РАО, пункт дозиметрического контроля, склад для буферного материала, наблюдательные скважины, трансформаторная подстанция, линейные объекты и проч.), работы по подготовке площадки к строительству и благоустройству после сооружения объектов капитального строительства, проектно-изыскательские работы. Затраты на приобретение и закладку буферных материалов учтены в эксплуатационных расходах ППЗРО.

Данные по стоимости ИББ, предусмотренных в составе проекта ППЗРО в Челябинской обл. приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Данные по стоимости ИББ, предусмотренных в составе проекта ППЗРО в Челябинской обл. [186]

№ п/п	ИББ	Характеристики	Стоимость, млн. руб. в ценах 2000 г.	Вклад по отношению к полной сметной стоимости строительства ППЗРО, %
1	Подстилающий экран	Объёмы выемки грунта – 530 тыс. м ³ Объёмы обратной засыпки – 43,2 тыс. м ³ Материал обратной засыпки – глина бентонитовая	64,5	8,5
2	Ограждающие конструкции	Габариты одного модуля 76х69х7,5 м Строительный объём одного модуля захоронения – 39600 м ³ Общее кол-во модулей – 15 шт. Вместимость одного модуля – 15 тыс. м ³ упаковок РАО	408,2	53,7
3	Буферный материал	Материал – глина бентонитовая Плотность – 1,8 т/м ³ Годовой расход – 9200 т/год Объём на заполнение всех модулей захоронения – 76,7 тыс. м ³	76,5	10,1

Стоимость ограждающих конструкций в пересчёте на 1 м³ строительного объёма составляет 687 руб./м³ в ценах 2000 г, что достаточно дорого, учитывая простоту модульных сооружений захоронения. Это обусловлено классификацией ограждающих конструкций (3Н по НП-016-05 [35] согласно проектной документации [186]) и тем, что ограждающие конструкции рассчитаны на захоронение как РАО класса 4, так и РАО класса 3. Используя разные ограждающие конструкции для захоронения РАО класса 3 и РАО класса 4 можно сократить их стоимость (за счёт понижения класса безопасности конструкций для РАО класса 4, уменьшения толщин стен, снижения требований по срокам их службы).

Для определения затрат на создание формы РАО использованы данные публикаций [184, 185] по стоимости различных технологий переработки РАО, определённые согласно Методическим указаниям ГК «Росатом» [187]. Для расчёта приняты наиболее распространённые способы переработки низко- и среднеактивных РАО (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Удельная стоимость операций по переработке РАО [184]

№ п/п	Операция (способ переработки)	Категория РАО	Удельная стоимость в РФ в ценах 2019 г., тыс. руб./м ³
1	Измельчение	НАО / CAO	50-115
2	Отверждение (цементирование)	НАО / CAO	20-115
3	Упаривание	НАО / CAO	70-80

В проектной документации на ППЗРО в Челябинской обл. нет данных о соотношении объёмов поступающих на захоронение РАО, переработанных тем или иным способом. Для оценок стоимости формы РАО приняты данные по нижней границе стоимости переработки РАО методом цементирования, представленные в таблице 2.8 – 20 тыс. руб./м³ в ценах 2019 г. или 2,2 тыс. руб./м³ в ценах 2000 г. (при пересчёте использован коэффициент дефлятор k=9). Данные по стоимости переработки приняты по нижней границе по причине того, что бóльшая часть РАО, поступающих на захоронение (80 %), относится к категории низкоактивных отходов, для которых стоимость переработки дешевле чем для отходов категории САО.

Затраты на создание формы РАО определены по формуле:

$$C_{\text{ф}} = C_{\text{п}} \times V_{\text{нетто}} \quad (1),$$

где:

$C_{\text{ф}}$ – затраты на создание формы РАО – первого барьера в системе ИББ, млн. руб.;

$C_{\text{п}}$ – удельная стоимость переработки РАО (принята согласно [184] в размере 2,2 тыс. руб./м³ в ценах 2000 г.);

$V_{\text{нетто}}$ – совокупный объём РАО внутри контейнеров, тыс. м³, определяемый по формуле:

$$V_{\text{нетто}} = V_{\text{уп3}} \cdot k_{\text{уп3}} + V_{\text{уп4}} \cdot k_{\text{уп4}} \quad (2),$$

где:

$V_{\text{уп3}}$ – объём брутто упаковок РАО класса 3 (для ППЗРО в Челябинской обл. составляет 42 тыс. м³);

$k_{\text{уп3}}$ – коэффициент заполнения контейнеров для РАО класса 3, $k_{\text{уп3}} = 0,32$ (принят по контейнеру типа НЗК-150-1,5П исходя из соотношения внутреннего объёма контейнера (1,5 м³) и внешнего объёма контейнера (3,75 м³) и из расчёта, что заполняемость внутреннего объёма составляет 80%);

$V_{\text{уп4}}$ – объём брутто упаковок РАО класса 4 (для ППЗРО в Челябинской обл. составляет 183 тыс. м³);

$k_{\text{уп4}}$ – коэффициент заполнения контейнеров для РАО класса 4, $k_{\text{уп4}} = 0,63$ (принят по контейнеру типа КРАД-1,36 исходя из соотношения внутреннего объёма контейнера (1,36 м³) и внешнего объёма контейнера (1,73 м³) и из расчёта, что заполняемость внутреннего объёма составляет 80%).

Таким образом, объём всех РАО «нетто» ($V_{\text{нетто}}$), поступающих в ППЗРО, составляет $V_{\text{нетто}} = 42 \cdot 0,32 + 183 \cdot 0,63 = 128,73$ тыс. м³.

Затраты на создание формы РАО составляют $C_{\text{ф}} = 2,2 \cdot 128,73 = 283,2$ млн. руб. в ценах 2000 г.

Расчет стоимости контейнеров, используемых для захоронения РАО в ППЗРО в Челябинской обл. выполнен на основе данных по распределению типов упаковок, поступающих на захоронение [6] (рисунок 2.7) и технико-коммерческих предложений поставщиков контейнеров.



Рисунок 2.7 – Данные по соотношению типов контейнеров, на основе которых сформированы упаковки РАО классов 3 и 4, поступающие в ППЗРО [6]

Данные по количеству и стоимости контейнеров приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Данные по количеству и стоимости контейнеров, используемых для захоронения отходов категорий НАО и САО в ППЗРО.

Класс РАО, суммарный объём упаковок	Тип контейнера	Объём контейнера «брутто»	Общее количество контейнеров	Стоимость за единицу в ценах 2000 г.	Стоимость всех контейнеров в ценах 2000 г.	Совокупная стоимость контейнеров в ценах 2000 г.
РАО класса 4, 183 тыс. м ³	Биг-Бэг	1,0 м ³	23987 шт.	125 руб.	2,9 млн. руб.	1,068 млрд. руб.
	КРАД-1,36	1,73 м ³	17241 шт.	9000 руб.	155,2 млн. руб.	
	КРАД-3,0	4,05 м ³	7496 шт.	22650 руб.	169,8 млн. руб.	
	КМЗ	3,8 м ³	8995 шт.	22325 руб.	200,8 млн. руб.	
	НЗК	3,75 м ³	17241 шт.	18735 руб.	323,0 млн. руб.	
РАО класса 3, 42 тыс. м ³	НЗК	3,75 м ³	10269 шт.	18735 руб.	192,4 млн. руб.	
	ЖБУ	2,06 м ³	571 шт.	17500 руб.	9,9 млн. руб.	
	ЖЗК	4,1 м ³	571 шт.	23750 руб.	13,5 млн. руб.	

Совокупные затраты на приобретение всех контейнеров для захоронения РАО составляют 1,068 млрд. руб. в ценах 2000 г. Диаграмма распределения затрат на приобретение контейнеров представлена на рисунке 2.8. Большая часть затрат (около 80 %) приходится на контейнеры для РАО класса 4. Это обусловлено большим количеством и относительно высокой стоимостью металлических контейнеров типа КРАД, КМЗ, а также использованием в некоторых случаях контейнеров типа НЗК для захоронения РАО класса 4, избыточных по своим защитным характеристикам для таких отходов. Использование контейнера НЗК для РАО класса 4 обусловлено,

например, необходимостью размещения горючих низкоактивных РАО (отработанные средства индивидуальной защиты, ветошь и проч.) в огнестойкие контейнеры, такие как НЗК. Такое решение позволяет отправлять горючие РАО на захоронение, не переводя их в негорючую форму, и при этом обеспечивать соответствие критериям приемлемости по НП-093-14 [27].

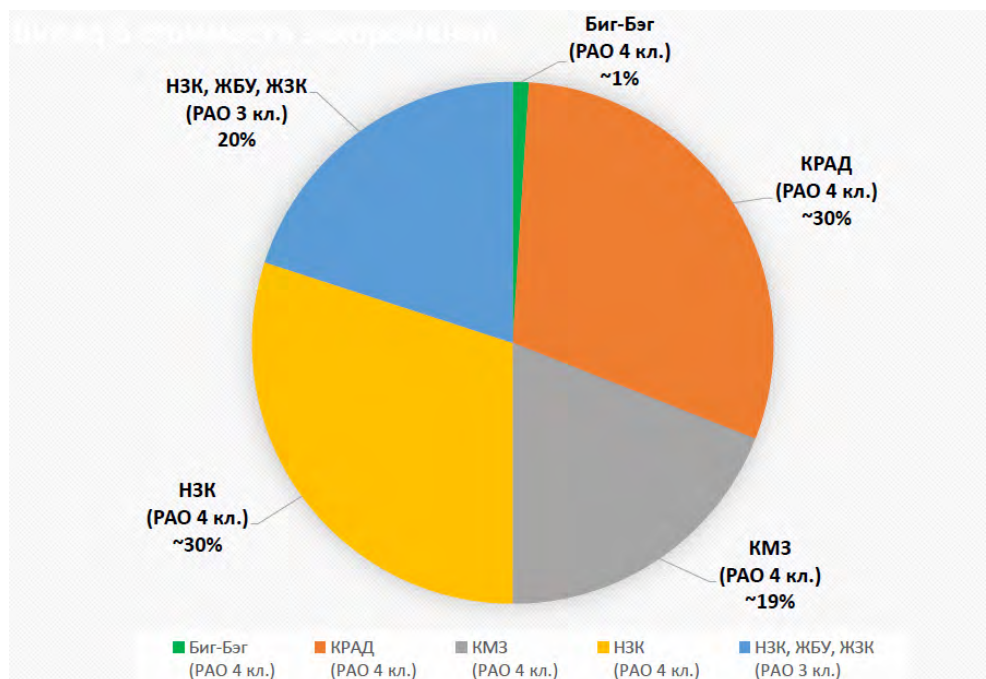


Рисунок 2.8 – Распределение затрат на различные типы контейнеров для захоронения РАО классов 3 и 4 в ППЗРО

Диаграмма на рисунке 2.8 демонстрирует целесообразность поиска более экономичных решений по контейнеризации РАО класса 4, например упаковку большей части РАО в мягкие контейнеры типа Биг-бэг или использование полимерных контейнеров взамен металлических. Для отходов производства и потребления полимерные контейнеры практически заместили металлические по причине более низкой стоимости.

В части определения стоимости покрывающего экрана для ППЗРО в Челябинской обл. в связи с отсутствием сметных расчётов на создание данного экрана в проектной документации на строительство ППЗРО, такие сметные расчёты выполнены в составе настоящего диссертационного исследования.

Для расчёта стоимости покрывающего экрана определены объёмы материалов, из которых состоит экран, с учётом концептуальных решений по закрытию ППЗРО, представленных в [6]. Модель, положенная в основу расчёта объёма покрывающего экрана представлена на рисунке 2.9.

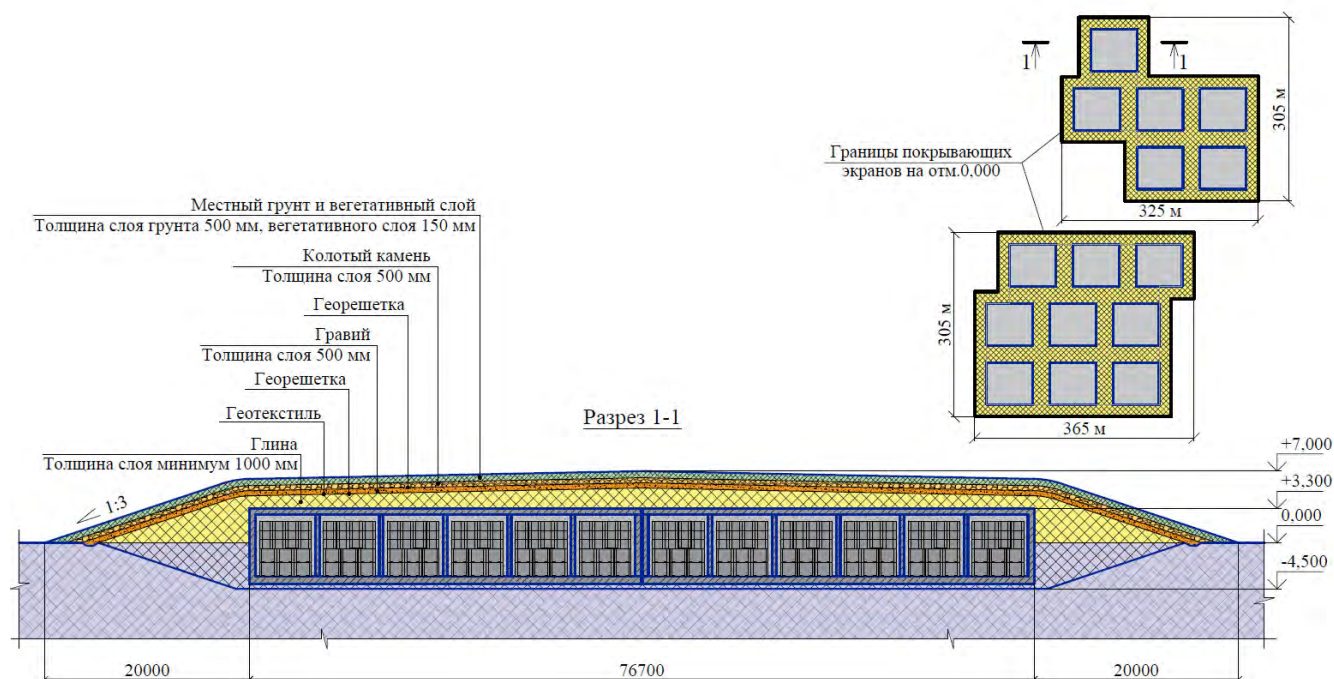


Рисунок 2.9 – Модель для расчёта объёмов покрывающего экрана ППЗРО в Челябинской обл.

Данные по объёмам материалов покрывающего экрана ППЗРО приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Данные по объёмам материалов, используемых для создания покрывающего экрана ППЗРО в Челябинской обл.

№ п/п	Материал	Толщина слоя	Количество материала	Общий объём покрывающего экрана
1	Глина бентонитовая	1000 мм (min)	515 тыс. м ³	770 тыс. м ³
2	Гравий	500 мм	75 тыс. м ³	
3	Колотый камень фракции 150 мм	500 мм	77 тыс. м ³	
4	Местный грунт	500 мм	78 тыс. м ³	
5	Вегетативный слой (газонная трава)	150 мм	25 тыс. м ³ (175 тыс. м ²)	
6	Геотекстиль	2 мм	174 тыс. м ²	
7	Георешетка	100 мм	350 тыс. м ²	

При расчёте стоимости покрывающего экрана по федеральным расценкам средняя стоимость создания 1 м³ покрывающего экрана составляет 192 руб./м³ в ценах 2000 г. Исходя из этих данных стоимость покрывающего экрана составляет 147,8 млн. руб. в ценах 2000 г.

Для представленной на рисунке 2.9 модели ППЗРО характерно, что большую часть объёма экрана занимает глина, заполняющая пространство между модулями захоронения. Размещая модули захоронения ближе друг к другу, можно добиться существенной экономии в расходе материалов на создание покрывающего экрана. Зависимость стоимости покрывающего экрана

от расстояния между модулями захоронения для компоновки модулей ППЗРО в Челябинской обл. представлена на рисунке 2.10.

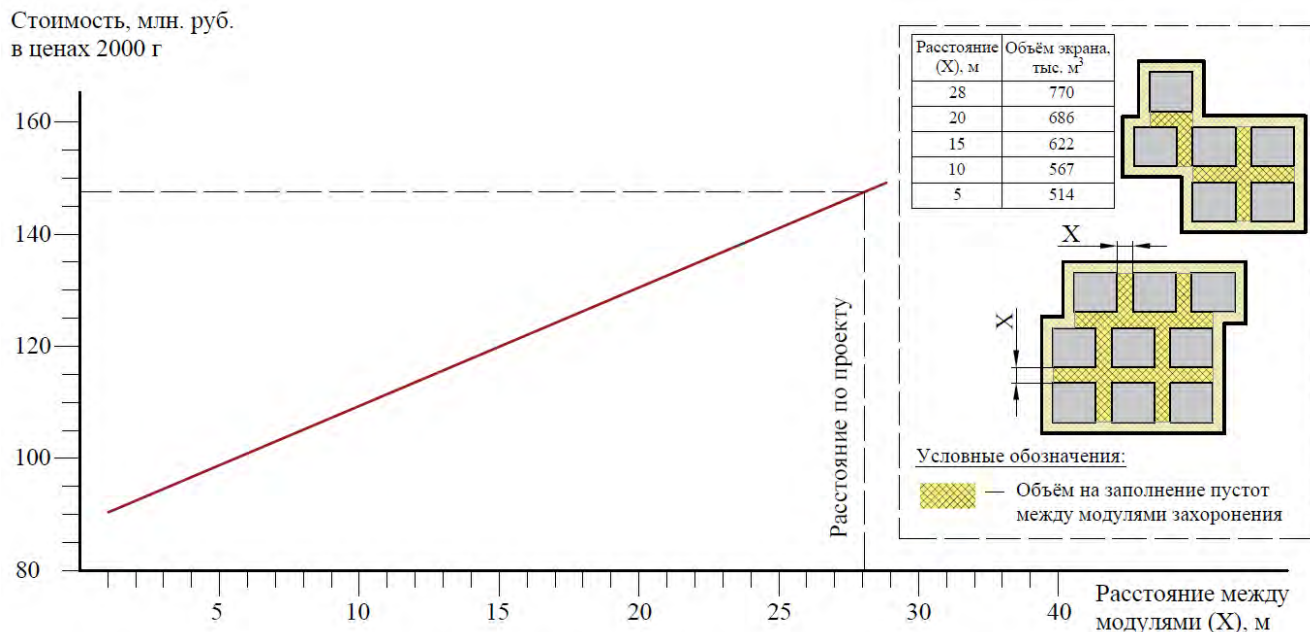


Рисунок 2.10 – Зависимость стоимости покрывающего экрана от расстояния между модулями захоронения для ППЗРО в Челябинской обл.

Итого для ППЗРО в Челябинской обл. стоимость ИББ для захоронения 225 тыс. м³ упаковок РАО составляет (в ценах 2000 г.):

- форма РАО – 283,2 млн. руб.
- контейнеры – 1068 млн. руб.
- буферный материал – 76,5 млн. руб.
- ограждающие конструкции – 408,2 млн. руб.
- подстилающий экран – 64,5 млн. руб.
- покрывающий экран – 147,8 млн. руб.

Совокупная стоимость ИББ составляет 2048,2 млн руб. в ценах 2000 г. Диаграмма распределения затрат на ИББ представлена на рисунке 2.11.

Данные по распределению затрат на создание ИББ позволяют определить приоритетные направления для поиска экономичных решений – в первую очередь это оптимизация решений по контейнерному парку для захоронения РАО класса 4 и снижение затрат на создание ограждающих конструкций.

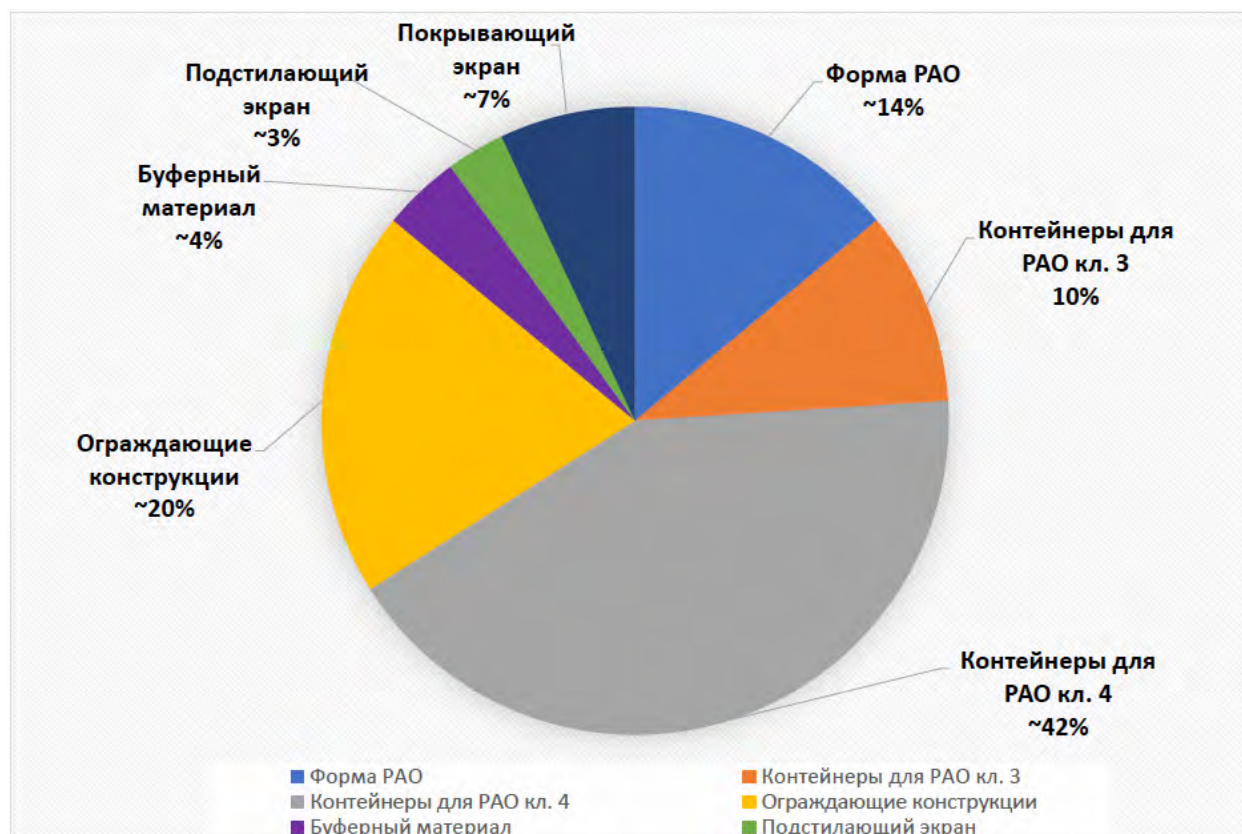


Рисунок 2.11 – Декомпозиция затрат на создание ИББ ППЗРО (на примере ППЗРО в Челябинской обл.)

Вклад в стоимость сооружений захоронения формы РАО (третий по значимости барьер с точки зрения затрат на ИББ согласно рисунку 2.11) существенно зависит от методики расчета стоимости переработки отходов. В настоящей работе стоимость создания формы РАО рассчитана по нижней границе стоимости переработки ЖРО методом цементирования (2,2 тыс. руб. в ценах 2000 г.). В случае расчёта по верхней границе стоимости переработки РАО (12,6 тыс. руб. в ценах 2000 г.) более чем в 1,5 раза возрастает стоимости всей системы ИББ и вклад формы РАО в общую стоимость в данном случае составляет около 45 %. От выбора способа переработки зависят объёмы кондиционированных РАО и в конечном итоге затраты на все остальные ИББ. В публикации [188], например, предлагалось применение технологии остекловывания низко-и среднеактивных ЖРО вместо технологии цементирования, что, несмотря на бóльшую стоимость оборудования, даёт эффект в виде сокращения объёма кондиционированных РАО. Выбор оптимального способа переработки отходов для задач окончательной изоляции РАО является предметом отдельного исследования и в настоящей работе подробно не рассматривается, так как выходит за пределы исследуемой области (сооружений захоронения ППЗРО).

Стоимость буферных материалов, подстилающего и покрывающего экрана вносит меньший вклад в совокупную стоимость системы ИББ по сравнению с другими барьерами, однако и

для данных барьеров могут быть намечены пути оптимизации затрат. Например, сокращение расстояний с 28 м до 5 м между модулями захоронения РАО ППЗРО в Челябинской обл. позволяет в 1,5 раза сократить стоимость покрывающего экрана. Сокращение затрат на буферные материалы может быть достигнуто за счёт применения различных буферных материалов для РАО классов 3 и 4 – более надёжных (и дорогостоящих) – для засыпки пустот между упаковками РАО класса 3 и более доступных – для засыпки пустот между упаковками РАО класса 4.

Выводы к главе 2

По результатам обзора технологий окончательной изоляции РАО, выполненного в главе 1, в главе 2 представлены возможные варианты конструкций и материалов ИББ ППЗРО, выполнен анализ различных факторов, влияющих на решения по выбору данных вариантов.

Анализ российских норм и правил, стандартов и руководств в области обращения с РАО на конечных стадиях, проектных основ и базовых принципов создания сооружений захоронения, разработанных МАГАТЭ, показывает, что в нормативной базе представлены в основном общие требования к составу ИББ и их основным функциям и практически нет ограничений на выбор конструкций и материалов ИББ, так как этот выбор определяется характеристиками РАО и особенностями площадки размещения ППЗРО и должен быть сделан и обоснован на этапе проектирования.

В связи с тем, что требования к барьерам безопасности зависят от сроков, в течение которых ИББ должны выполнять свои функции, в главе 2 предложен подход, позволяющий на этапе проектирования методически подойти к назначению параметров ИББ (рисунок 2.12).

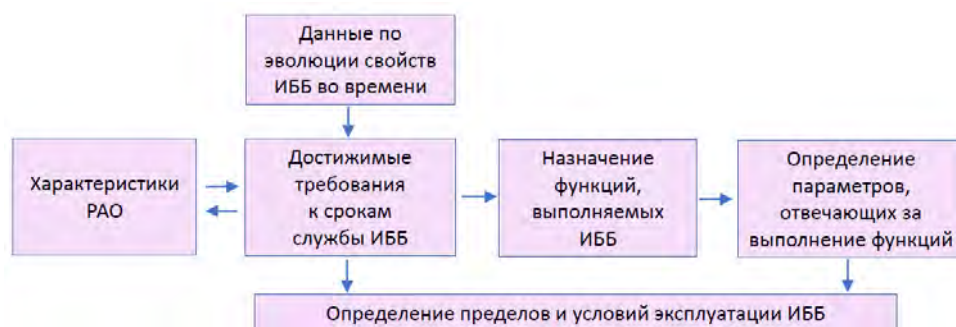


Рисунок 2.12 – Алгоритм для определения параметров ИББ, пределов и условий эксплуатации ИББ при проектировании ППЗРО

Согласно предложенному подходу определены требования к срокам службы ИББ ППЗРО. На примере эксплуатационных низко- и среднеактивных РАО Белорусской АЭС, радионуклидный состав которых представлен преимущественно короткоживущими радионуклидами, установлена взаимосвязь сроков контроля за сооружениями захоронения ППЗРО и удельной актив-

ностью РАО (10^7 Бк/кг – 250 лет, для отходов с удельной активностью 10^8 Бк/кг – 350 лет, 10^9 Бк/кг – 450 лет и т.д.).

Отмечено, что в тех случаях, когда радионуклидный состав и удельная активность РАО класса 3 влекут необходимость назначения длительных сроков службы ИББ и длительных периодов активного контроля (более 300-500 лет), целесообразно применение среднеглубинных сооружений, в которых маловероятно непреднамеренное вторжение человека по истечении сроков активного контроля.

Для основных материалов, используемых в ИББ, рассмотрены данные по эволюции их свойств со временем, определены требования к ИББ исходя из задачи выполнения своих функций на основных этапах жизненного цикла ППЗРО. Показано, что часть функций может выполняться только на этапах эксплуатации и закрытия – например, функции ограждающих конструкций для РАО класса 4. Определён перечень параметров, отвечающих за выполнение ИББ своих функций.

На примере ППЗРО для РАО классов 3 и 4, создаваемого в Челябинской обл., выполнен анализ стоимостных показателей ППЗРО:

- определены затраты на систему ИББ в целом, включая этап создания упаковки РАО и этап закрытия ППЗРО – создание покрывающего экрана. Исходя из этого, выполнена декомпозиция затрат на все инженерные барьеры безопасности;
- показано, что затраты на контейнеры составляют около половины стоимости всей системы ИББ, и что затраты на контейнеры для захоронения РАО класса 4 несоразмерны их функциям (контейнеры для РАО класса 4 не выполняют функцию по изоляции (удержанию) радионуклидов);
- показана чувствительность стоимости всей системы ИББ к стоимости переработки РАО;
- приведены пути оптимизации затрат на ограждающие конструкции – за счёт их разделения на конструкции для захоронения РАО класса 3 и РАО класса 4 и предъявления разных требований по их функциям, срокам службы, классификации согласно НП-016-05 [35];
- установлена зависимость стоимости покрывающего экрана от расстояний между сооружениями захоронения.

На основе анализа системы ИББ ППЗРО, выполненного в главе 2, в главе 3 разработаны предложения по оптимальному способу окончательной изоляции РАО классов 3 и 4 – с учётом необходимых и достаточных требований к системам и элементам сооружений захоронения РАО и намеченных путей сокращения стоимости ИББ.

3 ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ СПОСОБА ЗАХОРОНЕНИЯ РАО КЛАССОВ 3 И 4

В настоящей главе разработаны предложения по выбору способа захоронения РАО классов 3 и 4 применительно к практической задаче создания ППЗРО в Республике Беларусь, в которой к 2030 году должны заполниться хранилища низко- и среднеактивных РАО Белорусской АЭС [142] и будет необходимо извлекать накопленные отходы и направлять их на окончательную изоляцию. Предложения разработаны с уклоном на универсальность технических решений, с целью применения для других стран, для которых РФ является поставщиком технологий ядерного топливного цикла [189], а также с учётом перспектив применения в РФ – для будущих российских ППЗРО [190].

В разделе 3.1 приведены общие решения по облику перспективного типового ППЗРО, в разделах 3.2÷3.6 – предложения по выбору конструкций и материалов ИББ и основных элементов сооружений захоронения РАО классов 3 и 4, с учётом результатов аналитической работы, выполненной в главах 1 и 2.

3.1 Облик перспективного наземного ППЗРО для РАО классов 3 и 4

С учётом актуальности вопроса захоронения РАО, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации АЭС, облик ППЗРО разработан в привязке к задаче захоронения РАО, образующихся на АЭС с реакторами типа ВВЭР-1200 – на перспективу захоронения отходов от эксплуатации и ВЭ данных АЭС, в том числе для возможности использования в разработке концепции типового ППЗРО в зарубежных проектах госкорпорации Росатом, в основном ориентированных на строительство АЭС с данным типом реакторов.

Вместимость ППЗРО принята из расчета захоронения РАО, образующихся за весь срок эксплуатации АЭС с двумя блоками реакторов ВВЭР-1200 и при выводе из эксплуатации, и составляет по различным оценкам от 30 до 40 тыс. м³ [142, 191]. Для перспективного ППЗРО предусмотрена возможность расширения и при оценках стоимости выполнено масштабирование до вместимости 225 тыс. м³ РАО, соответствующей вместимости ППЗРО в Челябинской обл. – для возможности релевантного сравнения технико-экономических показателей.

В связи с тем, что площадка для ППЗРО в Республике Беларусь по состоянию на 2024 год не определена (рассматривается несколько вариантов размещения ППЗРО [192]) характеристики площадки приняты с суглинками в качестве вмещающих пород и консервативно достаточно высоким уровнем грунтовых вод, с учётом требований нормативных документов по выбору площадок для ОИАЭ [34, 193-196]. Характеристики площадки размещения ППЗРО, на основе

которых в настоящей работе выполнены оценки безопасности, приведены в таблице А.3 Приложения А.

Номенклатура эксплуатационных РАО Белорусской АЭС, поступающих на захоронение после 10 лет выдержки в пристанционных хранилищах, приведена в таблице 3.1. Данные по радионуклидному составу и удельной активности всех отходов, поступающих на захоронение, с учётом РАО, образующихся при выводе АЭС из эксплуатации, приведены в разделе 4.1 главы 4.

Таблица 3.1 – Характеристики эксплуатационных РАО Белорусской АЭС, поступающих на захоронение после 10 лет выдержки в пристанционных хранилищах

№ п/п	Наименование РАО	Тип контейнеров, в которых хранятся РАО	Удельная активность, Бк/кг
1	Отверждённые (цементированные РАО)	НЗК-150-1,5П	$2,75 \cdot 10^7$
2	Осушенные отработанные ИОС	НЗК-150-1,5П (ИОС)	$3,3 \cdot 10^7$
3	Среднеактивные ТРО	Бочка 200 л	$3,75 \cdot 10^7$
4	Горючие НАО	Бочка 200 л	$9,9 \cdot 10^6$
5	Негорючие НАО	Бочка 200 л	$4 \cdot 10^6$

Облик сооружений захоронения перспективного типового ППЗРО и принципиальные отличия от сооружений захоронения ППЗРО, проектируемых в настоящее время в РФ, приведены на рисунке 3.1.

Сооружения захоронения РАО классов 3 и 4 перспективного типового ППЗРО размещаются на уровне земной поверхности. Возведение сооружений начинается с создания подстилающего экрана (см. раздел 3.5) – выборки грунта и засыпки под зоной захоронения РАО слоя природного сорбирующего материала (клиноптилолит, цеолитсодержащий трепел или иной материал), назначение которого – отвод воды, в случае нарушения гидроизоляции покрывающего экрана и при этом сорбция радионуклидов, выходящих из упаковок вместе с водой на период после закрытия ПЗРО. На слое сорбирующего материала осуществляется возведение модулей захоронения.

Модуль (см. раздел 3.3) представляет собой железобетонное сооружение, поделённое на отсеки, в которые сверху с помощью крана устанавливаются упаковки РАО. Для захоронения упаковок РАО класса 3 и упаковок РАО класса 4 используются разные модули (с разными характеристиками, отвечающими за надёжность, прочность, долговечность, биологическую защиту). При этом конструкция модулей унифицирована по форме и габаритам.

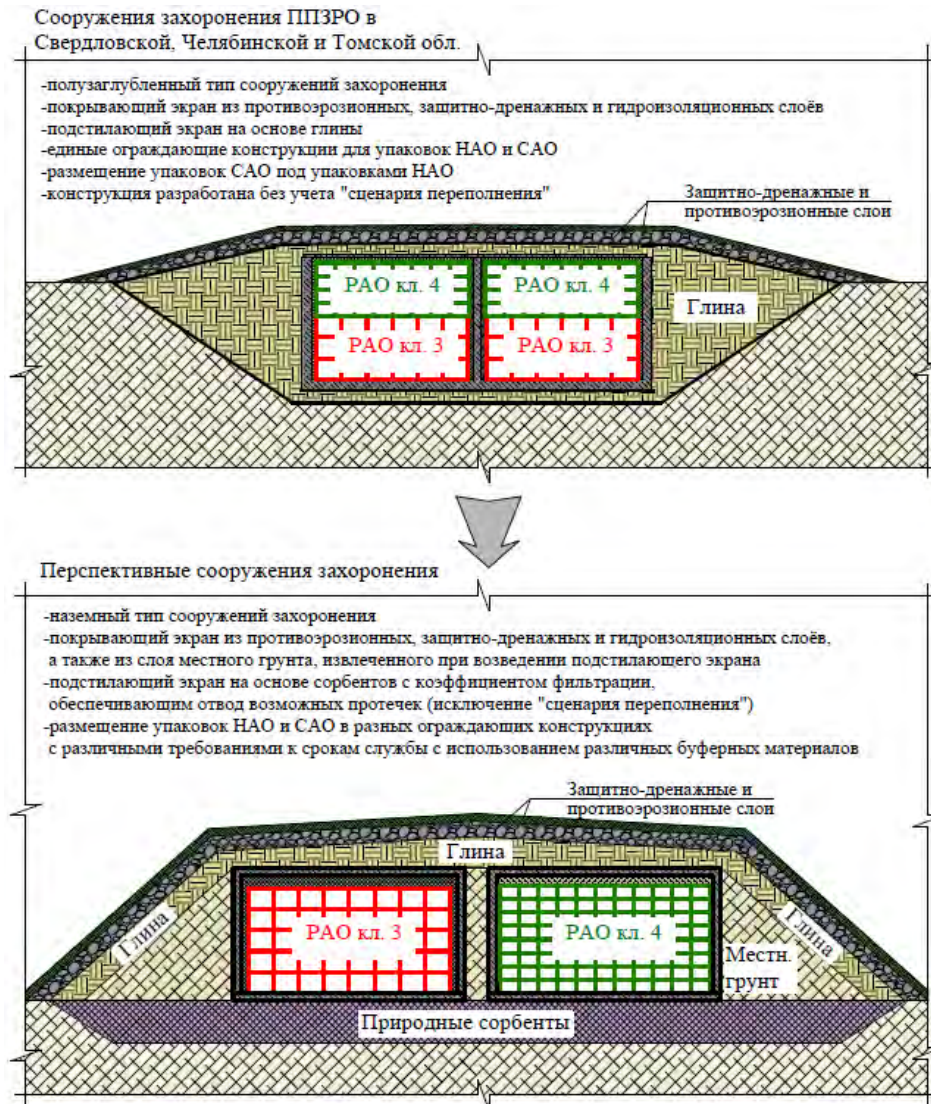


Рисунок 3.1 – Облик перспективных сооружений захоронения ППЗРО в сравнении с сооружениями захоронения, проектируемыми в настоящее время в РФ

Захоронение РАО класса 3 осуществляется в контейнерах типа НЗК, которые в составе сооружений захоронения являются одним из ИББ. Захоронение РАО класса 4 осуществляется в бочках 200 л, и контейнерах новой разработки (композитных, полимерных, см. раздел 3.2), на которые не возлагаются функции барьера безопасности, но которые при этом обеспечивают безопасную транспортировку и размещение РАО в отсеки захоронения.

Пустоты между упаковками РАО в отсеках захоронения заполняются буферным материалом (см. раздел 3.6) – бетоном для РАО класса 4, бентонитом для РАО класса 3.

В период загрузки упаковок РАО отсеки захоронения не имеют верхнего перекрытия. По мере заполнения отсеков упаковками РАО и буферными материалами над ними возводится железобетонное перекрытие. Отсек захоронения с возведённым железобетонным перекрытием выдерживает внешние воздействия, установленные требованиями Приложения 1 НП-055-14

[25] до завершения этапа закрытия ППЗРО, на котором осуществляется возведение покрывающего экрана.

Всего для захоронения РАО классов 3 и 4 предусматривается 4 очереди строительства по два модуля захоронения в одной очереди (один модуль для РАО класса 3 и один для РАО класса 4).

Покрывающий экран (см. раздел 3.4) представляет собой многослойное инженерное сооружение на основе местного грунта, используемого для заполнения пустот между модулями захоронения и формирования уклонов, глинистых материалов, обеспечивающих гидроизоляцию и препятствующих выходу радионуклидов, щебня, обеспечивающего дренаж поверхностных стоков и защиту от проникновения грызунов и корней растений и вегетативного слоя, обеспечивающего защиту от эрозии. Возведение покрывающего экрана осуществляется после загрузки всех очередей строительства ППЗРО. На этапе эксплуатации ППЗРО на площадке организуется система сбора и отвода осадков, препятствующая проникновению воды в подстилающий экран (см. раздел 3.5).

Облик перспективного типового ППЗРО разработан на основе положений, следующих из анализа, выполненного в главах 1 и 2:

- наземное размещение сооружений захоронения в условиях отсутствия данных по гидрогеологии площадки является предпочтительным, так как в меньшей степени подвержено влиянию уровня грунтовых вод;
- комплекс предлагаемых инженерных решений основан на опыте создания наземных ППЗРО в других странах (при разработке компоновочных и транспортно-технологических решений использованы данные по ППЗРО во Франции [81] (в части ограждающих конструкций и решений по загрузке упаковок РАО), Испании [86] (в части покрывающего экрана), Болгарии [93] (в части подстилающего экрана)) и других стран;
- размещение РАО класса 3 и РАО класса 4 целесообразно осуществлять в разных модулях захоронения – для возможности дифференциации требований к ограждающим конструкциям, буферным материалам, упаковкам, но под одним покрывающим экраном – для экономии материалов на создание данного экрана;
- для препятствия накоплению воды и реализации сценария «перелива» сооружений захоронения целесообразно создание проницаемого основания из природных сорбентов, способных пропускать воду и удерживать радионуклиды;
- для захоронения РАО класса 4 целесообразно использовать новый парк контейнеров – более технологичных в изготовлении, чем металлические контейнеры и более доступных по стоимости.

3.2 Предложения по усовершенствованию контейнерного парка для захоронения РАО

При разработке облика перспективного типового ППЗРО реализованы следующие решения по контейнерам для захоронения РАО:

- 1) захоронение РАО класса 3 осуществляется в контейнерах типа НЗК;
- 2) захоронение РАО класса 4 осуществляется:
 - негорючих накопленных низкоактивных ТРО – в той таре, в которой осуществлялось хранение – в металлических бочках объёмом 200 л, с установкой бочек в клетки по 4 шт. для удобства транспортирования и загрузки в модули захоронения;
 - негорючих ещё не накопленных низкоактивных ТРО – в полимерных контейнерах новой разработки типа КПН;
 - горючих низкоактивных ТРО (накопленных и в перспективе образующихся) – в композитных огнестойких контейнерах новой разработки типа КНГО.

Предложения по усовершенствованию контейнерного парка (по созданию более экономичных контейнеров) разработаны применительно к контейнерам для захоронения РАО класса 4, объёмы которых больше, чем РАО класса 3, в связи с чем на них приходится бóльшая часть затрат на создание системы ИББ. На контейнеры разработаны исходные технические требования (ИТТ) в составе НИР, посвящённой концепции захоронения РАО Белорусской АЭС [173].

Конструктивные решения перспективного контейнера из полимерных материалов приведены на рисунке 3.2.

Контейнер типа КПН (Контейнер Полимерный Невозвратный для низкоактивных РАО класса 4) по габаритам и форме аналогичен контейнеру КРАД-1,36 (модификация контейнера КПН-1,5, рисунок 3.3) и контейнерам КМЗ и НЗК (модификация КПН-3,5). Контейнер может быть выполнен из различных полимерных материалов, например, полиэтилена низкого давления (ПНД) с добавками-антипиренами, придающими изделию негорючие или трудногорючие свойства.

Отличительной особенностью контейнера КПН является система герметизации, позволяющая создать сплошное сварное соединение крышки и корпуса. Для герметизации контейнера в конструкции той части корпуса, к которой примыкает крышка, предусмотрен нагревательный элемент (рисунок 3.2), разогревающийся при подключении к электросети и проплавливающий соединение крышки и корпуса, образуя сплошной сварной шов. В отличие от болтового соединения крышки и корпуса металлических контейнеров такая система герметизации практически не

требует присутствия человека при проведении работ и обеспечивает герметичность упаковки РАО.

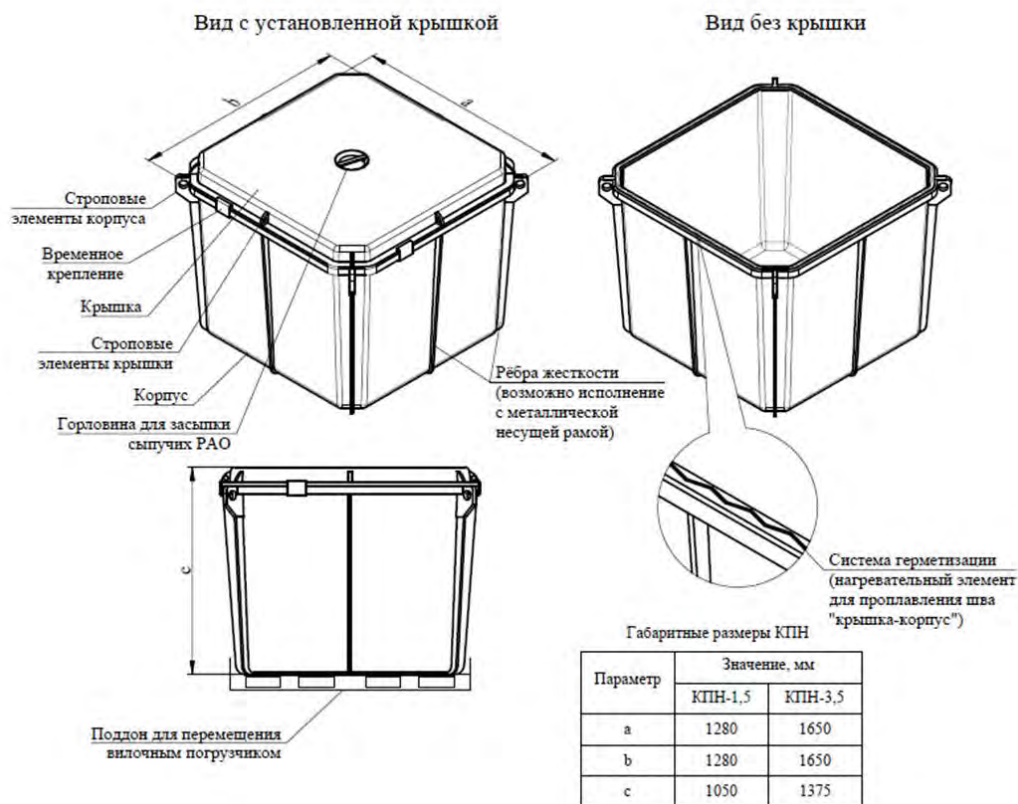


Рисунок 3.2 – Общий вид полимерных контейнеров типа КПН



Рисунок 3.3 – Контейнеры для низкоактивных РАО: контейнер КРАД-1,36 (слева) и предлагаемый в качестве альтернативы полимерный контейнер КПН-1,5

Контейнер из полимерных материалов более технологичен в производстве, чем металлические контейнеры, для изготовления которых требуется проведение операций по раскрою и гибке листов металла, сварке, контролю сварных соединений, окраске и т.п. Для полимерных контейнеров при использовании технологии литья под давлением [197] или технологии ротаци-

онного формования [198] изготовление контейнера осуществляется за одну непродолжительную технологическую операцию, что даёт предпосылки для снижения стоимости таких контейнеров, особенно при их широкомасштабном производстве.

Характеристики контейнера КПН представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики контейнера типа КПН

Параметр	Значение параметров*	
	КПН-3,5	КПН-1,5
Материал	Полиэтилен низкого давления с добавками-антипиренами**	Полиэтилен низкого давления с добавками-антипиренами**
Способ герметизации	Термическая сварка	Термическая сварка
Срок службы	50 лет	50 лет
Высота падения без просыпания и рассеивания, мм	1200	1200
Длина, мм	1650	1280
Ширина, мм	1650	1280
Высота, мм	1375	1060
Толщина стенок, мм	До 15	До 10
Ёмкость, м ³	3,2	1,5
Масса порожнего (с крышкой), кг	270 (до 300)	80 (до 100)
Масса с ТРО, кг	не более 3500	не более 1500
Количество ярусов при штабелировании	5	6
Классификационное обозначение по НП-016-05	4Н	4Н
Категория сейсмостойкости по НП-031-01	III	III
*Представленные параметры являются предварительными и уточняются при разработке КД		
**Полимерный материал выбирается при разработке КД		

Технология изготовления полимерных контейнеров может быть использована не только для создания контейнеров, аналогичных КРАД и КМЗ, но и для создания вкладышей, используемых для хранения и захоронения ОИОС в составе контейнера НЗК. Предложения по использованию контейнеров КПН, а также полимерных вкладышей в контейнеры НЗК-150-1,5П ИОС представлены в публикации [199] (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Контейнеры для ОИОС: контейнер НЗК с металлическим вкладышем (слева) и предлагаемый в качестве альтернативы полимерный вкладыш (справа)

В разделе 2.4 главы 2 отмечалось, что высокие затраты на контейнеры для РАО класса 4 обусловлены в том числе использованием контейнеров НЗК, что в свою очередь вызвано требованием п. 24 НП-093-14 [27], обязывающем размещать горючие РАО в огнестойком контейнере:

– «В общем случае для захоронения допустимы негорючие и трудногорючие РАО. Горючие РАО могут быть приняты на захоронение, если они упакованы в соответствующем контейнере (упаковочном комплекте), при этом полученная упаковка РАО соответствует требованиям к огнестойкости, установленным в проекте ПЗРО в соответствии с требованиями настоящих федеральных норм и правил».

Для горючих низкоактивных отходов, предлагается использование композитного контейнера из огнеупорного материала, который при габаритных размерах контейнера НЗК, обладает меньшим весом, большей вместимостью ($1,7 \text{ м}^3$ вместо $1,5 \text{ м}^3$) и позволяет разместить в одном контейнере пять бочек объемом 200 л вместо четырех в НЗК (рисунок 3.5).

Контейнер типа КНГО (Контейнер Невозвратный для Горючих Отходов) по габаритам и форме аналогичен контейнеру НЗК, но состоит из двух материалов:

- стальной оболочки, обеспечивающей прочность, не сорбирующей радионуклиды и, в связи с этим, позволяющей при необходимости проводить дезактивацию;
- огнеупорного материала – наполнителя оболочки.

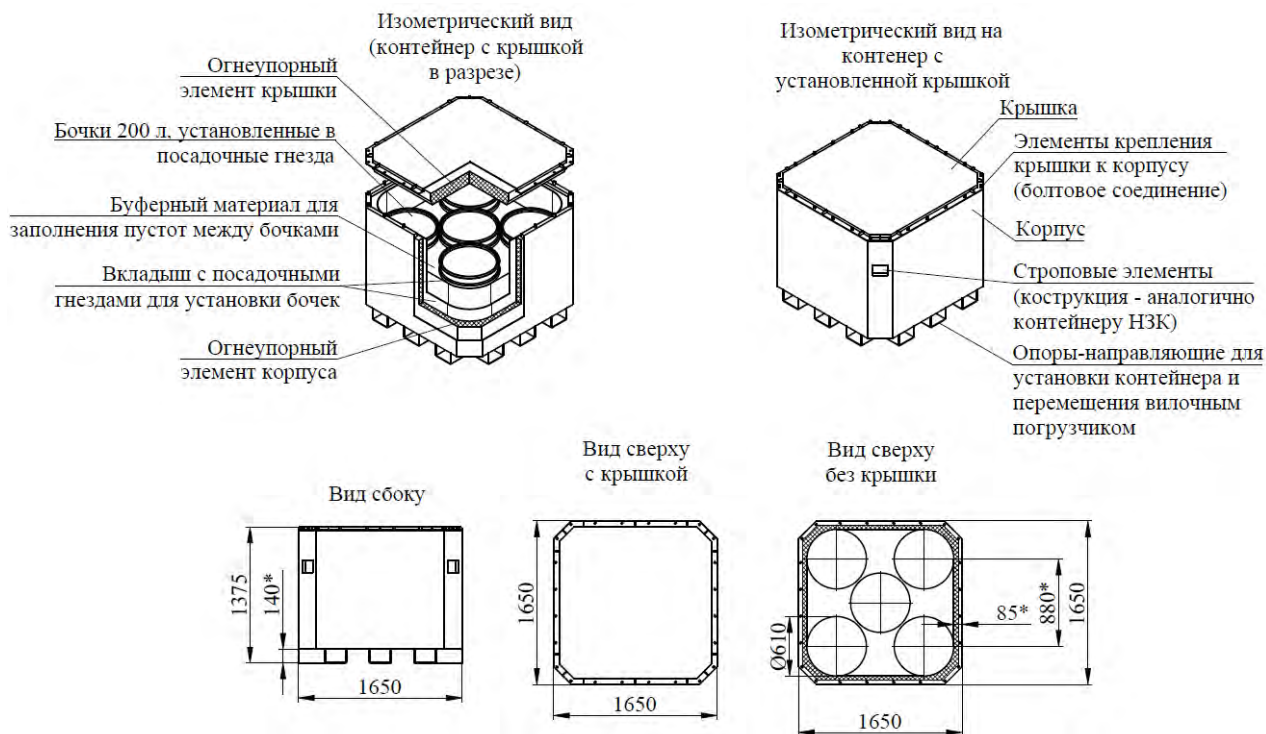


Рисунок 3.5 – Общий вид композитного огнестойкого контейнера типа КНГО для горючих низкоактивных ТРО

В качестве материала-наполнителя, обеспечивающего огнестойкость контейнера, может быть использован базальт, стекловолокно или иные материалы, подобранные для получения огнеупорных характеристик согласно общим требованиям к испытаниям на огнестойкость, представленных в ГОСТ 30247.0-94 [200].

Характеристики контейнера КНГО приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристики контейнера типа КНГО

№ п/п	Параметр	Значение
1	Вместимость (кол-во бочек 200 л), шт.	5
2	Общий объём внутренней полости, м ³	1,8
3	Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	1650×1650×1375
4	Способ герметизации	С помощью уплотнительного элемента и болтового соединения
5	Срок службы	50 лет
6	Толщина стенки корпуса, не более, мм	85*
7	Толщина стенки крышки, не более, мм	85*
8	Масса порожнего, кг (нетто)	800*
9	Масса заполненного, кг (брутто)	до 3000*

№ п/п	Параметр	Значение
10	Материал огнеупорного наполнителя	Базальт*
11	Материал оболочки	Сталь*
12	Количество ярусов при штабелировании	5
13	Огнестойкость по ГОСТ 30247.0-94 [204]	0,75 часа
14	Высота падения без просыпания и рассеивания, мм	1200
15	Классификационное обозначение по НП-016-05 [35]	4Н
16	Категория сейсмостойкости по НП-031-01 [36]	III
*Значение параметра уточняется Разработчиком		

Композитный контейнер исходя из особенностей своей конструкции достаточно сложен в производстве, в связи с чем его стоимость выше, чем контейнера КПН, однако экономический эффект от его использования достигается не только за счёт его цены, но и за счёт вместимости.

Оценка стоимости контейнеров типа КПН и КНГО и экономического эффекта от их применения выполнена в разделе 4.2 главы 4.

3.3 Технические решения по ограждающим конструкциям ППЗРО

Облик ограждающих конструкций перспективного типового ППЗРО разработан на основе назначения и роли, определённых для них согласно выполненному анализу функций ИББ в разделе 2.3 главы 2:

- препятствие техногенным и природным воздействиям;
- восприятие механических нагрузок от покрывающего экрана;
- ограждение (опалубка) для засыпки буферного материала;
- защита человека от воздействия ионизирующего излучения;
- обеспечение структурной стабильности штабеля упаковок РАО.

Выбор в пользу принципиального наличия ограждающих конструкций (в главе 1 и на рисунке 2.1 главы 2 показано, что для приповерхностного захоронения РАО возможны варианты и без ограждающих конструкций) сделан с учётом климатических условий площадки и вышеуказанного функционального назначения.

Для РАО класса 3 и РАО класса 4 предлагается использовать ограждающие конструкции с различными показателями по долговечности и прочности, предъявив разные требования по

классификации ограждающих конструкций согласно НП-016-05 [35], но унифицировав при этом их размеры.

Облик ограждающих конструкций представлен на рисунке 3.6.

В качестве ограждающих конструкций предлагается использовать железобетонные модули с габаритами $\sim 60 \times 18 \times 8$ м. Модуль представляет собой сооружение прямоугольной формы в плане и в разрезе, поделённое перегородками на отсеки. Верхняя часть модуля на этапе загрузки РАО не имеет перекрытия. Сквозь все перегородки и одну торцевую стенку проходит проём, предназначенный для проезда техники к отсекам захоронения. По мере заполнения отсеков захоронения упаковками РАО данный проём бетонируется.

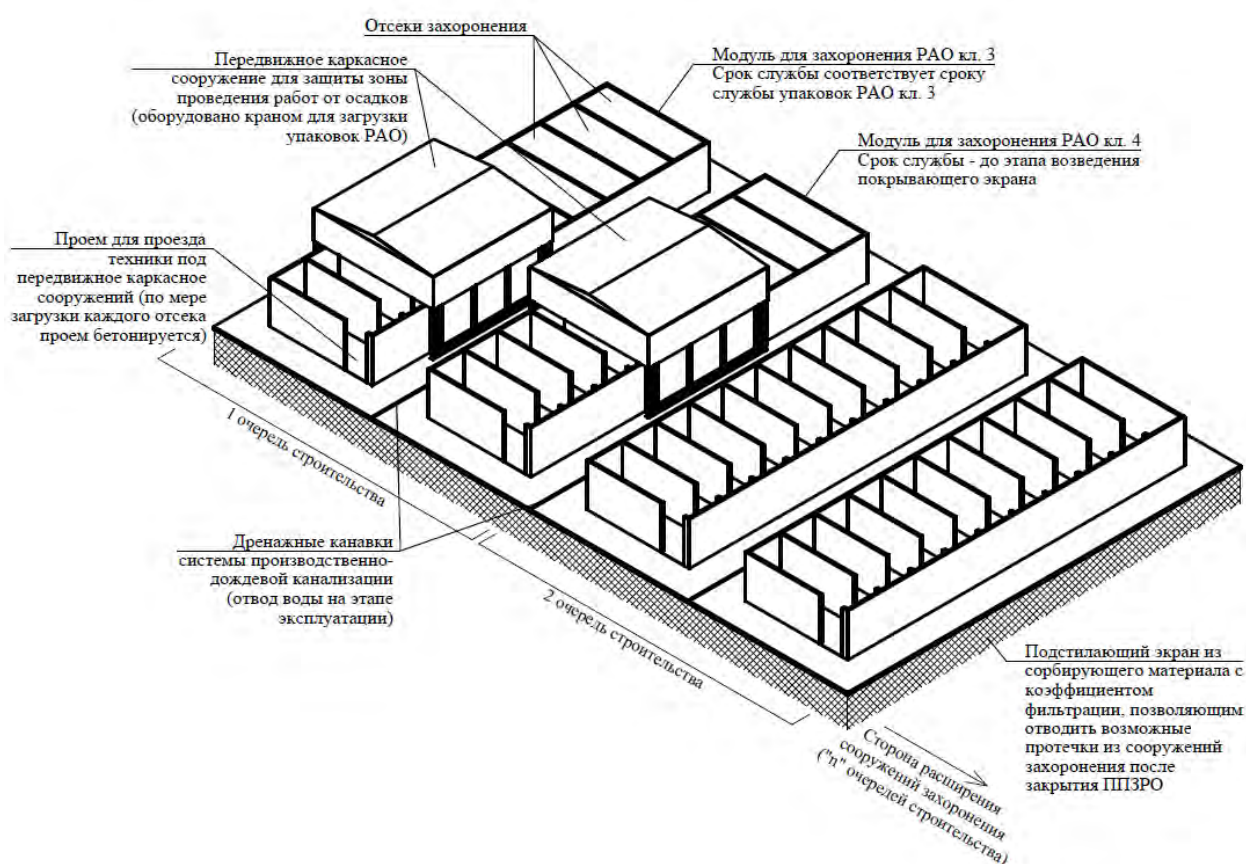


Рисунок 3.6 – Облик ограждающих конструкций перспективного типового ППЗРО (количество модулей для захоронения РАО классов 3 и 4 в одной очереди строительства может уточняться в зависимости от соотношения объёмов упаковок РАО классов 3 и 4)

В каждом модуле предусматривается 10 отсеков захоронения. В один отсек вмещается 150 шт. упаковок с габаритами контейнера типа НЗК ($1650 \times 1650 \times 1375$ мм) или 312 шт. упаковок с габаритами контейнера типа КРАД-1,36 ($1280 \times 1280 \times 1060$ мм). Всего в одном модуле размещается около 5,5 тыс. м^3 упаковок РАО.

Основанием модулей захоронения является железобетонная плита, выполненная из бетона с высоким коэффициентом фильтрации (низкими показателями влагонепроницаемости по

ГОСТ 12730.5-2018 [201]). Данная плита препятствует накоплению воды в отсеках захоронения и обеспечивает отвод возможных протечек в нижележащий слой природного сорбента, предусмотренный в составе подстилающего экрана. На этапе эксплуатации ПЗРО в железобетонной плите предусмотрены дренажные канавки, отводящие воду в систему очистки ливневых стоков очистных сооружений площадки ППЗРО.

Над отсеками захоронения размещается передвижное каркасное сооружение (ПКС), закрывающее зону проведения работ от атмосферных осадков и ветра. Габариты передвижного каркасного сооружения: 21,4×22×13,6 м. Сооружение укрывает одновременно три отсека захоронения – в одном отсеке ведутся работы по загрузке упаковок / заполнению пустот буферными материалами / возведению перекрытия, в двух других отсеках размещается вспомогательное оборудование и транспорт. Передвижное каркасное сооружение устанавливается на рельсовый путь, проходящий вдоль каждого модуля захоронения. В состав сооружения входит система его передвижения. В передвижном каркасном сооружении размещается мостовой кран, обеспечивающий проведение операций по загрузке упаковок РАО и заполнению пустот буферными материалами.

Схемы проведения основных технологических операций по загрузке упаковок РАО, по бетонированию перекрытий и проёмов между отсеками захоронения, по укладке буферных материалов, проводимых под ПКС, приведены в разделе 4.1 при описании эксплуатационной безопасности ППЗРО.

Возведение ограждающих конструкций предполагается осуществлять очередями по несколько модулей захоронения в каждой очереди, в зависимости от соотношения объёмов РАО классов 3 и 4 в одной очереди может быть один модуль для РАО класса 3 и один или несколько модулей для РАО класса 4. Для захоронения 30 тыс. м³ РАО Белорусской АЭС требуется не менее трёх очередей (6 модулей захоронения РАО).

Характеристики ограждающих конструкций приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Характеристики ограждающих конструкций ППЗРО

№ п/п	Параметр	Значение	
		Модули захоронения РАО класса 3	Модули захоронения РАО класса 4
1	Внешние габаритные размеры модуля захоронения (ДхШхВ), м	60,6×18,6×7,6	60,4×18,4×7,6
2	Вместимость одного модуля по упаковкам РАО, м ³	5600 (по упаковкам с габаритами 1650×1650×1375 мм)	5400 (по упаковкам с габаритами 1280×1280×1060 мм)
	Количество отсеков в одном модуле захоронения, шт.	10	10

№ п/п	Параметр	Значение	
		Модули захоронения РАО класса 3	Модули захоронения РАО класса 4
3	Вместимость одного отсека	150 шт. упаковок с габаритами 1650×1650×1375 мм 312 шт. упаковок с габаритами 1280×1280×1060 мм	
4	Габаритные размеры отсека захоронения (ДхШхВ), мм	5,6×17,2×7,6	5,6×17,6×7,6
5	Толщина стенок модуля, мм	600	400
6	Материал	Железобетон	Железобетон
7	Срок службы	Сохранение прочностных свойств – 300 лет	Сохранение прочностных свойств – 100 лет
8	Коэффициент фильтрации верхнего перекрытия и стенок, м/с (м/сут)	$10^{-14} \div 10^{-12}$ ($8,7 \cdot 10^{-10} \div 8,7 \cdot 10^{-8}$)*	$10^{-13} \div 10^{-12}$ ($8,7 \cdot 10^{-9} \div 8,7 \cdot 10^{-8}$)*
9	Коэффициент фильтрации основания, м/с (м/сут)	$10^{-9} \div 10^{-10}$ ($8,7 \cdot 10^{-5} \div 8,7 \cdot 10^{-6}$)*	$10^{-9} \div 10^{-10}$ ($8,7 \cdot 10^{-5} \div 8,7 \cdot 10^{-6}$)*
10	Плотность материала, т/м ³	2,4	2,4
11	Предел прочности	Определяется при проектировании исходя из задачи выдерживания внешних воздействий, установленных приложениями №1 и №3 НП-055-14 [25], и учитывая нагрузки от покрывающего экрана	
12	Классификационное обозначение по НП-016-05 [35]	3НЗ	4Н
13	Категория сейсмостойкости по НП-031-01[36]	II	III
*Указаны пределы и условия эксплуатации ИББ (первое значение – в момент возведения ИББ – второе допустимое значение в момент окончания срока службы ИББ).			

В дополнение к варианту компоновки ограждающих конструкций, представленному на рисунке. 3.6, возможен также вариант с размещением модулей захоронения РАО класса 3 и РАО класса 4 на разных площадках с созданием разных покрывающих экранов, однако для данного варианта требуются большие площади и несколько большие объёмы материалов. Оценка объёмов материалов для различных вариантов создания покрывающих экранов приведена в разделе 3.4.

3.4 Покрывающий экран ППЗРО

Для покрывающего экрана ППЗРО на сегодняшнем уровне знаний в разных странах разработаны примерно одинаковые подходы по его конструкции и материалам, представленные в главе 1, заключающиеся в создании многослойного сооружения, основу которого составляют слои из натуральных долговечных материалов – глины, песка, щебня или крупных фракций камня, грунта с травяным покрытием, предназначенные для отвода воды, защиты укрываемых под экраном сооружений от внешних воздействий, удержанию радионуклидов и других задач, согласно функциональному назначению, представленному в главе 2. В этой связи задача выбо-

ра оптимального решения по конструкции покрывающего экрана (см. матрицу возможных решений на рисунке 2.1) сводится к уточнению толщин слоёв и выбору конфигурации экрана (экранов): создание нескольких экранов на каждую очередь сооружений захоронения или возведение одного экрана для всех очередей строительства – с целью сокращения затрат на закрытие ППЗРО. Зависимость затрат на создание покрывающего экрана от его объёма исследована в разделе 2.4 главы 2.

На рисунке 3.7 представлены варианты создания покрывающих экранов в привязке к возможным решениям по очередям строительства и компоновке модулей захоронения РАО классов 3 и 4:

- вариант 1 – компоновка модулей захоронения РАО класса 3 и РАО класса 4 для всех очередей строительства на одной площадке с созданием единого покрывающего экрана над всеми сооружениями захоронения (данный вариант взят за основу при разработке решений по ограждающим конструкциям, представленным в разделе 3.3);

- вариант 2 – компоновка модулей захоронения РАО класса 3 и РАО класса 4 на отдельных площадках с созданием одного покрывающего экрана над всеми сооружениями захоронения РАО класса 3 и одного покрывающего экрана над всеми сооружениями захоронения РАО класса 4;

- вариант 3 – компоновка модулей захоронения РАО класса 3 и РАО класса 4 на отдельной площадке для каждой очереди строительства с созданием одного покрывающего экрана для каждой очереди строительства.

На рисунке 3.7 представлены варианты для четырёх очередей строительства ППЗРО, предназначенных для захоронения до 40 тыс. м³ РАО (каждая очередь вмещает около 10 тыс. м³ РАО). Данные по объёму покрывающего экрана для каждого варианта его конфигурации в диапазоне вместимости сооружений захоронения от 10 тыс. м³ до 225 тыс. м³ упаковок РАО приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Данные по объёмам покрывающего экрана для различных вариантов его создания

Вместимость сооружений захоронения, тыс. м ³	Объём покрывающего экрана (экранов), тыс. м ³		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
10	82	82	82
50	201	254	411
100	351	403	822
150	500	552	1234
200	648	701	1646
250	798	850	2057

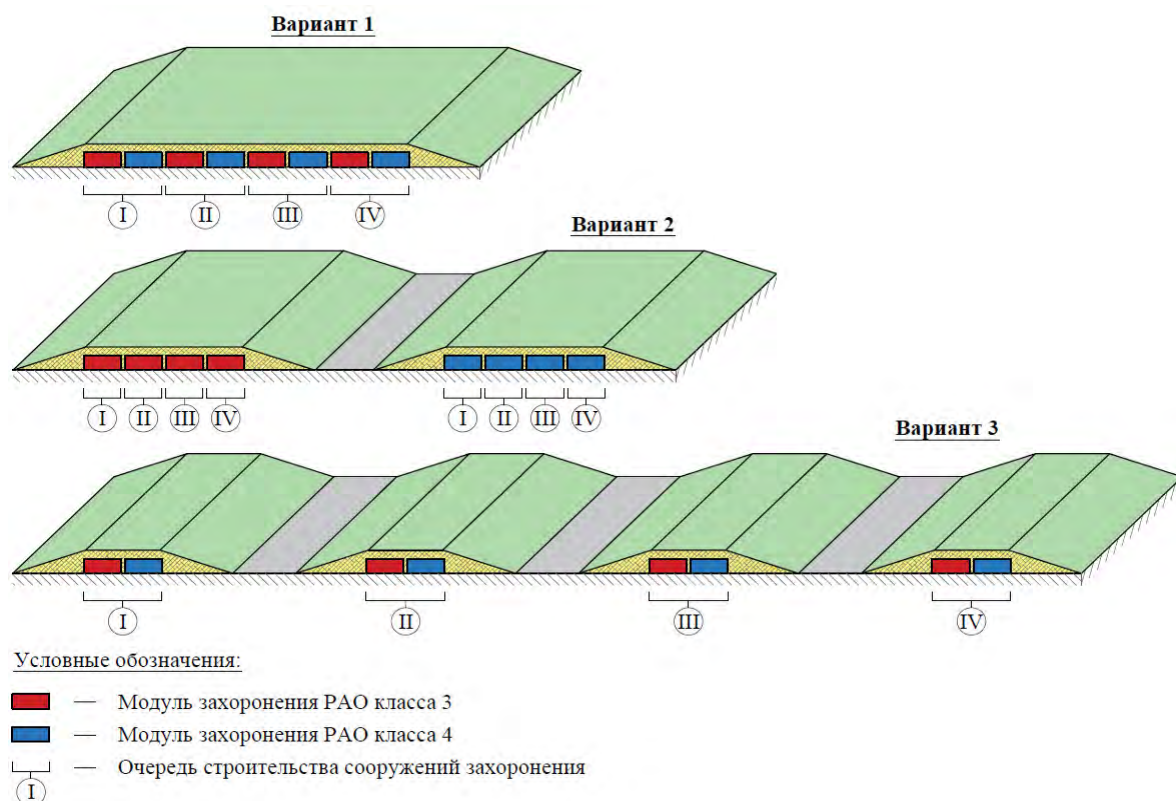


Рисунок 3.7 – Варианты конфигурации покрывающего экрана для перспективного типового ППЗРО

Диаграмма зависимости объёмов покрывающего экрана от вариантов его конфигурации и вместимости сооружений захоронения представлена на рисунке 3.8.

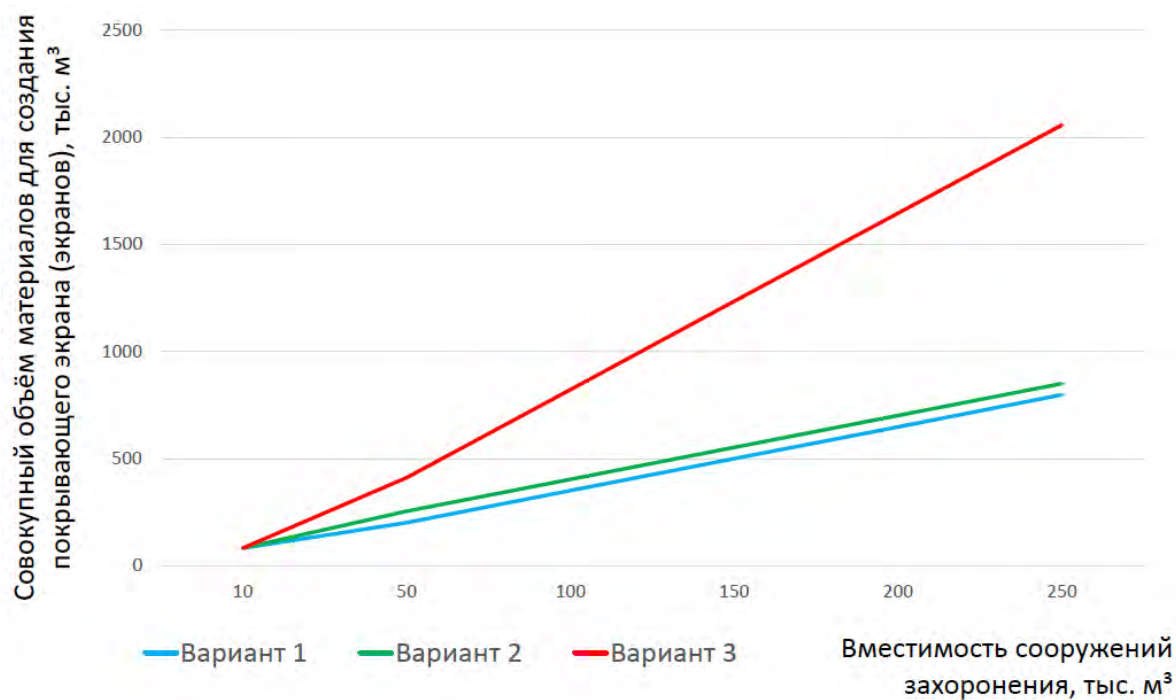


Рисунок 3.8 – Зависимость объёмов покрывающего экрана от вариантов его конфигурации и вместимости сооружений захоронения

Как видно из таблицы 3.5 и рисунка 3.8 вариант с созданием покрывающего экрана над каждой очередью захоронения характеризуется большими расходами материалов на его реализацию, нарастающими с увеличением вместимости сооружений захоронения. Варианты 1 и 2 сопоставимы по расходам материалов, для вместимости 225 тыс. м³ данные варианты примерно соответствуют объёму покрывающего экрана ППЗРО в Челябинской обл. (770 тыс. м³). В целях экономии площади для размещения сооружений захоронения рекомендуется вариант 1 (создание единого покрывающего экрана для всех очередей строительства модулей захоронения).

Функции покрывающих экранов для всех вариантов одинаковы, поэтому конструкция экрана имеет для всех вариантов одно исполнение (рисунок 3.9.).

За основу конструкции покрывающего экрана принята модель экрана ППЗРО El Cabril (рисунок 1.11 главы 1). Уклон ППЗРО EL Cabril составляет 40% (1:2,5), толщина слоёв экрана над ограждающими конструкциями 2,95 м. Для перспективного ППЗРО увеличены толщины слоёв (до 4,8 м) с учётом промерзания экрана в зимний период в российском климате, а также уменьшен уклон до 33,3% (1:3) для снижения влияния эрозионных процессов. Примыкание слоёв к подстилающему экрану приведено на рисунке 3.11 раздела 3.5.

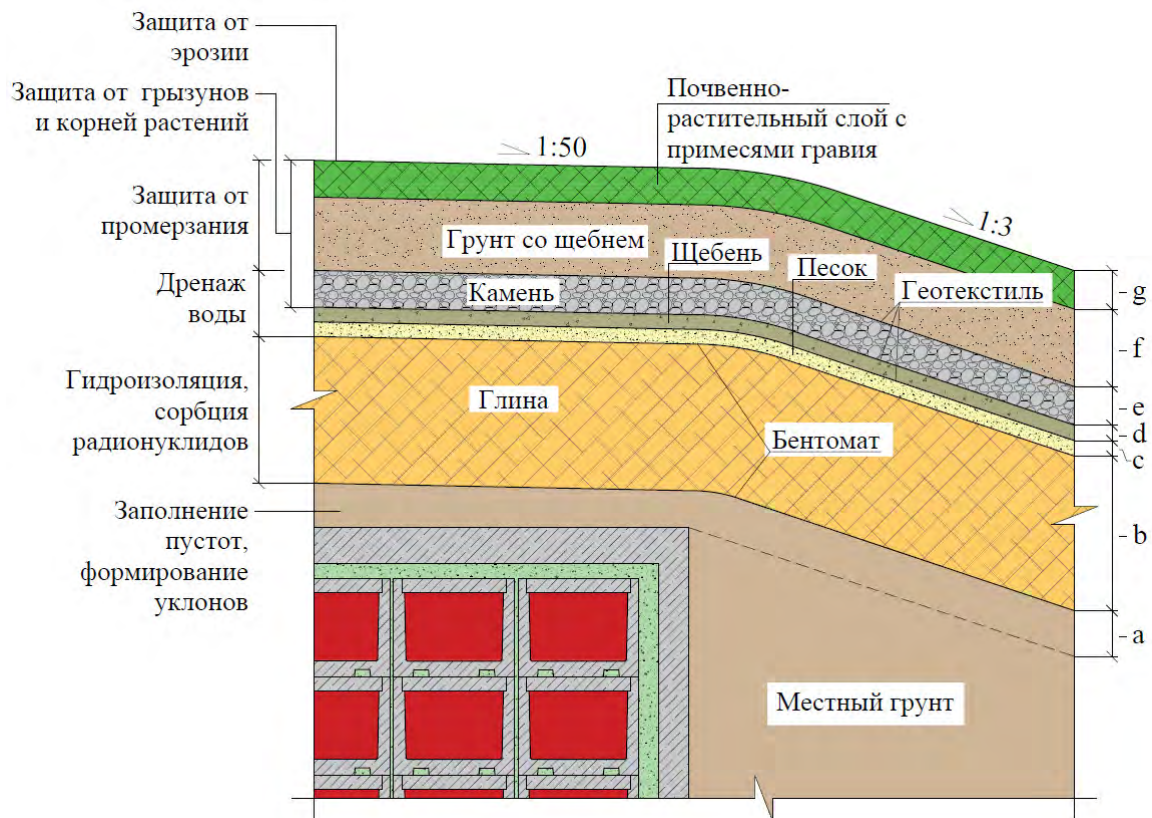


Рисунок 3.9 – Конструкция покрывающего экрана для перспективного типового ППЗРО (a – 300 мм, b – 2000 мм, c – 200 мм, d – 200 мм, e – 500 мм, f – 1000 мм, g – 600 мм)

Состав и характеристики покрывающего экрана приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Характеристики покрывающего экрана перспективного типового ППЗРО

Обозначение	Слой	Назначение	Характеристики
a	Слой местного грунта извлеченного при строительстве ППЗРО	Заполнение пустот между модулями захоронения. Формирование уклона для укладки вышележащих слоёв	Толщина слоя от 300 мм (в верхней части экрана) до 8000 мм (у модулей захоронения) Плотность – не менее 1,2 т/м ³ Срок службы не ограничен.
b	Слой глины	Препятствие попаданию воды к отсекам захоронения. Сорбция радионуклидов, выходящих из модулей захоронения после деградации железобетонных конструкций отсеков и контейнеров	Толщина слоя 2000 мм Плотность – 2,0÷2,6 т/м ³ Коэффициент фильтрации – $10^{-10} \div 10^{-11}$ м/с ($8,7 \cdot 10^{-6} \div 8,7 \cdot 10^{-7}$ м/сут) Коэффициент диффузии по ¹³⁷ Cs – $10^{-8} \div 10^{-7}$ м ² /с Коэффициент распределения по ¹³⁷ Cs – $10^2 \div 10^4$ см ³ /г Катионообменная емкость – 0,8-1,5 мг-экв./г Модуль упругости – 20-110 МПа Срок службы не ограничен
c	Слой песка	Подушка для укладки слоя щебня. Дренаж воды, поступающей через верхние слои.	Толщина слоя 200 мм Песок по ГОСТ 8736-2014, 1 класса, средней крупности, фракция 0,63-1,25 мм. Плотность – не менее 1,2 т/м ³ Коэффициент фильтрации – $10^{-3} \div 10^{-4}$ м/с ($8,7 \div 87$ м/сут) Срок службы не ограничен.
d	Слой щебня	Дренаж воды, поступающей через верхние слои. Препятствие капиллярному поднятию влаги.	Толщина слоя 200 мм Щебень по ГОСТ 8267-93 фракции 20-40 мм. Марка щебня по дробимости – 800. Плотность – не менее 1,4 т/м ³ Коэффициент фильтрации – $1,16 \cdot 10^{-3} \div 2,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (100÷200 м/сут) Срок службы не ограничен.
e	Слой камня крупной фракции	Защита от проникновения грызунов и корней растений. Дренаж воды, поступающей через верхние слои. Препятствие капиллярному поднятию влаги.	Толщина слоя 500 мм Фракция 100-150 мм. Плотность – не менее 1,4 т/м ³ Предел прочности – 20-40 МПа Коэффициент фильтрации – $2,3 \cdot 10^{-3} \div 3,5 \cdot 10^{-3}$ м/с (200÷300 м/сут) Срок службы не ограничен.
f	Слой местного грунта со щебнем	Препятствие промерзанию нижележащих слоев, защита нижележащих слоев от проникновения корней растений, грызу-	Толщина слоя 1000 мм Плотность – не менее 1,4 т/м ³ Щебень по ГОСТ 8267-93 фракции 20-40 мм. Марка щебня по дробимости – 800. Доля щебня в грунте – 30-50 %

Обозначение	Слой	Назначение	Характеристики
		нов.	Срок службы не ограничен.
g	Травяной покров и плодородный слой	Создание растительного травяного слоя, устойчивого к эрозии, препятствующего росту кустарников и деревьев. Препятствие промерзанию нижележащих слоев.	Толщина слоя 300 мм Доля гравия в грунте – 30-50 % Срок службы не ограничен при условии обслуживания
Примечания: 1) между слоями с насыпными материалами различной фракции укладываются рулонные материалы типа геотекстиля – для обеспечения ровной укладки слоев и препятствию проникновения фракций друг в друга. Над и под слоем глины возможна укладка дополнительной гидроизоляции типа бентоматов. Перед возведением слоёв из сыпучих материалов типа щебня укладывается слой георешетки, препятствующей осыпания фракции по склонам. 2) Информация по коэффициентам распределения, диффузии, катионообменной ёмкости для глин приведена по данным [207]			

3.5 Подстилающий экран ППЗРО

Задача выбора технических решений по конструкции подстилающего экрана связана с решениями по отводу возможных протечек из модулей захоронения. Практика применения систем отвода протечек на основе инспекционных галерей, требующих обслуживания, а также так называемых пассивных систем отвода протечек, пропускающих воду через слой природного сорбента описана в главе 1.

С учётом сроков активного контроля перспективного ППЗРО, определённых в главе 2 (около 300 лет в случае захоронения РАО с начальной удельной активностью порядка $5 \cdot 10^7$ Бк/кг), использование инспекционных галерей не представляется целесообразным решением – на такой период невозможно обеспечить работоспособность инженерных систем, входящих в состав инспекционных галерей, для них потребуется проведение реконструкций и задача окончательной изоляции РАО фактически будет представлять собой длительное контролируемое хранение.

По этой причине при разработке облика перспективного типового ППЗРО выбрано решение с отводом возможных протечек посредством применения модулей захоронения с основанием из влагонепроницаемого бетона и природных сорбентов в основе конструкции подстилающего экрана, позволяющих отводить возможные протечки в нижележащие грунты и сорбировать при этом радионуклиды.

Вопрос применения сорбентов в составе подстилающего экрана поднимался в публикации [62], где были рассмотрены примеры использования природных сорбентов в пунктах захоронения в Швеции, Канаде, Болгарии.

В Болгарии, например, в основе подстилающего экрана используется слой на основе местных вмещающих пород, обладающих сорбционными свойствами. Сорбирующий слой состоит из выбранных почв участка (т.е. лёссовых пород, обнаруженных на участке), смешанных с добавкой 5 % цемента. Вместе эти компоненты действуют как сорбционный барьер для замедления миграции радионуклидов, растворенных в воде, протекающей через дно сооружений захоронения. Для болгарского ППЗРО выполнялись расчеты миграции радионуклидов, по результатам которых была отмечена эффективность работы лёссового сорбционного подстилающего экрана. На рисунке 3.10 показаны данные по поступлению радионуклидов (на примере долгоживущего C^{14}), высвобождающихся из железобетонных сооружений захоронения в лёссово-цементный слой (красная линия) и из лёссово-цементного слоя в нижележащие слои песка (синяя линия).

Поскольку сорбционная способность лёссово-цементного материала довольно высока, значительное замедление выхода радионуклидов может наблюдаться порядка сотен или даже тысяч лет [93].

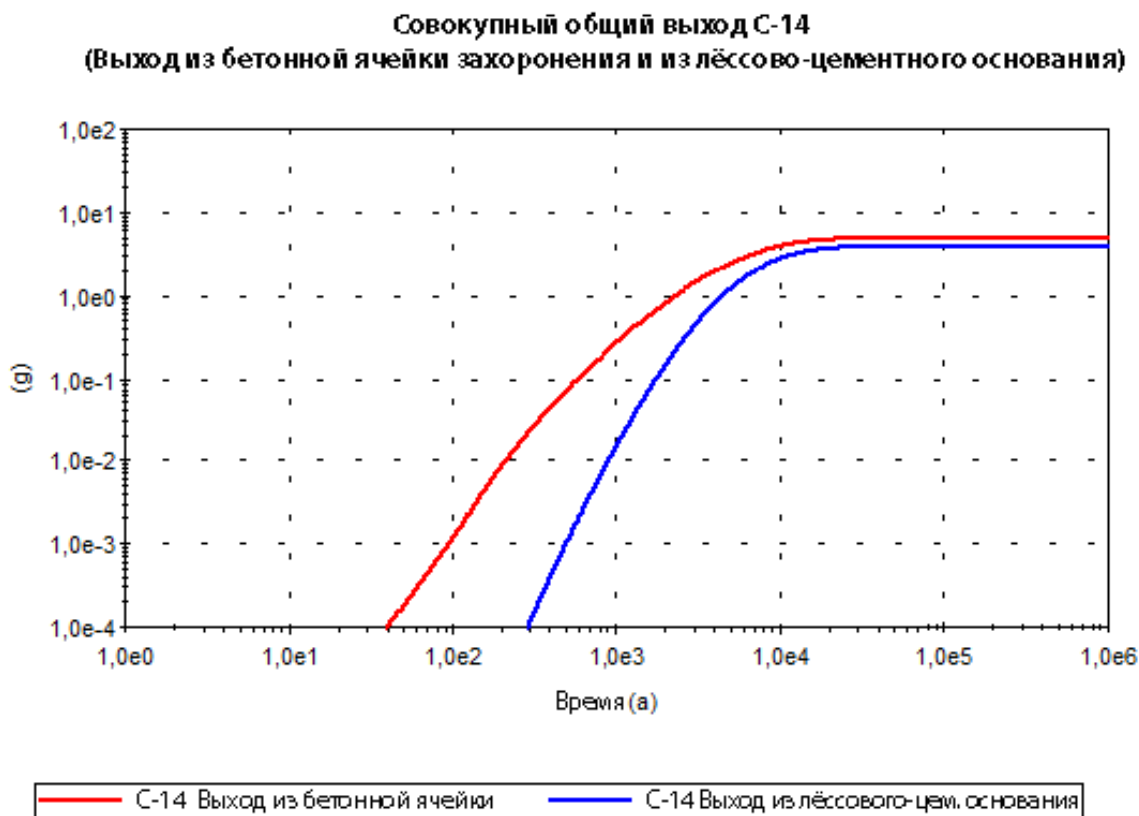


Рисунок 3.10 – Данные по замедлению радионуклида C^{14} в слое природного сорбента ППЗРО для РАО АЭС Козлодуй [93]

Поскольку разработка облика перспективного типового ППЗРО осуществляется без привязки к конкретной площадке размещения, данных о наличии на участке захоронения вмещающих пород, способных сорбировать радионуклиды, также нет. В связи с этим для подстилающего экрана рассмотрено применение широко распространённых цеолитовых сорбентов: клинфиллита или трепела, которые могут быть привезены на площадку строительства ППЗРО из других регионов.

Помимо задачи отвода воды и сорбции радионуклидов на подстилающий экран возлагаются функции восприятия нагрузок от модулей захоронения и покрывающего экрана, а также препятствия капиллярному поднятию влаги, для чего в составе подстилающего экрана предусматриваются слои из песка и щебня. Конструкция подстилающего экрана приведена на рисунке 3.11.

Во избежание накопления воды в подстилающем экране на этапе эксплуатации ППЗРО по периметру сооружений захоронения выполняется система дренажа поверхностных стоков и границы подстилающего экрана на этапе эксплуатации и этапе закрытия ППЗРО разные. На этапе эксплуатации ППЗРО площадь подстилающего экрана соответствует площади под модулями захоронения, по периметру подстилающего экрана организуется дренажная система производственно-дождевой канализации (рисунок 3.12), в которую стекают поверхностные стоки по дренажным канавкам в бетонном покрытии над подстилающим экраном. На этапе закрытия ППЗРО объекты инфраструктуры, используемые на этапе эксплуатации, разбираются, по периметру модулей захоронения досыпается слой сорбента, расширяя границы подстилающего экрана.

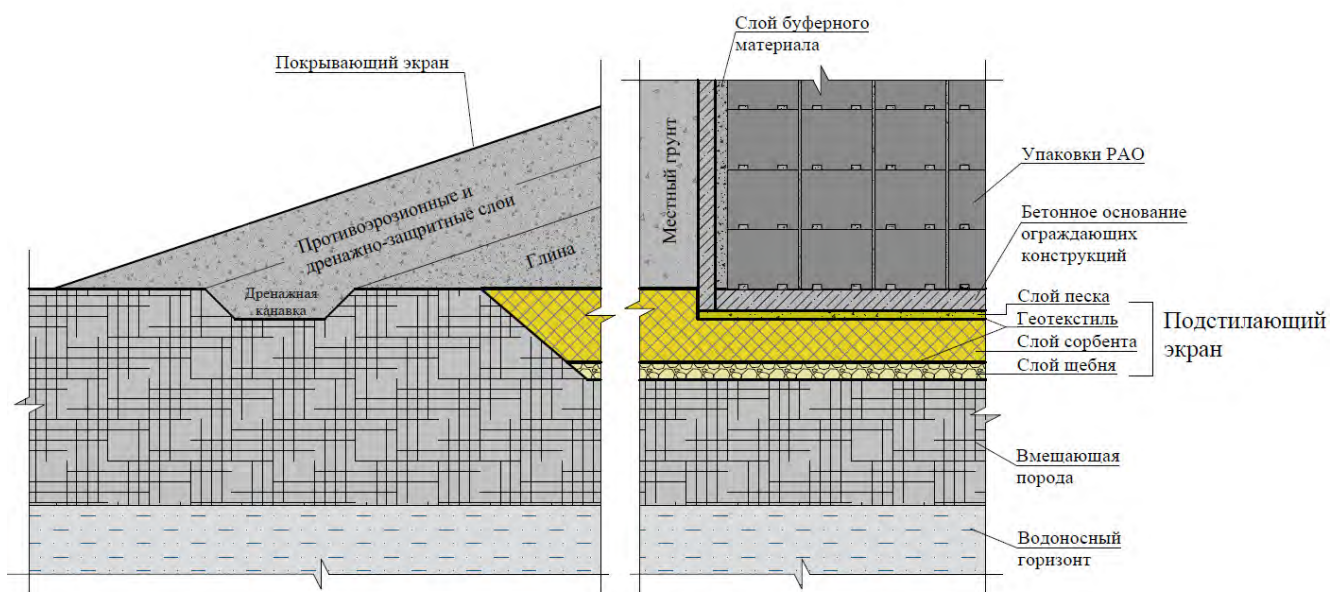


Рисунок 3.11 – Конструкция подстилающего экрана перспективного типового ППЗРО

Во избежание накопления воды в подстилающем экране на этапе эксплуатации ППЗРО по периметру сооружений захоронения выполняется система дренажа поверхностных стоков и границы подстилающего экрана на этапе эксплуатации и этапе закрытия ППЗРО разные. На этапе эксплуатации ППЗРО площадь подстилающего экрана соответствует площади под модулями захоронения, по периметру подстилающего экрана организуется дренажная система производственно-дождевой канализации (рисунок 3.12), в которую стекают поверхностные стоки по дренажным канавкам в бетонном покрытии над подстилающим экраном. На этапе закрытия ППЗРО объекты инфраструктуры, используемые на этапе эксплуатации, разбираются, по периметру модулей захоронения досыпается слой сорбента, расширяя границы подстилающего экрана.

На этапе закрытия ППЗРО границы подстилающего экрана должны перекрывать глиняный гидроизоляционно-сорбционный слой покрывающего экрана, но не доходить до дренажных слоёв (рисунок 3.11) во избежание попадания в сорбент вод поверхностных стоков, которые могут приводить к развитию процессов колюматации сорбента. Толщина слоя сорбирующего материала определяется при проектировании. Для оценок безопасности, выполненных в главе 4, толщина сорбирующего слоя принята 1500 мм.

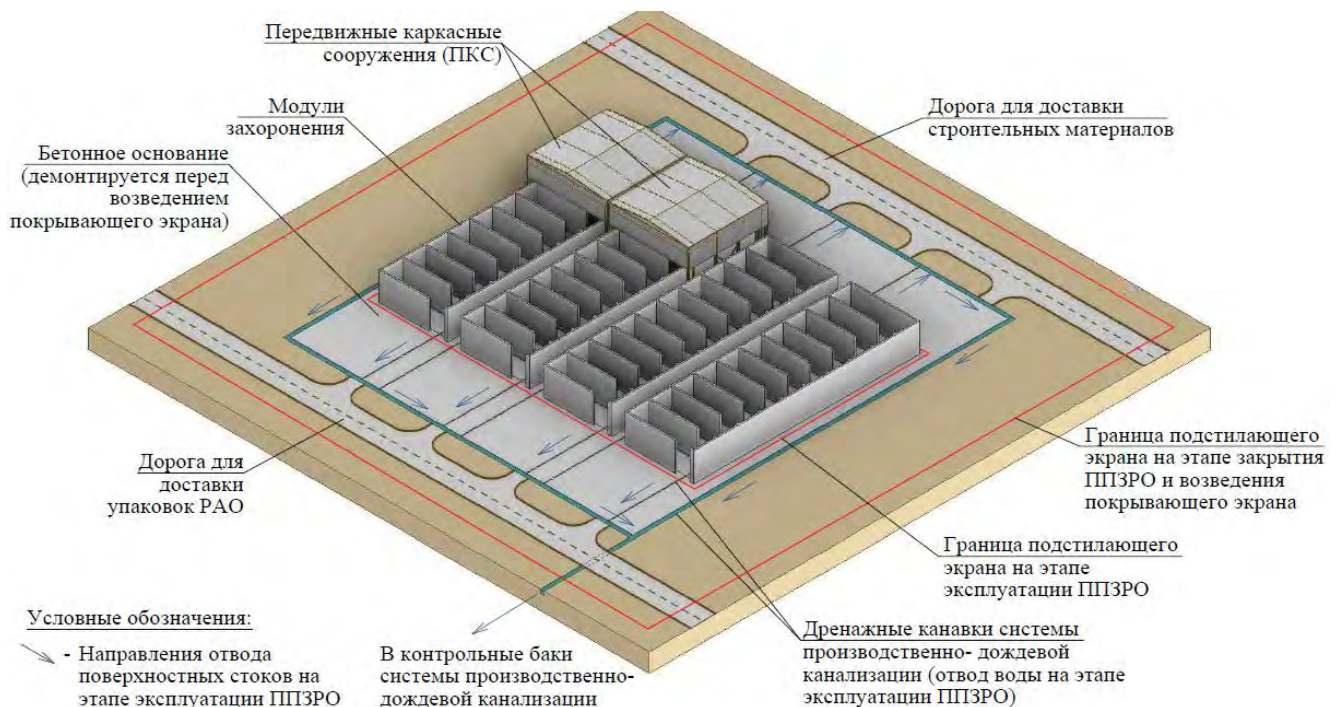


Рисунок 3.12 – Границы подстилающего экрана на различных этапах эксплуатации ППЗРО (условно показаны границы для четырёх модулей захоронения)

Состав и характеристики подстилающего экрана приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Характеристики подстилающего экрана перспективного типового ППЗРО

№ п/п	Слой	Назначение	Характеристики
1	Слой песка	Песчаная подушка для возведения основания ограждающих конструкций. Фильтрация воды	Толщина слоя 300 мм Песок по ГОСТ 8736-2014, 1 класса, средней крупности, фракция 0,63-1,25 мм. Плотность – не менее 1,2 т/м ³ Коэффициент фильтрации – $10^{-3} \div 10^{-4}$ м/с (8,7÷87 м/сут) Срок службы не ограничен.
2	Слой клиноптилолита	Сорбция радионуклидов, выходящих из модулей захоронения после деградации железобетонных конструкций отсеков и контейнеров. Дренаж возможных протечек.	Толщина слоя 1500 мм Плотность – 1,5÷2,0 т/м ³ Коэффициент фильтрации – $10^{-6} \div 0,5 \cdot 10^{-7}$ м/с (8,7·10 ⁻² ÷4,3·10 ⁻³ м/сут) Коэффициент диффузии по ¹³⁷ Cs – $10^{-8} \div 10^{-7}$ м ² /с Коэффициент распределения по ¹³⁷ Cs – $10^2 \div 10^4$ см ³ /г Катионообменная емкость – 0,5-1,6 мг-экв./г Модуль упругости – 20-110 МПа Срок службы не ограничен
3	Щебень	Препятствие капиллярному поднятию влаги. Дренаж возможных протечек.	Толщина слоя 300 мм Щебень по ГОСТ 8267-93 фракции 20-40 мм. Марка щебня по дробимости – 800. Коэффициент фильтрации – 100-200 м/сут. Плотность – не менее 1,4 т/м ³ Предел прочности – 20-40 МПа Срок службы не ограничен.
Примечания: 1) между слоями с насыпными материалами различной фракции укладываются рулонные материалы типа геотекстиля – для обеспечения ровной укладки слоев и препятствию проникновения фракций друг в друга. 2) Информация по коэффициентам распределения, диффузии, катионообменной ёмкости для клиноптилолита приведена по данным [204, 205]			

3.6 Буферные материалы ППЗРО

Согласно матрице технических решений, представленной на рисунке 2.1, для выбора буферных материалов возможны три принципиальных решения на основе применения:

- сыпучих материалов, обладающих гидроизоляционными свойствами (глины различного минералогического состава и смеси на их основе);
- сыпучих материалов, обладающих фильтрационными свойствами (песок, гравий);
- отверждаемых текучих смесей (смеси на основе цемента с различными добавками и наполнителями, тиксотропные шликеры).

Достоинства и недостатки каждого варианта приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Достоинства и недостатки различных решений по выбору буферных материалов

№ п/п	Решение по выбору буферных материалов	Примеры материалов	Достоинства	Недостатки
1	Сыпучие материалы, обладающие гидроизоляционными свойствами	– Бентонит – Каолин	– Возможность сорбирования радионуклидов – Возможность заполнения пустот при гидратации (для бентонитов) – Возможность залечивания трещин и неплотностей – Неограниченный срок службы	– Создание давления на упаковки и ограждающие конструкции вследствие распухания при гидратации (особенно для бентонитовых глин) – Жесткие требования к минералогическому и химическому составу
2	Сыпучие материалы, обладающие фильтрационными свойствами	– Песок – Гравий – Щебень	– Низкая стоимость и доступность материалов – Не жесткие требования к составу и гранулометрическим характеристикам – Химическая нейтральность материалов – Неограниченный срок службы	– Отсутствие сорбирующих свойств – Возможность проседания со временем – Уязвимость к процессам коагуляции – Для крупных фракций материалов – наличие воздушных пустот между гранулами, способствующих развитию аэробной коррозии стальных упаковок
3	Отверждаемые и тиксотропные текучие смеси	– Алюминатный бетон – Тиксотропный шликер	– Хорошие проникающие свойства – Возможность заполнения пустот в труднодоступных местах	– Жесткие требования к составу смесей – Уязвимость качества отвержденной фракции к условиям проведения работ – Компромиссные гидроизоляционные качества (трещины и зазоры за счёт плохой адгезии к поверхностям пропускают воду, при этом сам отвержденный материал имеет низкий коэффициент фильтрации) – Ограниченный срок службы

Согласно НП-069-14 [26] (п. 18) буферные материалы в зависимости от выполняемых ими функций должны обладать:

- для ограничения доступа воды к упаковкам РАО – низкой гидравлической проницаемостью;
- для минимизации времени контакта с атмосферными осадками и (или) подземными водами – высокой гидравлической проницаемостью.

Применительно к облику сооружений захоронения перспективного типового ППЗРО функции у буферных материалов, заполняющих пустоты в модулях захоронения РАО класса 3 и РАО класса 4, имеют отличия. Для наземного ППЗРО причиной поступления воды к упаковкам РАО являются атмосферные осадки, проникающие в сооружения захоронения в случае разрушения или деградации ограждающих конструкций и гидроизоляционных слоёв покрывающего экрана. Сценарии наполнения водой сооружений захоронения РАО класса 4 и РАО класса 3 для вариантов с различной гидравлической проницаемостью буферных материалов представлены на рисунках 3.13 и 3.14.

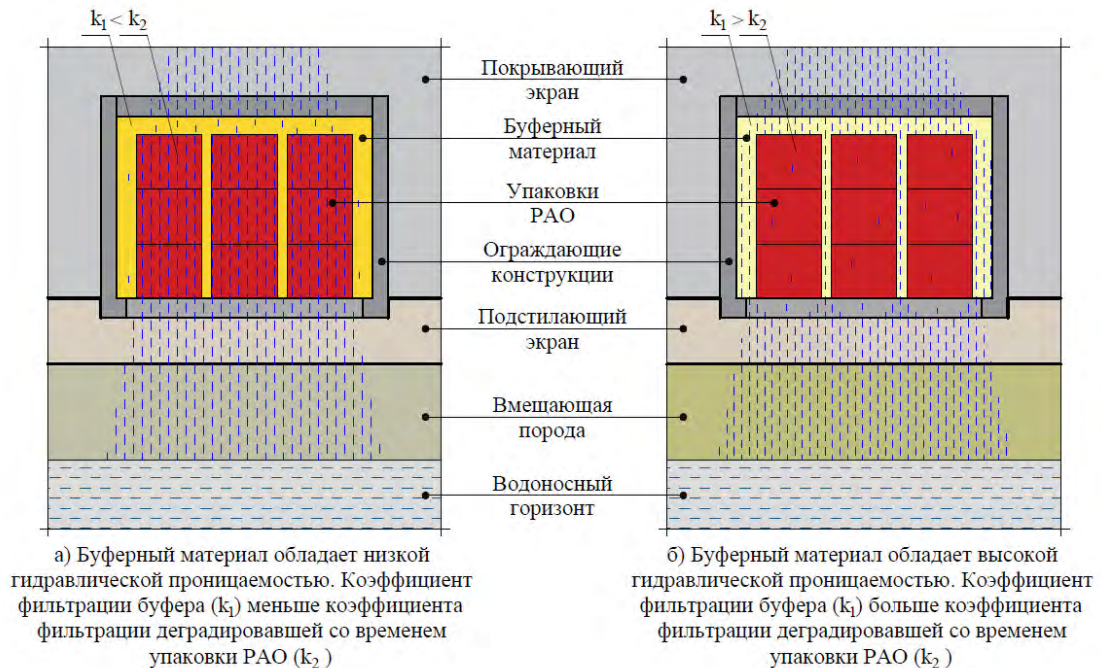


Рисунок 3.13 – Сценарий (упрощённая модель) наполнения водой ограждающих конструкций захоронения РАО класса 4 для вариантов с различной гидравлической проницаемостью буферных материалов.

Упаковки РАО класса 3 характеризуются большими сроками сохранения изолирующей способности. В разделе 2.2 отмечалось, что железобетонные контейнеры типа НЗК обладают более высокой изолирующей способностью и долговечностью, чем железобетонные ограждающие конструкции. При поступлении воды внутрь ограждающих конструкций гидравлическая проницаемость самих ограждающих конструкций будет выше, чем упаковок РАО класса 3. В данном случае буферный материал с низкой гидравлической проницаемостью (малым коэффи-

циентом фильтрации) будет способствовать направлению потока воды в зоны с более высокой гидравлической проводимостью – т.е. к стенкам ограждающих конструкций. В связи с этим для сооружений захоронения РАО класса 3 целесообразно использовать буферные материалы с низкой гидравлической проводимостью (вариант «а» на рисунке 3.13), например, бентонит. Возможен также вариант с применением отверждаемых цементных смесей с образованием бетона с высокими показателями влагонепроницаемости (на уровне W16÷W20 по ГОСТ 12730.5-2018 [200]).

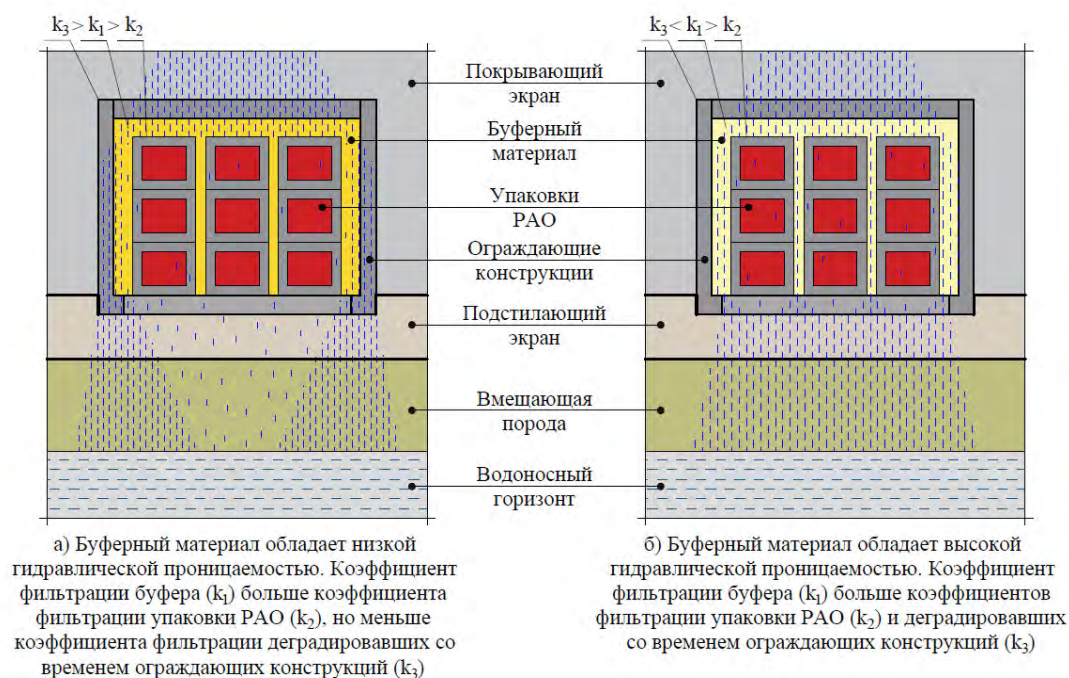


Рисунок 3.14 – Сценарий (упрощенная модель) наполнения водой ограждающих конструкций захоронения РАО класса 3 для вариантов с различной гидравлической проницаемостью буферных материалов.

Для облика перспективного типового ППЗРО приняты буферные материалы, представленные в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Буферные материалы для РАО классов 3, 4 и их характеристики

№ п/п	Класс РАО	Материал для заполнения пустот между упаковками	Характеристики
1	Класс 4	Бетон	Толщина слоя от 50 до 500 мм Плотность – не менее 1,8 т/м ³ Коэффициент фильтрации – $10^{-9} \div 10^{-10}$ м/с ($8,7 \cdot 10^{-5} \div 8,7 \cdot 10^{-6}$ м/сут) Пористость – до 15 % Паропроницаемость – 0,02-004 мг/(м·ч·Па) Показатели текучести: растекаемость Р5-Р6 по ГОСТ 7473-2010 Срок службы не менее 100 лет

№ п/п	Класс РАО	Материал для заполнения пу- стот между упаковками	Характеристики
2	Класс 3	Бентонит (бен- тонитовая крупка)	Толщина слоя от 50 до 500 мм Плотность насыпная – 1,0÷1,2 т/м ³ Пористость – до 40 % Паропроницаемость – 0,04-006 мг/(м·ч·Па) Показатели текучести: угол естественного откоса - 20° Коэффициент фильтрации – 10 ⁻⁸ ÷10 ⁻⁶ м/сут Коэффициент диффузии по ¹³⁷ Cs – 10 ⁻⁸ ÷10 ⁻⁷ м ² /с Коэффициент распределения по ¹³⁷ Cs – 10 ⁻⁸ ÷10 ⁻⁷ м ³ /кг Сорбционная емкость – 0,8-1,5 мг/г Давления набухания – до 5 МПа Срок службы не ограничен

Выводы к главе 3

В основу облика перспективного ППЗРО положены принципиальные решения, представленные в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Принципиальные решения, положенные в основу облика перспективного ППЗРО

№ п/п	Решение	Обоснование
1	Наземное размещение сооружений захоронения	Тенденции на применение наземных сооружений в технологиях приповерхностного захоронения РАО, выявленные в главе 1. Возможность применения решений на площадках с высоким уровнем грунтовых вод. Возможность организации самотечной системы дренажа атмосферных осадков.
2	Использование ограждающих конструкций для упаковок РАО класса 3 и РАО класса 4 с разными требованиями к срокам службы и выполняемым функциям	Возможность сократить затраты на создание ограждающих конструкций и буферных материалов для РАО класса 4. Результаты анализа долговечности и функций ИББ для РАО класса 3 и РАО класса 4, выполненного в разделе 2.2.
3	Создание нового контейнерного парка для РАО класса 4 на основе полимерных и композитных контейнеров.	Необходимость приведения в соответствие уровня затрат на контейнеры для захоронения РАО класса 4 функциям выполняемым упаковками РАО класса 4, результаты анализа декомпозиции стоимости ИББ, выполненного в разделе 2.4.
4	Компоновка ограждающих конструкций для РАО класса 3 и РАО класса 4 под единым покрывающим экраном.	Уменьшение затрат на создание покрывающего экрана с учётом зависимости стоимости покрывающего экрана от компоновки ограждающих конструкций, установленных в разделах 2.4 и 3.4.

№ п/п	Решение	Обоснование
5	Создание основания ограждающих конструкций и подстилающего экрана из материалов с коэффициентами фильтрации, исключающими накопление воды в массиве упаковок РАО. Применение природных сорбентов в основе подстилающего экрана, препятствующих выходу радионуклидов, выносимых с водой в случае протечек.	Результаты анализа различных решений в части отвода воды из сооружений захоронения, выполненных в главе 1. Возможность обеспечить отвод протечек пассивными способами (без использования инженерных систем, требующих контроля, ремонта и обслуживания) и обеспечить удержание радионуклидов.
6	Применение буферных материалов с низкой гидравлической проницаемостью для упаковок РАО класса 3 и буферных материалов с высокой гидравлической проницаемостью для упаковок РАО класса 4.	Результаты выполненного в разделе 3.6 анализа сценариев обводнения упаковок, пустоты между которыми засыпаны различными буферными материалами.

Облик перспективного ППЗРО создан исходя из задачи разработки наиболее универсальных решений, которые могут стать тиражируемыми и использоваться на различных площадках захоронения РАО. В качестве исходных данных для разработки технических решений по сооружениям захоронения использованы характеристики РАО классов 3 и 4 АЭС с реактором ВВЭР-1200.

Оценки принятых вариантов технических решений, на основе которых разработан облик перспективного ППЗРО (оценки безопасности, экономические оценки), представлены в главе 4.

4 ОЦЕНКИ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ВЫБОРУ СПОСОБОВ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО

В настоящей главе для перспективного типового ППЗРО приведены результаты оценок безопасности, выполненных в рамках научно-исследовательских работ по захоронению РАО в Республике Беларусь (работы, выполненные с участием автора в 2016-2024 гг. по заказу Государственного научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси) и в рамках концептуального проекта ПЗРО для стран-потребителей услуг СБЯТЦ (работы выполненные с участием автора в 2021-2023 гг. по заказу АО «Техснабэкспорт»), а также рассчитан экономический эффект от реализации технических решений по приповерхностному захоронению РАО, предложенных в главе 3.

Оценки безопасности основываются на расчётах, реализованных в рамках разработки концептуального проекта ПЗРО для стран-потребителей услуг СБЯТЦ [189], в рамках НИР по созданию ППЗРО в Республике Беларусь [173, 208], в которых с участием автора настоящего диссертационного исследования разработаны принципиальные технологические решения по захоронению РАО.

По расчётным моделям автора выполнены оценки воздействия на персонал и население при эксплуатации ППЗРО, а также оценки устойчивости ограждающих конструкций к внешним воздействиям в период эксплуатации ППЗРО для РАО Белорусской АЭС. Поскольку период эксплуатации ППЗРО составляет несколько десятков лет и для выбранного способа захоронения РАО ограждающие конструкции не закрыты покрывающим экраном, вопрос устойчивости ограждающих конструкций к внешним воздействиям особенно актуален.

В рамках разработки концептуального проекта ПЗРО для стран-потребителей услуг СБЯТЦ принципиальные технологические решения по захоронению РАО классов 3 и 4 прошли оценку в части воздействия системы захоронения РАО классов 3 и 4 на население и окружающую среду, обусловленного выходом радионуклидов, содержащихся в захороненных РАО, и их потенциальным распространением за пределы барьеров безопасности ППЗРО после его закрытия. Данная оценка выполнена без участия автора, но подтверждает безопасность предложенных автором технологических решений по захоронению РАО классов 3 и 4*, результаты оценок, докладывались на заседании секции № 1 «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС № 10 «Экология и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом» [209].

* Оценка долговременной безопасности выполнена на стадии научно-исследовательских работ без конкретной привязки к площадке размещения ППЗРО и является предварительной. Окончательное подтверждение долговременной безопасности должно выполняться при проектировании.

Для оценок безопасности принята вместимость ППЗРО около 40 тыс. м³ упаковок РАО классов 3 и 4 (4 очереди строительства сооружений захоронения), позволяющая захоронить РАО от эксплуатации и вывода из эксплуатации АЭС с двумя энергоблоками ВВЭР-1200.

Экономические оценки перспективного типового ППЗРО выполнены в сравнении с заглублённым ППЗРО в Челябинской обл. (г. Озёрск) и основываются на расчётах капитальных затрат на строительство сооружений захоронения, затрат на создание упаковок кондиционированных РАО классов 3 и 4, на засыпку установленных в сооружения захоронения упаковок буферными материалами и затрат на создание покрывающего экрана на этапе закрытия ППЗРО.

4.1 Результаты оценок безопасности ППЗРО

Предложения по конструкции наземных сооружений захоронения, разработанные в разделе 3 настоящей работы, во многом за основу принимают международный опыт окончательной изоляции РАО. В этой связи размещение низко- и среднеактивных РАО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов в наземных сооружениях захоронения можно считать принципиально возможным с учётом того, что долговременная и эксплуатационная безопасность зарубежных аналогичных наземных ППЗРО (таких как El Cabril, CSA и др.) обоснована. Представляет научно-технический интерес оценка безопасности разработанных предложений по способу захоронения РАО классов 3 и 4 в части отличий от зарубежных аналогов (например, в конструкции подстилающего экрана) и применительно к российской нормативной базе, а также нормативной базе Республики Беларусь (применительно к предложениям по захоронению РАО Белорусской АЭС). В настоящем разделе приведены результаты оценок безопасности, выполненные по исходным данным автора или непосредственно с его участием, касающиеся:

- оценок эксплуатационной безопасности ППЗРО – дозовых воздействий на персонал и население в период загрузки упаковок РАО в ППЗРО для Белорусской АЭС;
- оценки устойчивости сооружений захоронения к внешним воздействиям с учётом требований российских норм и правил по учёту внешних воздействий природного и техногенного происхождения;
- оценки миграции радионуклидов через слой природного сорбента в подстилающем экране ППЗРО;
- оценки влияния пустот в упаковках РАО на проседание покрывающего экрана.

Эксплуатационный период начинается с момента первоначального поступления отходов в ППЗРО и завершается работами по подготовке ППЗРО к закрытию. Применительно к задаче захоронения РАО в Республике Беларусь, ППЗРО рассчитан на поступление РАО в течение пе-

риода эксплуатации Белорусской АЭС (около 60 лет), а также в процессе ВЭ Белорусской АЭС (не менее 30 лет). Таким образом период эксплуатации ППЗРО составляет около 90 лет.

С момента поступления упаковок РАО в ППЗРО, может происходить радиационное облучение в результате деятельности по обращению с отходами, и это облучение подпадает под действие контроля в соответствии с требованиями по защите людей от вредного радиационного воздействия. В течение эксплуатационного периода производятся работы по размещению упаковок РАО в сооружениях захоронения и по мере заполнения модули консервируются. Под законсервированным подразумевается модуль, заполненный упаковками РАО и буферными материалами, в котором забетонированы перекрытия модулей захоронения, при необходимости нанесены гидроизоляционные покрытия, обеспечивающие сохранность железобетонных конструкций до этапа возведения покрывающего экрана.

Обоснование безопасности ППЗРО на этапе эксплуатации сооружений захоронения выполнялось для ППЗРО Республики Беларусь [208] по результатам:

- оценки дозовых воздействий на персонал при проведении операций по обращению с упаковками РАО классов 3 и 4 при нормальной эксплуатации ППЗРО;
- оценки дозовых воздействий на персонал и население при нарушениях нормальной эксплуатации и авариях в ППЗРО.

Для обеспечения безопасности на этапе эксплуатации ППЗРО при авариях, связанных с внешними воздействиями, важны защитные свойства законсервированных модулей захоронения. Для предложенной в разделе 3.3 настоящей диссертационной работы конструкции модулей захоронения выполнены оценки устойчивости к внешним воздействиям.

4.1.1 Оценки дозовых воздействий на персонал при проведении операций по обращению с упаковками РАО классов 3 и 4 при нормальной эксплуатации ППЗРО

Критериями и показателями безопасности, учитываемыми при проведении оценки эксплуатационной безопасности, служат непревышения воздействий на человека, установленных федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии и санитарными нормами.

Количественные значения критериев радиационной безопасности ППЗРО, положенные в основу выполненных оценок в рамках НИР по выбору способа захоронения РАО в Республике Беларусь [173, 208], представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Критерии для оценок эксплуатационной безопасности ППЗРО

Наименование критерия	Критерии безопасности	Проектные пределы
Основной ПД (эффективная доза) для персонала	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год*	Для персонала установлена годовая доза - 20 мЗв/год
Основной ПД (эффективная доза) для лиц из населения	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год *	Для лиц из населения установлена годовая доза - 1 мЗв/год.
Мощность дозы в помещениях постоянного пребывания персонала	6 мкЗв/ч – из расчёта 20 мЗв/год и суммарного времени работы 1700 ч*	6 мкЗв/ч – из расчёта 20 мЗв/год и суммарного времени работы 1700 ч *
Мощность дозы внешнего излучения в помещениях временного пребывания персонала	12 мкЗв/ч из расчета из расчёта 20 мЗв/год и суммарного времени работы 850 ч*	12 мкЗв/ч из расчета из расчёта 20 мЗв/год и суммарного времени работы 850 ч*; 2 мЗв/ч - на поверхности упаковок РАО класса 3; 0,3 мЗв/ч – на поверхности упаковок РАО класса 4
Проектная мощность эквивалентной дозы для помещений постоянного пребывания персонала	Проектная мощность эквивалентной дозы для помещений постоянного пребывания персонала – 6 мкЗв/ч*	6 мкЗв/ч
На границе СЗЗ (любые другие помещения и территории)	Проектная мощность эквивалентной дозы для населения 0,06 мкЗв/ч*	0,06 мкЗв/ч
Допустимый уровень загрязнения поверхности кожных покровов, полотенца, спецбелья и т.д.	Снимаемое и неснимаемое загрязнение: - 200 част(β)/(см ² ×мин); - 2 част(α)/(см ² ×мин)*	Снимаемое и неснимаемое загрязнение: - 200 част(β)/(см ² ×мин); - 2 част(α)/(см ² ×мин)*
Допустимый уровень загрязнения поверхности спецодежды, внутренней поверхности дополнительных СИЗ и наружной поверхности спецобуви	Снимаемое и неснимаемое загрязнение: - 2000 част(β)/(см ² ×мин); - 5 част(α)/(см ² ×мин)*	Снимаемое и неснимаемое загрязнение: - 2000 част(β)/(см ² ×мин); - 5 част(α)/(см ² ×мин)*
Допустимое загрязнение поверхностей помещений постоянного пребывания персонала и находящегося в них оборудования	Снимаемое загрязнение: - 2000 част.(β)/(см ² × мин); - 5 част.(α)/(см ² ×мин)*	Снимаемое загрязнение: - 2000 част..(β)/(см ² ×мин); - 5 част.(α)/(см ² ×мин)*

Наименование критерия	Критерии безопасности		Проектные пределы
Допустимое загрязнение поверхностей помещений периодического пребывания персонала и находящегося в них оборудования	Снимаемое загрязнение: - 10000 част.(β)/(см ² ·мин); - 50 част.(α)/(см ² × мин)*		Снимаемое загрязнение: - 10000 част..(β)/(см ² ×мин); - 50 част.(α)/(см ² × мин)*
Допустимая мощность дозы от упаковки РАО	Допустимая мощность дозы на расстоянии 1 м от поверхности упаковки РАО – 0,1 мЗв/ч (Санитарные правила и нормы 2.6.1.13-60-2005)		Допустимая мощность дозы на расстоянии 1 м от поверхности упаковки РАО – 0,1 мЗв/ч
	Допустимая мощность дозы на поверхности упаковки РАО – 2 мЗв/ч (Санитарные правила и нормы 2.6.1.13-60-2005))		Допустимая мощность дозы на поверхности упаковки РАО – 2 мЗв/ч
Допустимое загрязнение наружной поверхности транспортного контейнера	Снимаемое загрязнение: - 100 част. (β)/(см ² · мин); - 1 част(α)/(см ² ·мин). Неснимаемое - 2000 част. (β)/(см ² · мин)*		На наружной поверхности упаковки с РАО при ввозе в ПЗРО: - снимаемое - 100 част. (β) / (см ² × мин); - неснимаемое - 2000 част.(β)/(см ² × мин)
Допустимая объемная активность радионуклидов в воздухе обслуживаемых помещений	Рассчитываются исходя предела дозы облучения и годового объема вдыхаемого воздуха для персонала, а также из ожидаемых эффективных доз облучения на единицу ингаляционного поступления для персонала, приведенных в таблице 1 приложения 3 Гигиенического норматива «Критерии оценки радиационного воздействия»*		0,1 ДОА
Эффективная доза облучения населения, обусловленная радиоактивными отходами на всех этапах обращения с ними	Не должна превышать 10 мкЗв/год** Проектная доза облучения населения, обусловленная захороненными РАО, не должна превышать граничную дозу 0,3 мЗв в год***		10 мкЗв/год
Референтные уровни содержания радионуклидов в питьевой воде*	Радионуклид	Референтный уровень, Бк/л	-
	¹³⁷ Cs	10	
	⁹⁰ Sr	10	
	⁶⁰ Co	100	

Наименование критерия	Критерии безопасности	Проектные пределы
* Гигиенические нормативы «Критерии оценки радиационного воздействия», утвержденные Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28.12.2012 г. № 213 [212]. **Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии и источников ионизирующего излучения». утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31 декабря 2013 г. № 137 [213]. ***Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами». утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31 декабря 2015 г. N 142 [214].		

Расчет дозовых нагрузок на персонал проводился в соответствии с разработанной для перспективного ППЗРО транспортно-технологической схемой и перечнем технологических операций по обращению с РАО классов 3 и 4.

Транспортно-технологическая схема обращения с РАО классов 3 и 4 в сооружениях захоронения включает операции по доставке упаковок РАО в модули захоронения на спецавтомобиле, загрузку в отсеки захоронения, заполнение пустот буферными материалами, бетонирование перекрытий над отсеками захоронения. В процессе выполнения работ задействован персонал группы А и Б: крановщики, стропальщики, водители спецавтомобилей, разнорабочие и другой персонал.

Схематично процесс загрузки упаковок РАО в модули захоронения представлен на рисунке 4.1 (на данном рисунке представлена схема обращения с упаковками РАО класса 3, схема обращения с упаковками РАО класса 4 аналогична за исключением операций по заполнению пустот буферными материалами: для РАО класса 4 заполнение пустот между контейнерами осуществляется цементным раствором с помощью бетононасоса, для РАО класса 3 – бентонитовой крупкой, подаваемой с помощью ленточного транспортёра и грейферного захвата, устанавливаемого на кран передвижного каркасного сооружения).

В модуле захоронения спецавтомобиль проезжает через проёмы, предусмотренные в перегородках и торцевой стене модуля под передвижное каркасное сооружение в зону действия крана, используемого для загрузки упаковок в отсеки.

Краном упаковки устанавливаются на участок входного контроля и далее размещаются в отсеки захоронения. По мере заполнения отсеков захоронения пустоты между упаковками РАО заполняются буферным материалом (песчано-бентонитовой смесью заполняются пустоты в модуле захоронения РАО 3 класса, бетонным раствором заполняются пустоты в модуле захоронения РАО класса 4).

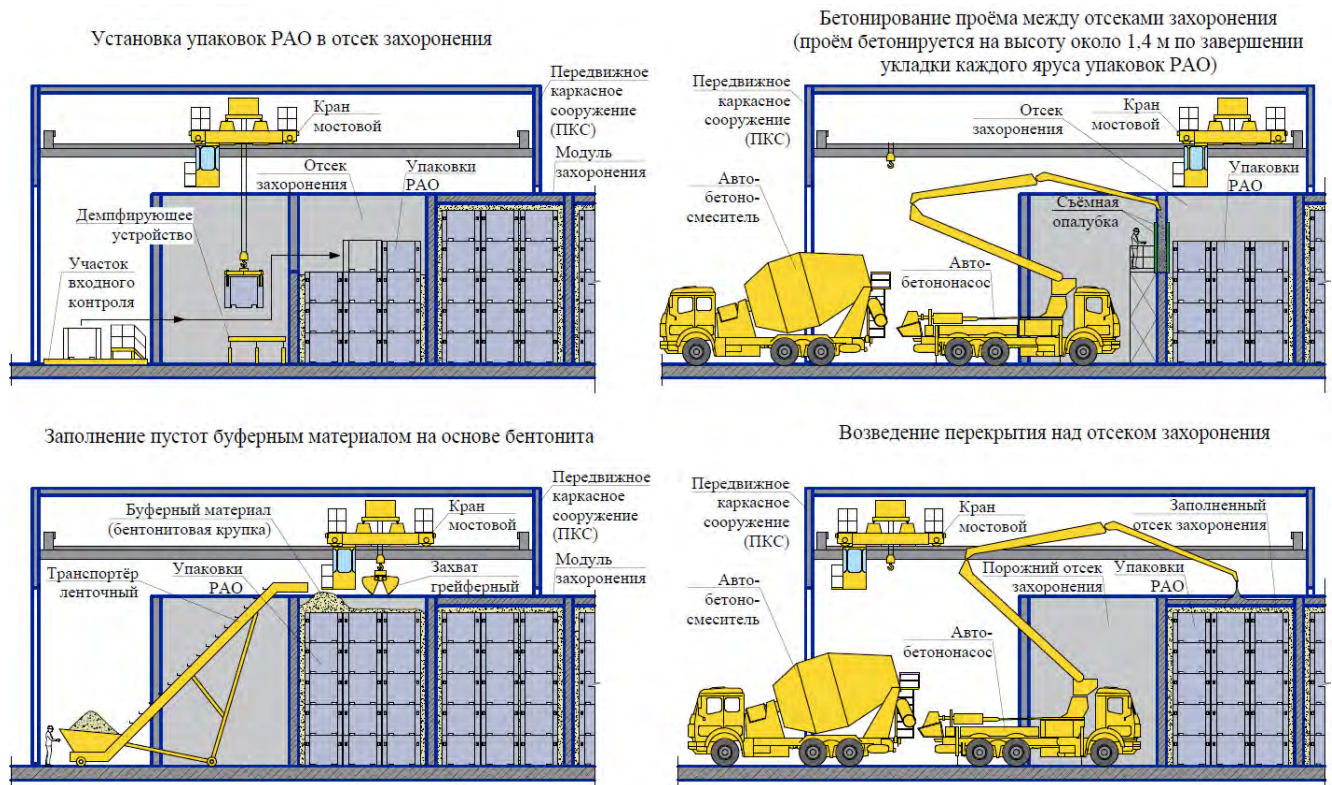


Рисунок 4.1 – Схема проведения основных технологических операций в модуле захоронения, положенная в основу оценок дозовых воздействий на персонал при нормальной эксплуатации (на схеме показан модуль захоронения РАО класса 3 в продольном разрезе)

После заполнения отсека захоронения упаковками РАО и буферными материалами над ним осуществляется возведение железобетонного перекрытия с гидроизоляцией и начинается проведение работ по загрузке следующего отсека.

С учётом объёмов поступления РАО в ППЗРО со атомной станции по типу Белорусской АЭС в год осуществляется захоронение около 70 шт. упаковок РАО класса 3 и около 100 шт. упаковок РАО класса 4.

С учётом времени на проведение операций по обращению с упаковками РАО в [208] были рассчитаны дозовые нагрузки на персонал.

В таблице 4.2 представлены результаты оценки дозовых нагрузок на персонал ППЗРО при обращении с упаковками РАО классов 3 и 4 в режиме нормальной эксплуатации, выполненные в рамках НИР по выбору способа захоронения РАО в Республике Беларусь.

Таблица 4.2 – Результаты оценки дозовых нагрузок на персонал ПЗРО при обращении с упаковками РАО классов 3 и 4 [208]

Специальность работника	Количество, специалистов	Коллективная доза на бригаду, мЗв/год	Индивидуальная доза облучения персонала, мЗв/год
Водители	2 чел., 1 смена	7,3	4
Стропальщики	10 чел. 1 смена	122	12
Крановщики	2 чел., 1 смена	15,5	8
Дезактиваторщик	1 чел., 1 смена	5,6	6
Дозиметрист	1 чел., 1 смена	7,3	7
Специалист СУИК	1 чел., 1 смена	5,5	5
Разнорабочий	1 чел., 1 смена	10,0	10

По результатам расчета индивидуальные годовые дозы облучения персонала ППЗРО при обращении с упаковками РАО не превышают дозы для персонала – 20 мЗв, что позволяет сделать вывод о том, что транспортно-технологические решения, разработанные в разделе 3 настоящего диссертационного исследования, соответствуют нормам обеспечения безопасности.

4.1.2 Оценка радиационной обстановки при авариях в ППЗРО

Перечни исходных событий аварий, которые учитывались при оценке безопасности при эксплуатации и закрытии ППЗРО, приняты в соответствии с НП-055-14 [25], а также с учётом норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности», утв. пост. МЧС Республики Беларусь 20.01.2012 г. № 7 с учетом дополнительных требований ТКП 263-2010, касающихся всех ОИАЭ. Окончательные перечни исходных событий аварий при эксплуатации и закрытии конкретного ППЗРО, должны быть установлены и обоснованы в ПД и ООБ ППЗРО.

Перечень исходных событий, принятый для анализа проектных аварий:

- внешние воздействия природного происхождения, свойственные району размещения ППЗРО;
- внешние воздействия техногенного происхождения (например, внешний пожар, воздушная ударная волна, обусловленная взрывом, возможным на соседнем объекте, проходящем транспорте);
- полное прекращение энергоснабжения;
- пожар в ППЗРО;
- падение отдельных упаковок РАО при транспортно-технологических операциях и размещении в сооружениях ППЗРО;

- отказы оборудования систем обращения с упаковками РАО;
- падение технологического оборудования и строительных конструкций на упаковки РАО;
- взрыв.

Перечень запроектных аварий, принятый для оценки безопасности:

- внешние воздействия природного и техногенного происхождения. При анализе сейсмических явлений необходимо рассматривать максимальное расчетное землетрясение (МРЗ);
- падение летательного аппарата (5 т);
- воздушная ударная волна силой 30 кПа;
- пожар с температурой на поверхности сооружений ППЗРО >800 °С в течение 1 ч.

Запроектная авария с воздействием строительной сваи (бура) на верхнее перекрытие сооружений ППЗРО рассмотрена при определении сроков активного контроля после закрытия ППЗРО.

Для анализа исходных событий, обусловленных внешними воздействиями природного происхождения, принято применительно к площадке, расположенной в тридцатикилометровой зоне Белорусской АЭС. Сейсмическая характеристика предполагаемой площадки, данные по метеорологическим явлениям, таким как ураган, смерчи, а также гидрографические характеристики приняты по данным для тридцатикилометровой зоны Белорусской АЭС.

Сведения об учитываемых при оценке эксплуатационной безопасности внешних воздействиях природного происхождения, на основные радиационно-опасные здания и сооружения приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сводная таблица учитываемых при оценке безопасности воздействий природного происхождения на основные здания и сооружения ППЗРО [208]

Внешнее воздействие	Учитываемая интенсивность внешнего воздействия (на примере размещения ППЗРО в 30-километровой зоне Белорусской АЭС)
Землетрясения с расчетной сейсмической интенсивностью	Сейсмичность площадки (грунты II категории) составляет: - 6 баллов для периода повторяемости между сильными землетрясениями не менее 1000 лет (ПЗ); - 7 баллов для периода повторяемости между сильными землетрясениями не менее 10000 лет (МРЗ).
Ураганы	Средняя скорость ветра принята 4,1 м/с, максимальная наблюдаемая скорость ветра (за 10000 лет) 28 м/с. Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [215] рассматриваемая территория по давлению ветра относится к I району, для которого нормативное значение ветрового давления равно 0,23 кПа

Внешнее воздействие	Учитываемая интенсивность внешнего воздействия (на примере размещения ППЗРО в 30-километровой зоне Белорусской АЭС)
Смерч	Район расположен на границах зон повышенной смерчеопасности А и I Д, с расчётным классом вероятного смерча 2,75 (консервативная оценка по зоне I Д). Категория по ТКП 263-2010 – класс «В» - территории, на которых имеются внешние воздействия I, II и III степеней опасности.
Удар молнии	Средняя суммарная продолжительность гроз составляет 36 ч ($4,1 \cdot 10^{-3}$ год ⁻¹)
Наводнение, вызванное прорывом естественных или искусственных водохранилищ	При оценке принималось, что площадка располагается на отметке рельефа, исключающей возможность её затопления

Из числа опасных природных процессов, перечисленных в таблице 4.3, на безопасность сооружений захоронения РАО классов 3 и 4 могут оказывать влияние землетрясения и удары молнии. При остальных воздействиях природного происхождения последствия развития исходных событий категоризируются как отклонения от нормальной эксплуатации, не сопровождающиеся выбросами РВ.

В результате анализа исходных событий проектных и запроектных аварий выявлено, что часть из них по ожидаемым радиационным последствиям категоризируются как отклонение от нормальной эксплуатации или предаварийная ситуация.

Расчет доз облучения населения при рассмотрении проектных и запроектных аварий был выполнен с использованием программного средства «ДОЗА 3.0», аттестованного в Ростехнадзоре РФ (паспорт аттестации программного средства «ДОЗА 3.0» ФБУ «НТЦ ЯРБ» № 338 от 12 сентября 2013 г.) [210].

Выполненный в [208] анализ последствий аварий показал, что авариями с наихудшими радиационными последствиями являются для сооружений захоронения РАО запроектные аварии, исходным событием которых является падение легкого самолета. Выброс радионуклидов в атмосферу составит $3,3 \cdot 10^8$ Бк с ожидаемой дозой облучения населения 0,93 мЗв за первый год для детей в возрасте от года до двух лет (2 группа по НРБ-99/2009 [45]), представленной в таблице 4.4, и 0,91 мЗв (6 группа по НРБ-99/2009 [45] – взрослые).

Расчёт доз облучения населения при падении летательного аппарата на сооружения захоронения выполнен для упаковок РАО класса 3.

Таблица 4.4 – Значения ожидаемой дозы облучения при запроектной аварии с исходным событием падение легкого самолета для детей в возрасте от года до двух, мкЗв [208]

Расстояние от источника, км	Внешнее облучение		Внутреннее облучение		Суммарная доза без учета потребления продуктов питания	Суммарная доза по всем путям облучения
	от облака	от поверхности	при ингаляции	при потреблении продуктов питания		
0,05	2,0E-03	7,9E+00	8,3E-02	7,7E+02	8,0E+00	7,7E+02
0,1	2,4E-03	9,4E+00	9,9E-02	9,2E+02	9,5E+00	9,3E+02
0,2	1,2E-03	4,8E+00	5,0E-02	4,6E+02	4,9E+00	4,7E+02
0,3	9,3E-04	3,7E+00	3,9E-02	3,6E+02	3,7E+00	3,6E+02
0,5	8,0E-04	3,2E+00	3,4E-02	3,1E+02	3,2E+00	3,1E+02
1	5,3E-04	2,1E+00	2,2E-02	2,1E+02	2,1E+00	2,1E+02
2	2,4E-04	9,5E-01	9,9E-03	9,2E+01	9,6E-01	9,3E+01
3,0	1,3E-04	5,1E-01	5,3E-03	4,9E+01	5,2E-01	5,0E+01
4,0	8,3E-05	3,3E-01	3,5E-03	3,2E+01	3,3E-01	3,2E+01

В рамках оценки эксплуатационной безопасности ППЗРО, выполненной в [208] для разработанных автором сооружений захоронения Белорусской АЭС, установлено, что за границей СЗЗ ППЗРО доза облучения населения при наихудших погодных условиях за первый год после запроектных аварий не превысит 0,93 мЗв.

Анализ последствий аварий показал, что по потенциальной радиационной опасности ППЗРО с заложенными критериями приемлемости отходов для захоронения РАО и решениями по строительным конструкциям относится к III категории, то есть радиационное воздействие при возможной авариях, возникновение которых не связано с транспортированием источников излучения за пределами территории объекта и гипотетическим внешним воздействием (взрывы в результате попадания ракеты, падения тяжелого самолета или террористического акта), ограничивается территорией объекта. На границе СЗЗ ППЗРО наблюдается непревышение дозового предела техногенного облучения населения равного 1 мЗв/год, установленного Санитарными нормами и правилами «Требования к радиационной безопасности» и Гигиеническим нормативом «Критерии оценки радиационного воздействия».

4.1.3 Оценка устойчивости модулей захоронения РАО к внешним воздействиям

Согласно разработанным в разделе 3 предложениям, железобетонные модули захоронения, заполненные упаковками РАО, закрываются покрывающим экраном одновременно в процессе закрытия ППЗРО. Покрывающий экран обеспечивает защиту сооружений захоронения от внешних воздействий после закрытия ППЗРО, а на период эксплуатации (около 90 лет) защиту упаковок РАО от возможных внешних воздействий должна обеспечивать конструкция самих

модулей захоронения. В связи с этим для разработанных предложений по выбору способа захоронения РАО важна оценка ограждающих конструкций (модулей захоронения) на устойчивость к внешним воздействиям.

Перечень исходных событий, принимаемых к рассмотрению для оценки надежности строительных конструкций железобетонных модулей захоронения, представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Исходные события, принимаемые к рассмотрению для оценки надежности строительных конструкций

Исходные события	Рассматриваемые сооружения	Учитываемое воздействие
1 Исходные события проектных аварий		
1.1 Внешние воздействия природного происхождения		
Сейсмические воздействия МРЗ-7 баллов по шкале MSK-64	Модули захоронения в процессе эксплуатации. Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном).	Величина проектного землетрясения ПЗ составляет 6 баллов, величина максимального расчетного землетрясения МРЗ – 7 баллов.
Ураганы	Модули захоронения в процессе эксплуатации. Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном).	На территории 30-километровой зоны Белорусской АЭС средняя годовая скорость ветра (без учета направлений) на территории рассматриваемой зоны увеличивается от 2,5 м/с в северной части зоны до 3,7 м/с – южной. В зимний период средние месячные скорости ветра находятся в пределах 2,8-2,9 м/с в северной части и 4,0-4,3 м/с – в южной. В предполагаемом районе расположения ПЗРО средняя скорость ветра равна 4,1 м/с, максимальная наблюдаемая скорость ветра составила 28 м/с. Рассматриваемая территория по давлению ветра относится к I району, для которого нормативное значение ветрового давления равно 0,23 кПа.
Смерчи	Модули захоронения в процессе эксплуатации. Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном).	Согласно схематической карте районирования территории бывшего СССР по смерчеопасности и каталогу смерчей на территории бывшего СССР и Республики Беларусь, территория 30-км зоны белорусской АЭС относится к смерчеопасным. Консервативно принимается к рассмотрению класс интенсивности смерча F3. Расчетные параметры вероятного смерча: – годовая вероятность возникновения смерча - $1,0 \cdot 10^{-5}$; – класс вероятности смерча $k_p=1,5$; – длина пути прохождения смерча $L=5,0$ км; – ширина пути прохождения смерча $W_p=50$ м;

Исходные события	Рассматриваемые сооружения	Учитываемое воздействие
		– максимальная скорость вращения воронки $V = 70$ м/с; – скорость поступательного движения смерча $U = 12,6$ м/с; – перепад давления между периферией и центром воронки смерча $\Delta P = 31$ ГПа.
Снеговая нагрузка	Модули захоронения в процессе эксплуатации. Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном).	Слой осадков ≥ 20 мм за 12 часов. Средняя из наибольших за зиму декадных высот снежного покрова достигает 50-60 см.
1.2 Внешние воздействия техногенного происхождения		
Воздушная ударная волна, обусловленная взрывом, возможным на соседнем объекте, проходящем транспорте	Модули захоронения в процессе эксплуатации. Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном).	10 кПа
Пожар на ПЗРО		
Пожар на топливно-заправочном пункте	Модули захоронения в процессе эксплуатации.	Разгерметизация резервуара с топливом, разлив поступившего из резервуара топлива на поверхность площадки, испарение топлива, поступление паров топлива в окружающее пространство. Зависимый отказ – взрыв при сгорании паров дизельного топлива. Топливо-заправочный пункт расположен вне промплощадки (вне охраняемой территории) объекта на расстоянии 320 м от модулей Избыточное давление от центра взрыва до модулей составит ~ 1 кПа.
1.3 Внутренние воздействия техногенного происхождения		
Пожар в защитном передвижном сооружении/Взрыв	Модули захоронения в процессе эксплуатации.	Автомобиль находится внутри модуля. Объем дизельного топлива – 350 л. Строительные конструкции сооружения захоронения обеспечивают степень огнестойкости не менее 1,5 часа. Все горючие ТРО размещены в железобетонных контейнерах типа НЗК, или КНГО стенки которых обеспечивают предел огнестойкости не менее 1,5 часа. В соответствии с [200] ограждающие конструкции с пределом огнестойкости не менее 0,75 часа относятся к противопожарным преградам.

Исходные события	Рассматриваемые сооружения	Учитываемое воздействие
Падение отдельных упаковок РАО при транспортно-технологических операциях		
Падение упаковки РАО в защитном передвижном сооружении в отсек сооружения захоронения	Модули захоронения в процессе эксплуатации.	Падение упаковки РАО на фундаментную плиту сооружения с высоты ~5,7 м.
Падение технологического оборудования		
Падение кранового оборудования	Модули захоронения в процессе эксплуатации.	Падение моста крана или тележки Пролет крана – 19 м, ширина – 5,1 м Масса тележки – 5,7 т Масса моста крана – 23 т. Падение моста крана с одной из сторон на стену модуля, площадь соприкосновения – 3 м ²
2 Исходные события запроектных аварий		
2.1 Внешние воздействия природного происхождения		
Катастрофические внешние воздействия природного и техногенного происхождения, включая землетрясение выше МРЗ	Модули захоронения в процессе эксплуатации. Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном)	Землетрясение выше 7 баллов Скорость ветра более 25 м/с Кратковременное усиление скорости ветра до 21-35 м/с регистрируются один раз в 5 лет Максимальная мгновенная скорость ветра (порыв) обеспеченностью 0,01 % – 54 м/с Смерч. Класс интенсивности расчетного смерча по шкале Фуджиты 2,5.
2.2 Внешние воздействия техногенного происхождения		
Падение летательного аппарата		
Падение летательного аппарата на заполняемый отсек	Передвижное каркасное сооружение. Модули захоронения в процессе эксплуатации.	Легкий самолет массой до 5 т, масса горючего – 1 т. Площадь воздействия 7-10 м ² .
Падение летательного аппарата на законсервированный объект	Модули захоронения в процессе эксплуатации. Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном).	Легкий самолет массой до 5 т, масса горючего – 1 т. Площадь воздействия 7-10 м ² .
Ударная волна		
Воздействие ударной волны	Передвижное каркасное сооружение. Модули захоронения в процессе эксплуата-	Давление во фронте 30 кПа

Исходные события	Рассматриваемые сооружения	Учитываемое воздействие
	тации.	
Воздействие ударной волны на законсервированные отсеки сооружения захоронения	Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном)	Давление во фронте 30 кПа
Пожар с температурой на поверхности сооружений ПЗРО более 800 °С в течение 1 часа		
Пожар с температурой на поверхности модулей более 800 °С в течение 1 часа	Передвижное каркасное сооружение. Модули захоронения в процессе эксплуатации.	Строительные конструкции сооружения захоронения обеспечивают степень огнестойкости не менее 1,5 часа. Все горючие ТРО размещены в железобетонных контейнерах типа НЗК или контейнерах типа КНГО, стенки которых обеспечивают предел огнестойкости не менее 1,5 часа. В соответствии с [200] ограждающие конструкции с пределом огнестойкости не менее 0,75 часа относятся к противопожарным преградам.
Непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО после закрытия ПЗРО		
Непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО после закрытия ПЗРО	Закрытое ПЗРО (модули с покрывающим экраном)	Воздействие строительной сваи (бура) на верхнее перекрытие сооружений ПЗРО.

Устойчивость железобетонных ограждающих конструкций к исходным событиям, связанным с пожарами на объекте, обеспечивается огнестойкостью данных конструкций согласно требованиям [200].

Оценки устойчивости модулей захоронения к сейсмическим воздействиям, внешним воздействиям, связанным с падением летательных аппаратов, взрывной ударной волной, выполнялись с применением программного комплекса ABAQUS, прошедшего аттестацию в научно-техническом центре по ядерной и радиационной безопасности Ростехнадзора и рекомендованного к применению при выполнении расчетных обоснований объектов использования атомной энергии (аттестационный паспорт ФБУ «НТЦ ЯРБ» с регистрационным номером № 486, дата выдачи 19.12.2019 г.) [211].

Для расчета строительных конструкций сооружений захоронения ПЗРО была построена расчетная модель, представленная на рисунках 4.2, 4.3.

В качестве расчетной модели рассматривался вариант с наименьшей толщиной ограждающих железобетонных конструкций: толщина стен по периметру модуля захоронения и

перегородок между отсеками – 400 мм, толщина верхнего перекрытия – 400 мм. В качестве буферного материала рассматривалась бентонитовая глина.

Упаковки РАО замоделированы в схеме единым массивом из объемных элементов с анизотропными характеристиками.

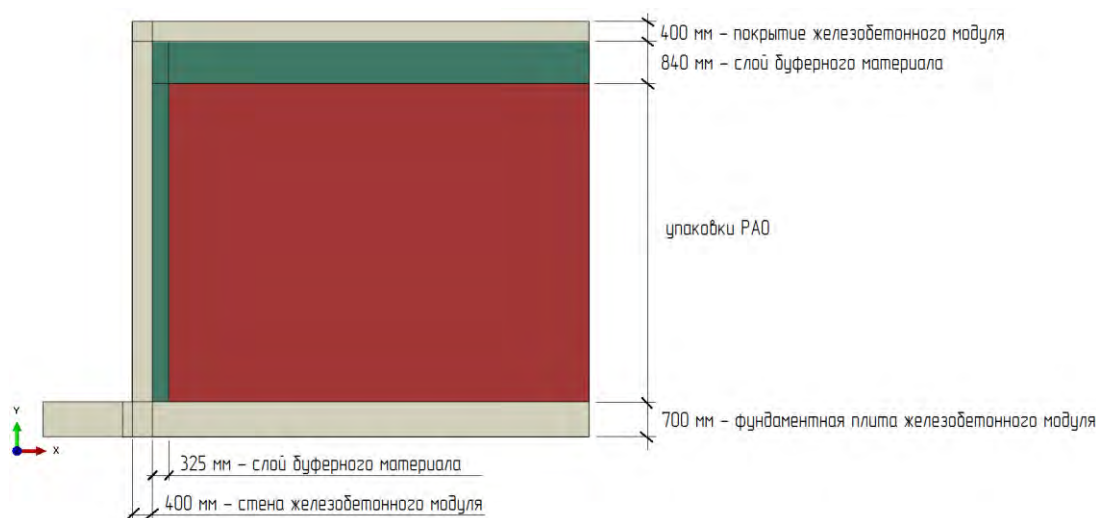


Рисунок 4.2 – Фрагмент расчетной модели конструкции сооружения захоронения

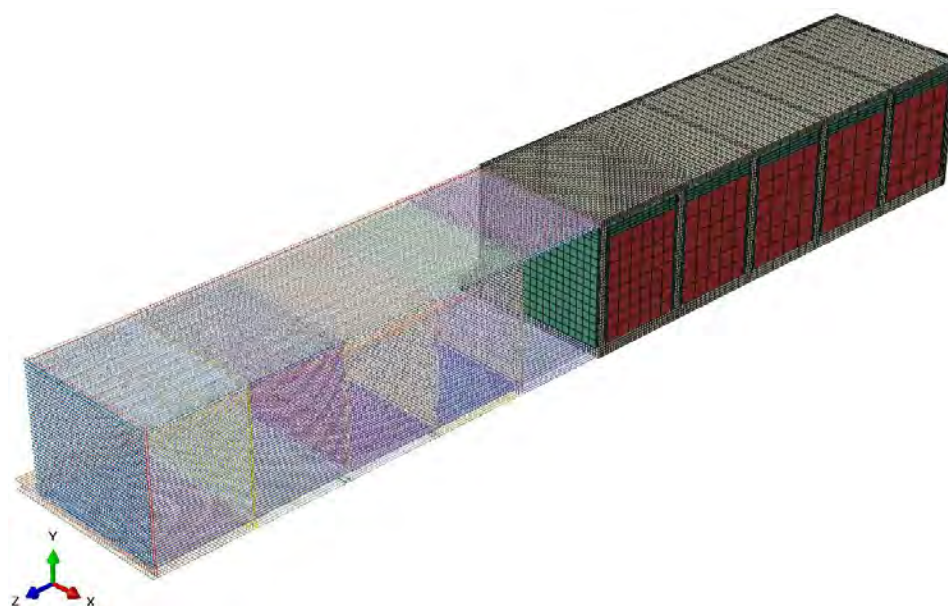


Рисунок 4.3 – Фрагмент расчетной модели армирования железобетонного модуля захоронения РАО

В ходе моделирования выполнялась оценка устойчивости ограждающих конструкций к следующим воздействиям:

- падения самолетов двух видов – относящихся к авиации общего назначения и военной авиации;
- воздушной ударной волны с давлением на фронте 30 кПа с продолжительностью фазы сжатия 1,0 с;

– сейсмические воздействия уровня МРЗ (7 баллов по шкале MSK-64).

При падении самолёта рассматривался удар в боковую и торцевую стены модуля захоронения, а также на верхнее перекрытие.

По результатам моделирования установлено, что наибольшие напряжения в строительных конструкциях возникают при моделировании сценария с падением самолёта.

Для данного сценария некоторые данные по параметрам разрушения в бетоне, достигшем предела прочности на сжатие и растяжение представлены на рисунках 4.4 и 4.5 (красным цветом выделены области, в которых произошло разрушение при сжатии и начался процесс трещинообразования при растяжении).

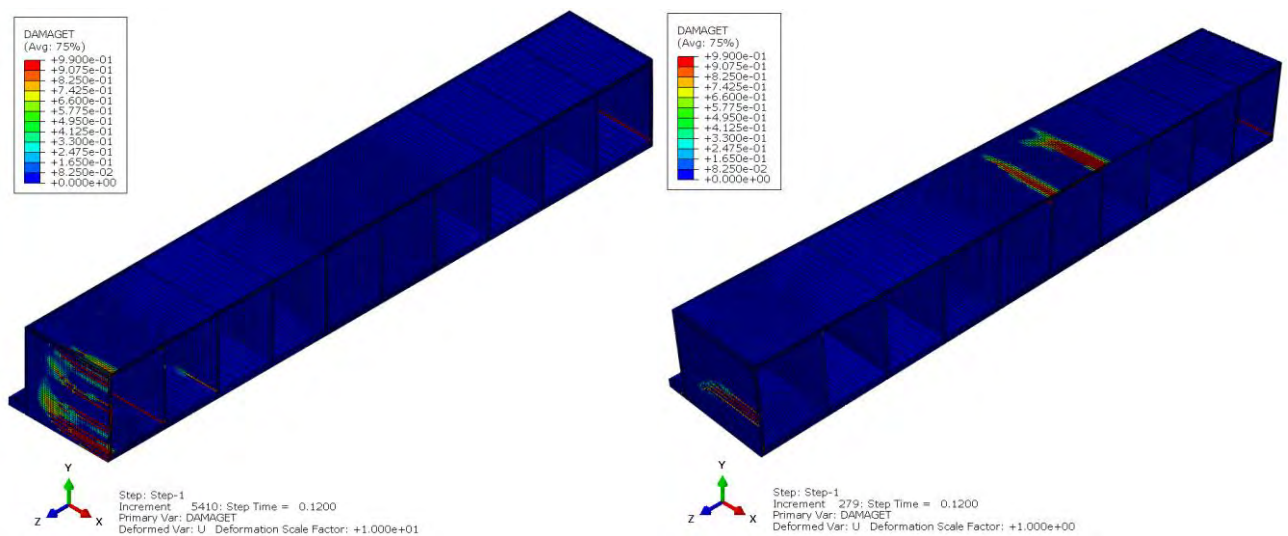


Рисунок 4.4 – Параметр разрушения (фрагмент расчетной схемы) при ударе в торцевую стену (слева) и в покрытие (справа) самолета авиации общего назначения (самолет Lear Jet-23, масса 5,67 т, скорость 100 м/с)

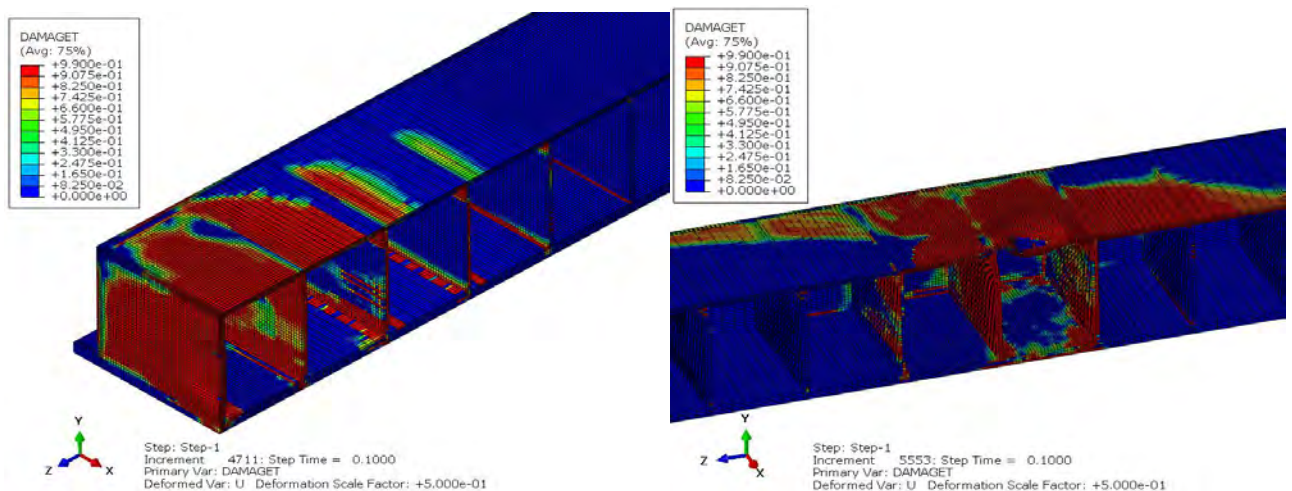


Рисунок 4.5 – Параметр разрушения (фрагмент расчетной схемы) при ударе в торцевую стену (слева) и в покрытие (справа) военного самолета (самолет Phantom RF-4E, масса 20 т, скорость 215 м/с)

По результатам расчета сделаны выводы, что строительные конструкции выдерживают:

- падение лёгкого самолета (массой 5,67 т);
- сейсмические воздействия уровня 7 баллов по шкале MSK-64 (уровень сейсмического воздействия определен применительно к Республике Беларусь, как максимальное расчётное землетрясение, однако результаты расчётов позволяют сделать предположение, что конструкция модуля захоронения будет выдерживать и бóльшие сейсмические воздействия);
- воздействие воздушной ударной волны с избыточным давлением во фронте 30 кПа и продолжительностью фазы сжатия 1,0 с.

При падении на модули захоронения тяжелого самолёта (истребитель-бомбардировщик Phantom RF-4E массой 20 т со скоростью 215 м/с) прочность железобетонной оболочки модуля захоронения РАО на пробивание не обеспечивается. Рекомендуется или исключить данное исходное событие при выборе площадки ППЗРО или выполнить утолщение стен и перекрытия модуля захоронения.

4.1.4 Оценка миграции радионуклидов через подстилающий экран из природных сорбентов

Оценки миграции радионуклидов из наземного модуля захоронения РАО применительно к различным вариантам создания подстилающего экрана, выполнялись по исходным данным автора в рамках публикации [62]. В данной работе выполнялась оценка выхода радионуклидов из условного модуля захоронения вместимостью 10 тыс. м³ упаковок РАО для варианта с применением глин в основе подстилающего экрана и для варианта с клиноптилолитом.

При моделировании были приняты следующие гидрогеологические условия:

- приповерхностный слой супесей мощностью около 5 м начинается непосредственно от почвенно-растительного слоя;
- песчаный водоносный горизонт расположен на глубине более 5 м и проходит на глубину до 7 м от земной поверхности;
- глинистые формации пролегают на глубине от 7 м и ниже.

Расчеты выполнялись с применением аттестованного программного комплекса GeRa.

В ходе их проведения была определена загрузка для четырех радионуклидов (⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs) с суммарной удельной активностью $2,75 \cdot 10^7$ Бк/кг, наибольший вклад в которую вносит ¹³⁷Cs ($2,7 \cdot 10^7$ Бк/кг). Удельная активность и радионуклидный состав приблизительно соответствуют цементированным среднеактивным ЖРО, образующимся при эксплуатации АЭС с реакторами ВВЭР-1200 (информация принята на основании данных системы учёта и контроля Белорусской АЭС).

По результатам моделирования было получено, что в обоих вариантах ни один из радионуклидов не выходит из зоны захоронения (рисунок 4.6).

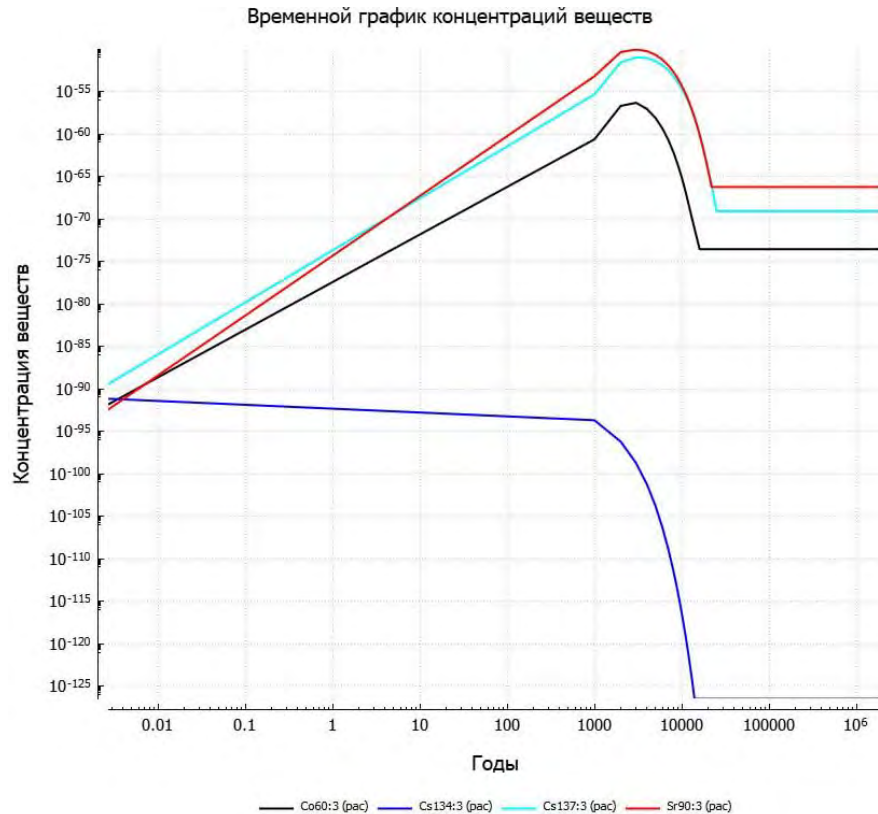


Рисунок 4.6 – График концентрации короткоживущих радионуклидов (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{134}Cs) в точке мониторинга на расстоянии 50 м от сооружений захоронения

Практически нулевые концентрации радионуклидов в точке мониторинга по результатам моделирования объясняются малым периодом полураспада радионуклидов и их высокими сорбционными характеристиками.

В связи с тем, что расчеты по короткоживущим радионуклидам не давали наглядной информации о возможных направлениях миграции для оценки «слабых мест» в конструкции наземного ППЗРО, были проведены расчеты миграции слабосорбируемого радионуклида с большим периодом полураспада (^{129}I) с суммарной активностью 10^{10} Бк (рисунок 4.7).

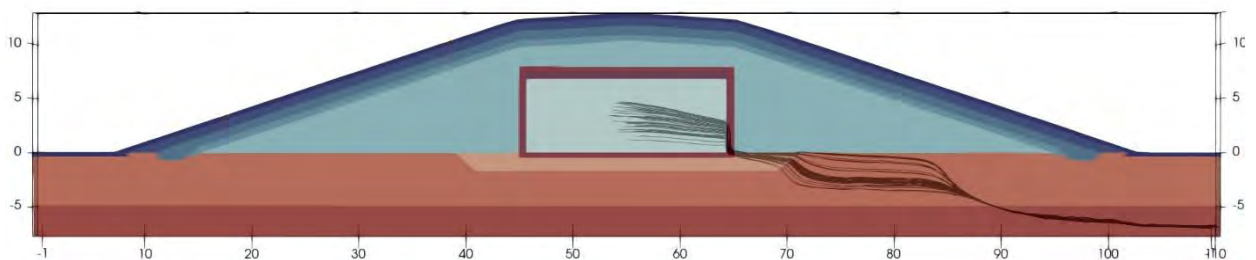


Рисунок 4.7 – Трассеры миграции ^{129}I , полученные по результатам моделирования СНЭ (черным цветом – траектории миграции ^{129}I) [62]

Расчёты с трассерами миграции, полученные для ^{129}I , позволяют сделать предположение, что отвод протечек целесообразно осуществлять таким образом, чтобы вода и выходящие с ней радионуклиды рассеивались по всей площади подстилающего экрана. Для этого в конструкции перспективного ППЗРО применены следующие решения:

- использован влагопроницаемый бетон в основании модуля захоронения (коэффициент фильтрации бетона в основании модуля захоронения выше, чем коэффициент фильтрации в верхнем перекрытии модуля захоронения);
- использован слой из щебня под основанием модуля захоронения, препятствующий капиллярному поднятию влаги через влагопроницаемый бетон основания;
- увеличена площадь сорбционного слоя подстилающего экрана.

Расчёты миграции ^{129}I были выполнены для варианта с клиноптилолитом и глиной в основании подстилающего экрана. Результаты расчётов приведены на рисунке 4.8.

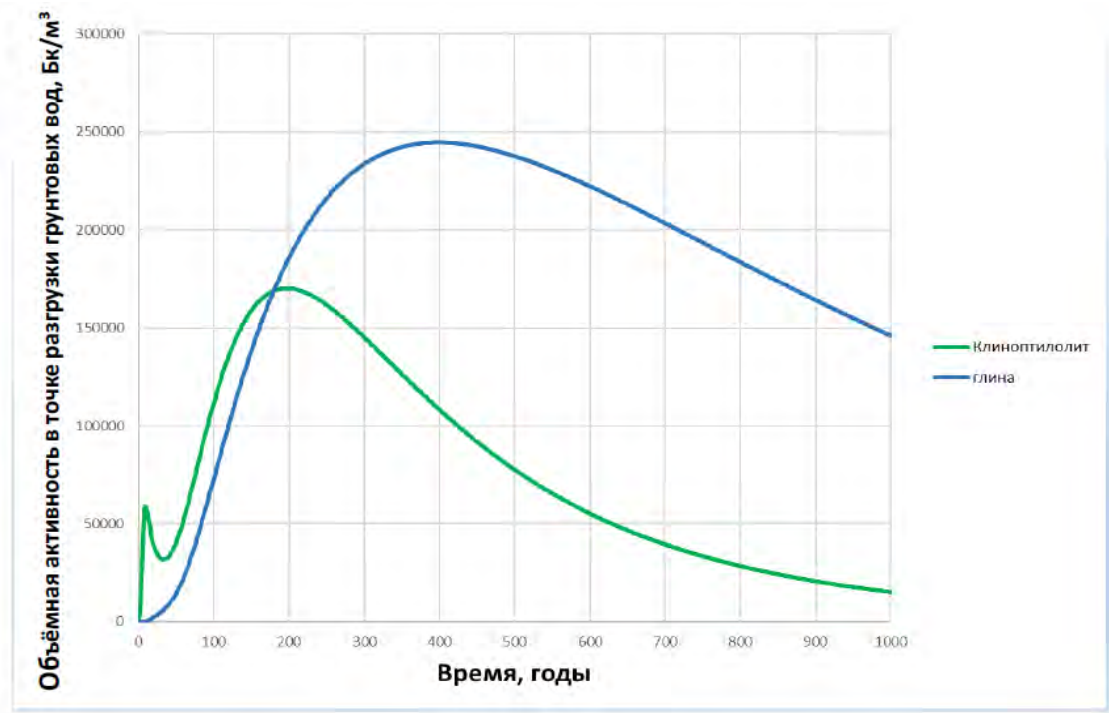


Рисунок 4.8 – Изменение объёмной активности грунтовых вод по ^{129}I в точке мониторинга на расстоянии 50 м от ППЗРО для варианта с клиноптилолитом (кривая зелёного цвета) и глиной (кривая синего цвета) в основании подстилающего экрана

По результатам расчётов в [62] сделан вывод, что для наземного ППЗРО 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».

Одновременно с оценками миграции радионуклидов, выполненными в [62], проводились более полные работы по оценке миграции радионуклидов после закрытия сооружений захоронения в рамках научно-исследовательских работ по созданию пункта захоронения РАО для стран-потребителей услуг СБЯТЦ. Данные оценки выполнялись без участия автора настоящего диссертационного исследования, но также показали принципиальную возможность окончательной изоляции РАО в наземных сооружениях захоронения с применением слоя из природных сорбентов в основе подстилающего экрана [209].

4.1.5 Оценки влияния пустот в упаковках РАО на проседание покрывающего экрана

Проседание покрывающего экрана сооружений захоронения представляет собой известную проблему приповерхностных объектов окончательной изоляции РАО. Наличие локальных проседаний на поверхности покрывающего экрана приводит к накоплению воды в месте проседания, её промерзанию в межсезонный период и потенциально может привести к разрушению верхних слоёв экрана.

При должном выполнении работ по засыпке упаковок РАО буферными материалами, по уплотнению насыпных слоёв сооружения захоронения, соблюдению заданных величин откосов боковых поверхностей покрывающего экрана, препятствующих осыпанию его материалов, проседание экрана возможно преимущественно за счёт наличия пустот в упаковках РАО.

Согласно НП-093-14 [27] упаковки РАО класса 3 в течение определенного в проекте ПЗРО срока должны сохранять структурную стабильность, механические и изолирующие характеристики. Для упаковок РАО класса 4 такие требования не предъявляются. Металлические и полимерные упаковки РАО класса 4 рассчитаны на сохранение целостности до этапа размещения в сооружениях захоронения (включительно) и могут содержать отходы, размещенные в них навалом с наличием пустот. В связи с этим наиболее вероятным сценарием проседания покрывающего экрана для предложенного в разделе 3 настоящей работы способа окончательной изоляции РАО будет деградация упаковок РАО класса 4, приводящая к следующим последствиям:

- проникновению буферных материалов в пустоты, содержащиеся в упаковках РАО и образованием пустот над верхним бетонным перекрытием модуля захоронения;
- постепенной деградации бетона покрытия модуля захоронения РАО класса 4 с раскрашиванием и осыпанием бетона в нижележащие пустоты;
- проседанием верхних слоёв покрывающего экрана.

Наиболее распространённой упаковкой для РАО класса 4 является стальная бочка объёмом 200 л диаметром 650 мм и высотой 850 мм. Для предложенной в главе 3 настоящей работы

конструкции модулей захоронения в один модуль захоронения РАО класса 4 может вместиться до 12480 бочек (при установке в 6 ярусов). Объём пустот в одном модуле в зависимости от коэффициента заполнения контейнеров определяется по формуле:

$$V_{\text{п}} = V_{\text{уп}} \cdot (1 - k_{\text{уп}}) \cdot n \quad (3),$$

где:

$V_{\text{п}}$ – объём пустот в одном модуле захоронения РАО класса 4, м^3 ;

$V_{\text{уп}}$ – вместимость (номинальный объём) упаковки РАО класса 4, м^3 ;

$k_{\text{уп}}$ – коэффициент заполнения контейнеров для РАО класса 4;

n – количество упаковок РАО класса 4 в одном модуле захоронения.

При допущении, что в одном модуле захоронения РАО класса 4 размещаются упаковки на основе 200-литровых бочек с коэффициентом заполнения одной бочки на уровне 80 % от её номинального объёма в одном модуле захоронения может оказаться около 500 м^3 пустот. Последствия проседания экрана для данного объёма пустот при условии, что проседание осуществляется по всей площади модуля захоронения равномерно, приведены на рисунке 4.9.

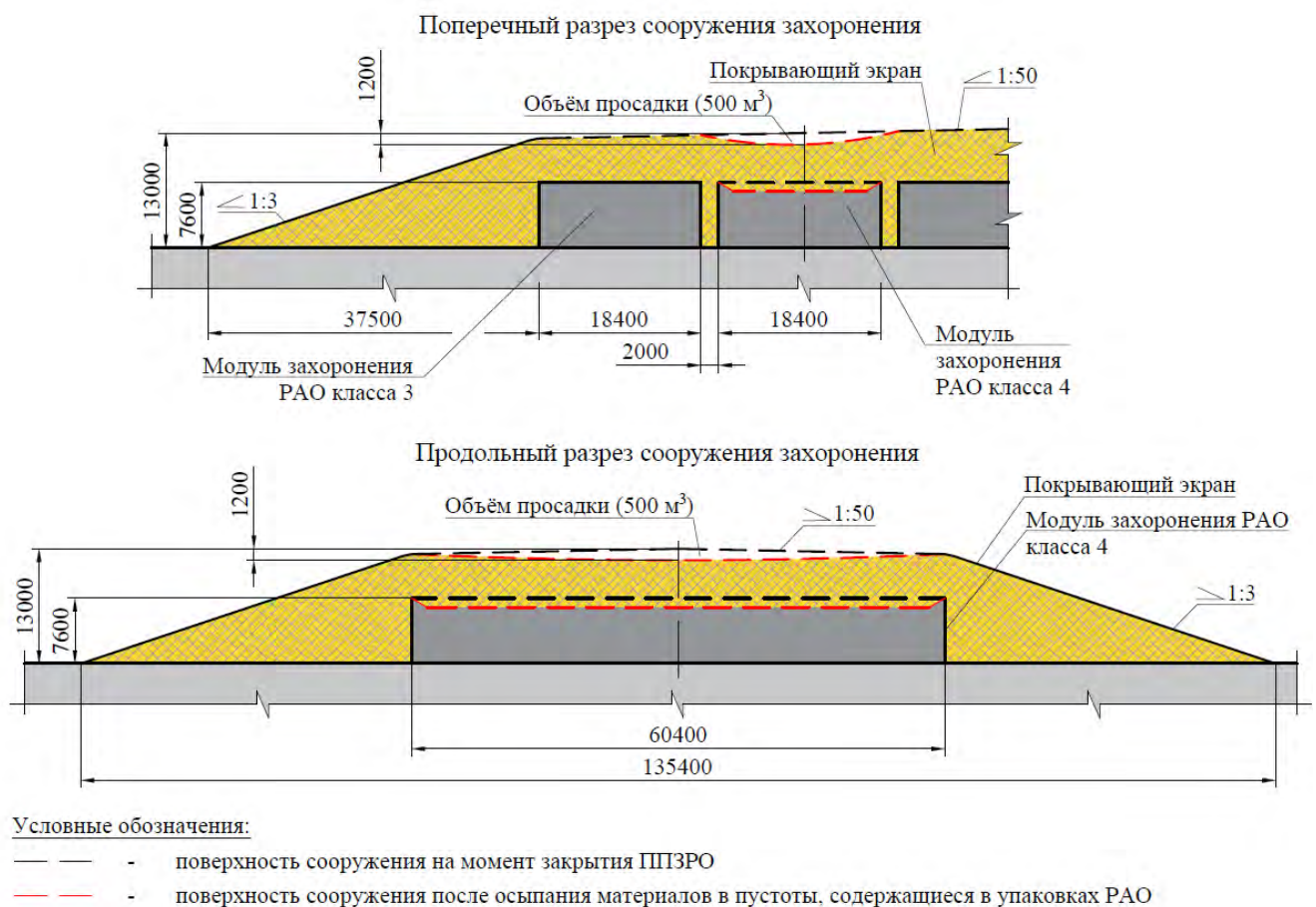


Рисунок 4.9 – Схема просадки покрывающего экрана после деградации упаковок РАО класса 4 с коэффициентом заполнения одной упаковки около 80 % (продольный разрез по модулю захоронения РАО класса 4)

Оценка вертикальной составляющей проседания экрана, представленной на рисунке 4.9, принята по формуле:

$$H_{\text{п}} = H_{\text{уп}} \cdot (1 - k_{\text{уп}}) \cdot n_{\text{яр}} \cdot k \quad (4),$$

где:

$H_{\text{п}}$ – максимальная глубина проседания экрана, обусловленная проседанием нижележащих слоёв в пустоты, образующиеся при деградации упаковок РАО, м;

$H_{\text{уп}}$ – высота упаковки РАО, м;

$k_{\text{уп}}$ – коэффициент заполнения контейнеров;

$n_{\text{яр}}$ – количество ярусов упаковок РАО в одном модуле захоронения;

k – коэффициент запаса, обусловленный уплотнением материалов и другими процессами, не связанными с наличием пустот в упаковках РАО, но также приводящими к процессам проседания экрана (принят экспертно на уровне $k=1,2$).

Для варианта с размещением 200-литровых бочек высотой 0,85 м в 6 ярусов с коэффициентом заполнения 80 %, глубина проседания экрана, согласно формуле (4), составит около 1,2 м.

Неблагоприятными последствиями проседания покрывающего экрана являются:

- изменение уклона поверхности покрывающего экрана, приводящее к образованию линзы на поверхности экрана, препятствующей стеканию воды;
- расхождение слоёв рулонных материалов (например, бентоматов) с нарушением гидроизоляционных функций данных слоёв;
- утонение защитно-дренажных слоёв, которое может приводить к промерзанию нижележащих гидроизоляционных слоёв.

В целях минимизации последствий проседания экрана рекомендуется:

- определять уклон поверхности покрывающего экрана с учётом прогнозируемых величин проседания, таким образом, чтобы избежать образования линз;
- укладывать слои рулонных материалов внахлёст, рассчитывая расхождение данных материалов при проседании экрана;
- принимать толщины защитно-дренажных слоёв с запасом, рассчитанным на утонение данных слоёв при проседании экрана.

Зависимость некоторых параметров проседания покрывающего экрана от коэффициента заполнения упаковок РАО для предложенной в настоящей работе конструкции сооружений захоронения приведена на рисунках 4.10-4.11.

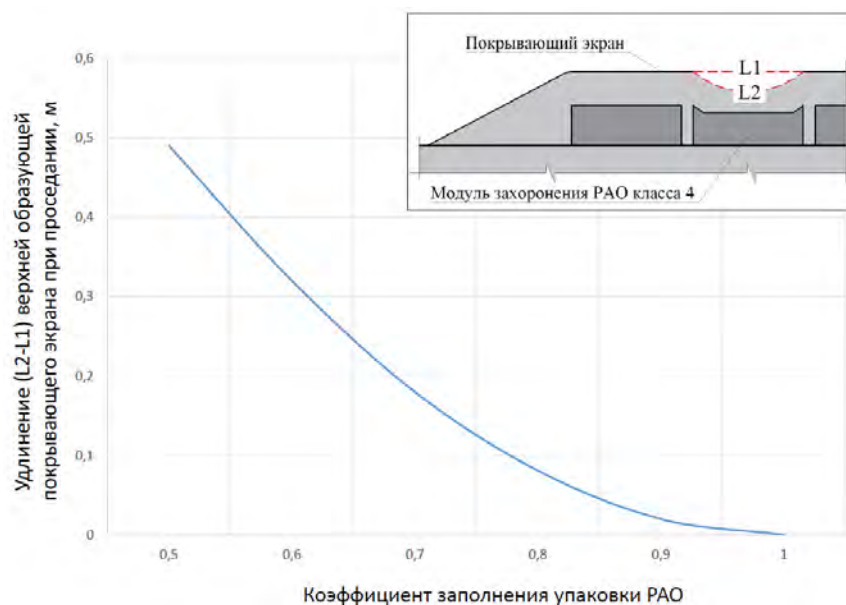


Рисунок 4.10 – Зависимость удлинения верхних слоёв покрывающего экрана при его проседании от коэффициента заполнения упаковки РАО

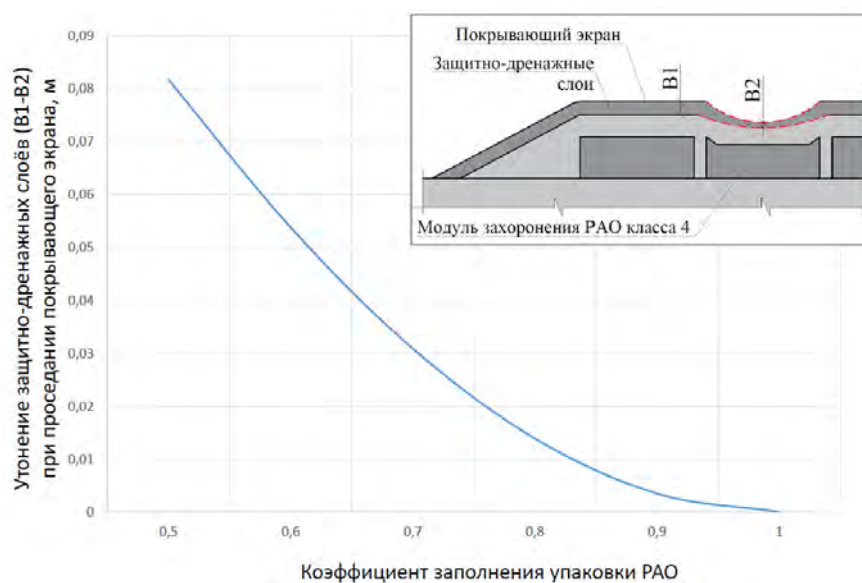


Рисунок 4.11 – Зависимость утонения защитно-дренажных слоёв покрывающего экрана от коэффициента заполнения упаковки РАО

Данные, представленные на рисунках 4.10 и 4.11, позволяют при проектировании сооружений захоронения учитывать проседание покрывающего экрана в зависимости от данных по заполняемости упаковок РАО. Например, при коэффициенте заполнения $k=0.7$ упаковок РАО класса 4 на основе 200-литровых бочек рулонные материалы необходимо укладывать внахлёт не менее чем на 0,2 м во избежание их расхождения при проседании покрывающего экрана. Значимого утонения защитно-дренажных слоёв при коэффициенте заполнения упаковок РАО $k=0.7$ не наблюдается.

4.2 Оценки экономической эффективности реализации технических решений по приповерхностному захоронению РАО

Для перспективного типового ППЗРО в настоящем разделе определены данные по стоимости оборудования, строительных материалов и выполняемых работ сооружений захоронения на различную вместимость – от 10 до 300 тыс. м³ и на различные соотношения объема упаковок РАО классов 3 и 4. Сравнение технико-экономических показателей перспективного типового ППЗРО выполнено с ППЗРО в Челябинской обл. (г. Озёрск), стоимостные показатели которого представлены в разделе 2.4 главы 2. Исходные данные и методики, используемые для определения стоимости перспективного типового ППЗРО приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Данные для определения стоимостных показателей сооружений захоронения перспективного типового ППЗРО

№ п/п	Барьер / элемент сооружений захоронения			Удельный показатель стоимости в ценах 2000 г.	Исходные данные и методика определения удельного показателя стоимости
1	Форма РАО			2 200 руб./м³	Стоимость за 1 м³ принята согласно расчётам, выполненным в разделе 2.4 главы 2 настоящего диссертационного исследования.
2	Контейнер	для РАО класса 3	НЗК-150-1,5П	18 735 руб./шт.	Технико-коммерческие предложения АО «345 Завод» (см. приложение А). Аналоговым методом (см. приложение А настоящего диссертационного исследования).
			НЗК-150-1,5 ИОС с полимерным вкладышем	23 000 руб./шт.	
		для РАО класса 4	КПН-1,5	4600 руб./шт.	
			КПН-3,5	13500 руб./шт.	
			КНГО	16000 руб./шт.	
3	Ограждающие конструкции	для РАО класса 3		687 руб./м³	Аналоговым методом, принимая за аналог ПД на строительство ППЗРО в Челябинской обл., 2019 г. [186]. (см. приложение А).
		для РАО класса 4		550 руб./м³	
4	Буферный материал для РАО класса 3	для РАО класса 3		998 руб./м³	
		для РАО класса 4		400 руб./м³	
5	Подстилающий экран			400 руб./м³	Методом расчёта прямых затрат (см. приложение А настоящего диссертационного исследования).
6	Покрывающий экран			192 руб./м³	

В связи с тем, что данные по объёмам образования и радионуклидному составу низко- и среднеактивных РАО, образующихся на АЭС, могут отличаться в зависимости от принятых на АЭС способов переработки и кондиционирования РАО, для расчета стоимости сооружений захоронения рассмотрено несколько вариантов соотношения объёмов РАО классов 3 и 4 (в привязке к количеству и вместимости модулей захоронения). Данные по соотношению объёма упаковок РАО классов 3 и 4 приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Данные по рассматриваемым при оценке стоимости вариантам соотношения объёмов РАО классов 3 и 4

Вариант	Соотношение объёмов РАО классов 3 и 4 по внешним габаритам упаковок	Соотношение объёмов РАО классов 3 и 4 по внутренним габаритам упаковок	Кол-во модулей захоронения в одной очереди строительства		Номинальная вместимость одной очереди строительства
			Для РАО класса 3	Для РАО класса 4	
1	25/75*	14/86	1	3	20 тыс. м ³
2	35/65*	20/80	1	2	15 тыс. м ³
3	50/50*	33/67	1	1	10 тыс. м ³
*В числителе приведена часть объёма упаковок РАО класса 3, в знаменателе – часть объёма упаковок РАО класса 4.					

Данные по строительному объёму, количеству материалов и упаковок для сооружений захоронения перспективного типового ППЗРО и расчёт их стоимости для вместимости от 10 тыс. м³ до 300 тыс. м³ и для различных вариантов соотношения объёмов РАО классов 3 и 4 приведены в приложении А. Результаты расчёта стоимости приведены на рисунке 4.12.

Для вместимости сооружений захоронения около 300 тыс. м³ при соотношении объёма упаковок РАО класса 3 к объёму упаковок РАО класса 4 в пропорции 25/75, экономический эффект от применения нового типа контейнеров КПН, КНГО составляет порядка 20 %, в ценах 2000 г, экономия от применения данных контейнеров составляет порядка 590 млн. руб., совокупная стоимость всех элементов сооружений захоронения составляет:

- 2,31 млрд. руб. при использовании контейнеров типа КПН, КНГО для РАО класса 4;
- 2,90 млрд. руб. при использовании контейнеров типа КРАД, КМЗ, НЗК для РАО класса 4.

С увеличением вместимости сооружений захоронения экономический эффект от применения нового типа контейнеров увеличивается линейно приблизительно на 200 млн. руб. на каждые 100 тыс. м³. Например, для захоронения 1 млн. м³ РАО классов 3 и 4 применение более доступных по цене контейнеров КПН и КНГО (по сравнению с металлическими контейнерами КРАД, КМЗ и железобетонными контейнерами НЗК) позволит сократить затраты на приобре-

тение контейнеров на сумму около 1,9 млрд. руб. в ценах 2000 г. или около 20 млрд. руб. в ценах 2024 г.

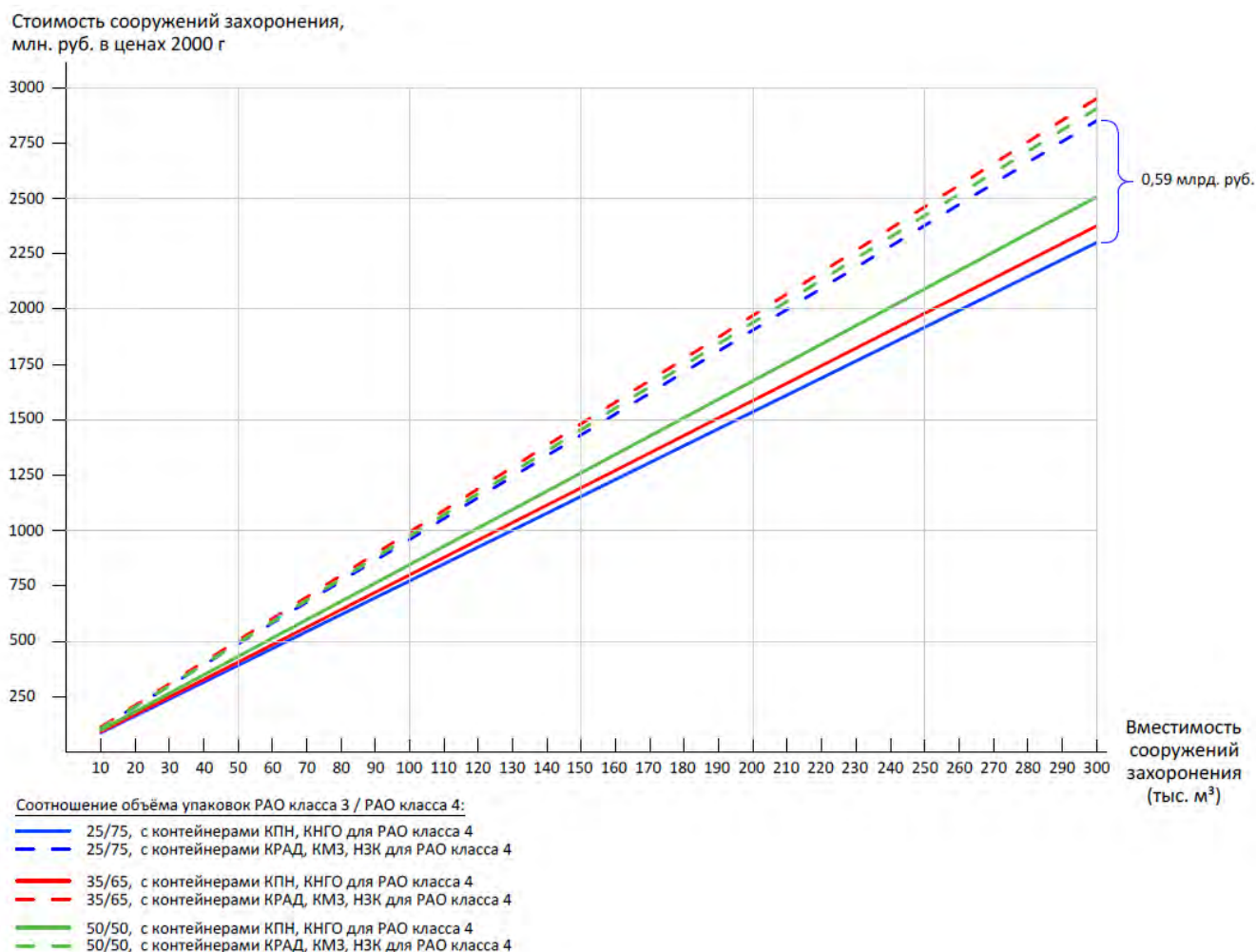


Рисунок 4.12 – Зависимость стоимости сооружений захоронения перспективного типового ППЗРО от вместимости для различных вариантов использования контейнеров и соотношений объемов поступающих на захоронение РАО классов 3 и 4

При изменении соотношения объема упаковок РАО класса 3 к объему упаковок РАО класса 4 с пропорции 35/75 на 50/50 эффект от использования контейнеров типа КРН и КНГО сокращается и составляет порядка 340 млн. руб. в ценах 2000 г для вместимости сооружений захоронения 300 тыс. м³.

Стоимость сооружений захоронения перспективного типового ППЗРО для вместимости 225 тыс. м³ при использовании контейнеров типа КРН и КНГО для РАО класса 4 составляет 1,74 млрд. руб. в ценах 2000 г. Стоимость сооружений захоронения ППЗРО в Челябинской обл. при этом согласно разделу 2.4 составляет 2,048 млрд. руб. в ценах 2000 г.

Структура затрат на ИББ перспективного типового ППЗРО для вместимости 225 тыс. м³ приведена на рисунке 4.13. По сравнению со структурой затрат ППЗРО в Челябинской обл. (ри-

сунок 2.11 главы 2) вклад контейнеров для РАО класса 4 в общую стоимость ИББ сократился с 42 % до 30 %.

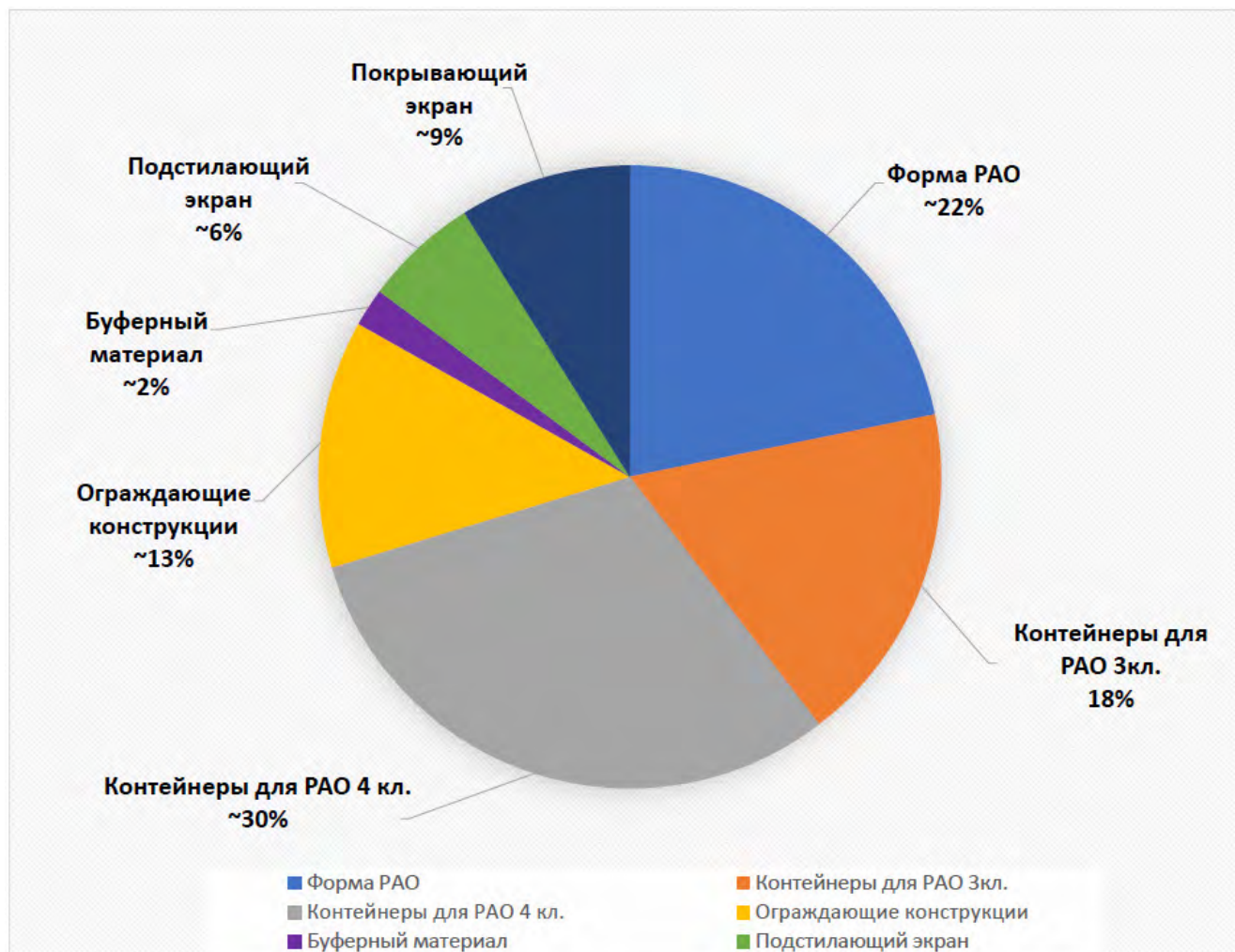


Рисунок 4.13 – Декомпозиция стоимости элементов сооружений захоронения перспективного типового ППЗРО (для вместимости 225 тыс. м³ и соотношения объёмов РАО классов 3 и 4 по внешним габаритам упаковок 25/75)

Основной вклад в экономию затрат на приобретение контейнеров дают контейнеры типа КПН (около 20 %), в меньшей степени контейнеры КНГО (около 2 %), так как количество контейнеров КНГО меньше, а стоимость сопоставима с контейнерами НЗК, взамен которых предлагается их применение. Однако применение контейнеров КНГО даёт существенную экономию за счёт сокращения объёмов упаковок РАО по причине большего по сравнению с НЗК внутреннего объёма контейнеров. Сокращение объёмов кондиционированных РАО может быть достигнуто и при применении контейнеров КПН, если отказаться от применения бочек 200-л и осуществлять упаковку РАО непосредственно в контейнеры КПН. Эффект от применения контейнеров типа КПН-1,5 и КНГО представлен на рисунках 4.14 и 4.15.

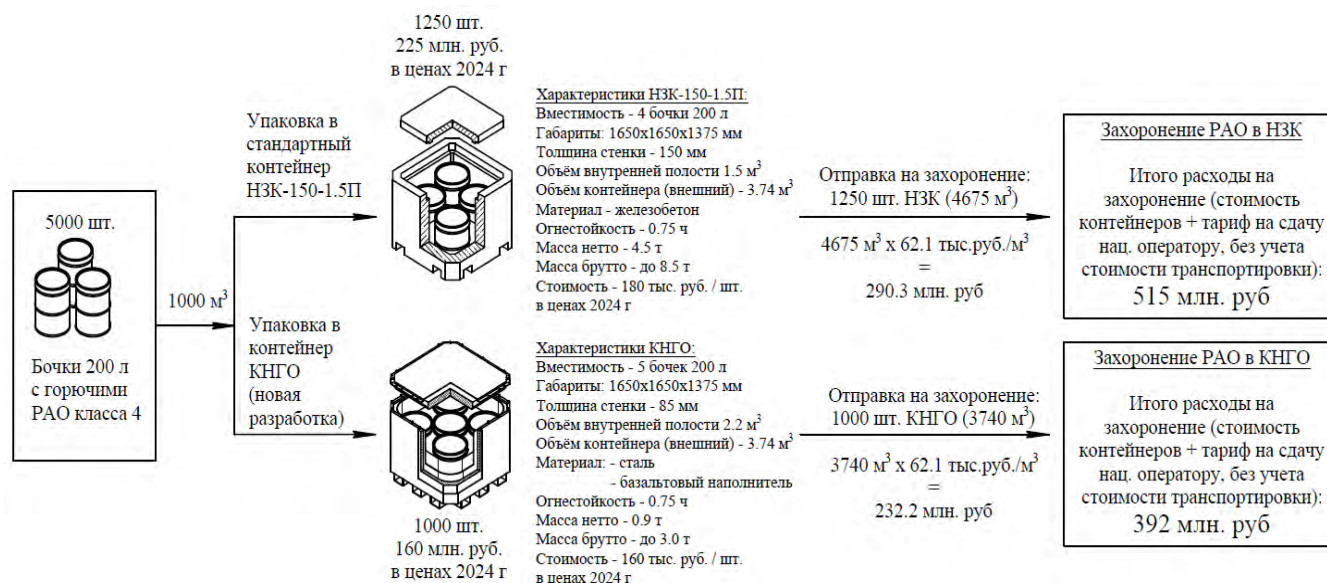


Рисунок 4.14 – Экономический эффект от применения контейнеров типа КНГО для захоронения 1000 м³ горючих РАО (данные в ценах 2024 г)

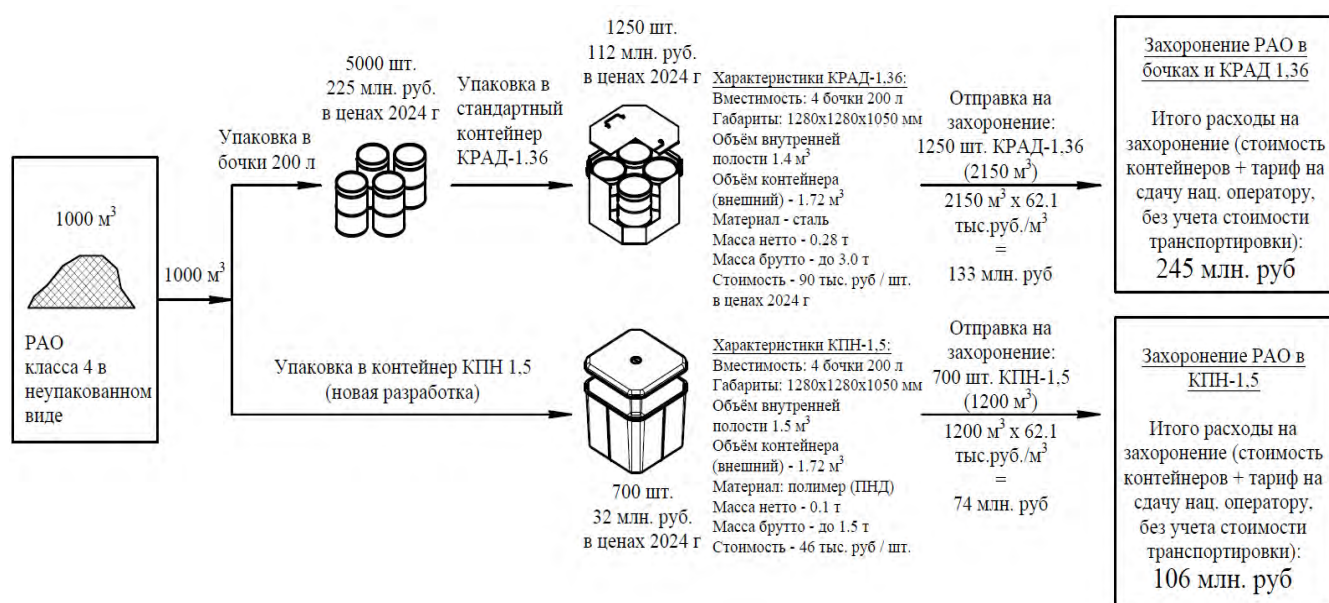


Рисунок 4.15 – Экономический эффект от применения контейнеров типа КПН для захоронения 1000 м³ негорючих или трудногорючих РАО (данные в ценах 2024 г.)

Согласно рисунку 4.14 при использовании контейнеров типа КНГО для захоронения 1000 м³ горючих РАО сокращение затрат на приобретение контейнеров и передачу упаковок РАО на захоронение по сравнению с контейнером НЗК составит 123 млн. руб. в ценах 2024 г. (без учета затрат на транспортировку до ППЗРО).

Согласно рисунку 4.15 при упаковке 1000 м³ РАО непосредственно в контейнеры КПН сокращение затрат на приобретение контейнеров и передачу упаковок РАО на захоронение по

сравнению с упаковкой РАО в бочки 200 л и контейнеры КРАД-1,36 составит 139 млн. руб. в ценах 2024 г. (без учета затрат на приобретение бочек 200 л и затрат на транспортировку до ППЗРО).

Экономические оценки перспективного типового ППЗРО, приведённые выше, выполнены для варианта с размещением ограждающих конструкций для РАО классов 3 и 4 на одном подстилающем экране и под одним покрывающим экраном, при расстоянии между модулями захоронения 2 м. При размещении ограждающих конструкций (модулей захоронения) на больших расстояниях друг от друга стоимость сооружений захоронения будет увеличиваться за счёт увеличения объёмов и соответственно стоимости подстилающего и покрывающего экрана. Зависимость стоимости подстилающего и покрывающего экрана от расстояния между модулями захоронения для перспективного типового ППЗРО приведена на рисунках 4.16, 4.17.

Из рисунков 4.16 и 4.17 видно, что сокращение расстояния между модулями захоронения приносит наибольший экономический эффект для ППЗРО большой вместимости.

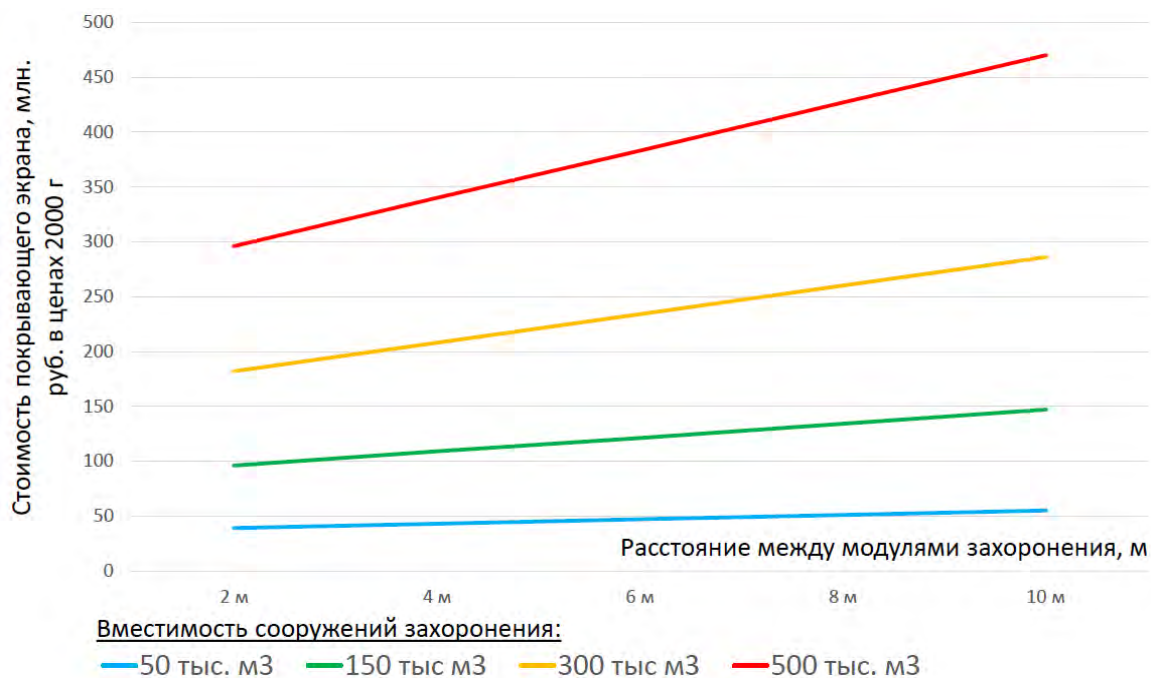


Рисунок 4.16 – Экономический эффект для покрывающего экрана от сокращения расстояния между модулями захоронения

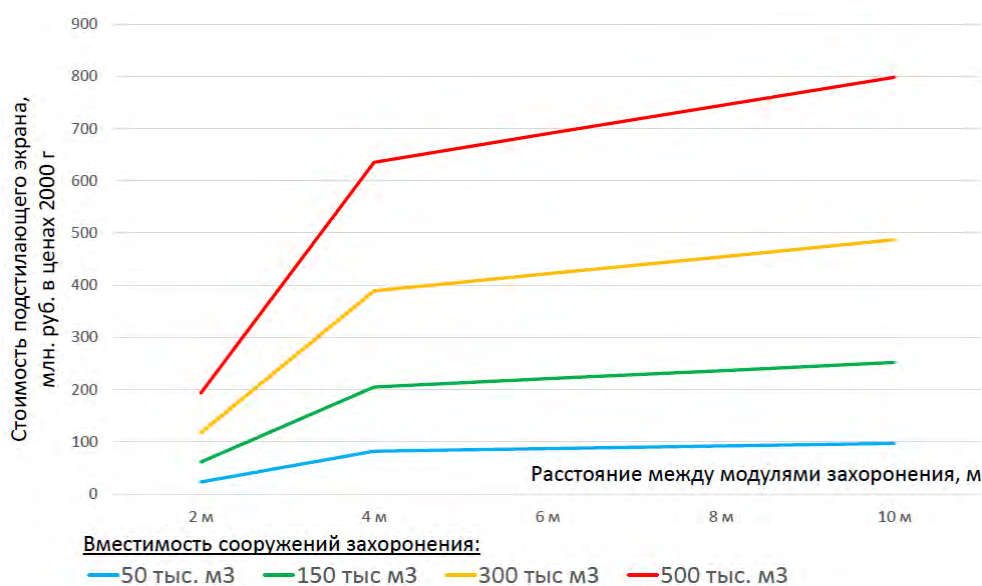


Рисунок 4.17 – Экономический эффект для подстиляющего экрана от сокращения расстояния между модулями захоронения

Помимо затрат на создание сооружений захоронения РАО в стоимость ППЗРО входят затраты на объекты инфраструктуры: здания и сооружения технологического назначения, предназначенные для приёма и подготовки к захоронению РАО, обращения со вторичными РАО, вспомогательные здания и сооружения, системы инженерного обеспечения, линейные объекты. Для сравнения показателей стоимости перспективного типового ППЗРО с ППЗРО в Челябинской обл. приняты данные по стоимости объектов инфраструктуры последнего [186]. Данные по стоимости ППЗРО в целом с учётом объектов инфраструктуры приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Данные по стоимости ППЗРО в Челябинской обл. согласно ПД

№ п/п	Статьи затрат	Стоимость, млн. руб. в ценах 2000 г по очередям				
		1 очередь (45 тыс. м³)	2 очередь (90 тыс. м³)	3 очередь (135 тыс. м³)	4 очередь (180 тыс. м³)	5 очередь (225 тыс. м³)
1	ИББ, входящие в кап. затраты на строительство: подстиляющий экран, ограждающие конструкции [186]	95	95	95	95	95
2	Полная стоимость всех ИББ и элементов сооружений захоронения (по данным раздела 2.4)	410	410	410	410	410
3	Объекты инфраструктуры [186]	206	17	16	23	18
4	Всего по затратам № п/п 1 и 3 согласно ПД [186]	301	112	111	118	113
		756				

№ п/п	Статьи затрат	Стоимость, млн. руб. в ценах 2000 г по очередям				
		1 очередь (45 тыс. м³)	2 очередь (90 тыс. м³)	3 очередь (135 тыс. м³)	4 очередь (180 тыс. м³)	5 очередь (225 тыс. м³)
	Всего по затратам № п/п 2, 3	616	427	426	433	428
		2330				

Для перспективного типового ППЗРО для определения его полной стоимости к затратам на сооружения захоронения для каждой очереди строительства прибавлена стоимость объектов инфраструктуры согласно данным таблицы 4.8. Данные по стоимости перспективного типового ППЗРО с учётом затрат на создание объектов инфраструктуры приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Данные по стоимости перспективного типового ППЗРО

№ п/п	Статьи затрат	Стоимость, млн. руб. в ценах 2000 г. по очередям строитель- ства				
		1 очередь (45 тыс. м³)	2 очередь (90 тыс. м³)	3 очередь (135 тыс. м³)	4 очередь (180 тыс. м³)	5 очередь (225 тыс. м³)
2	Полная стоимость всех ИББ и элементов соору- жений захоронения (по данным раздела 2.4)	328	328	328	328	328
3	Объекты инфраструктуры	206	17	16	23	18
4	Всего по затратам № п/п 1 и 3 согласно ПД [189]	534	345	344	351	346
		1920				

Зависимости удельных затрат на захоронение РАО от вместимости сооружений захороне-
ния для заглублённого ППЗРО по типу ППЗРО в Челябинской обл. и для перспективного
наземного ППЗРО приведены на рисунке 4.18.

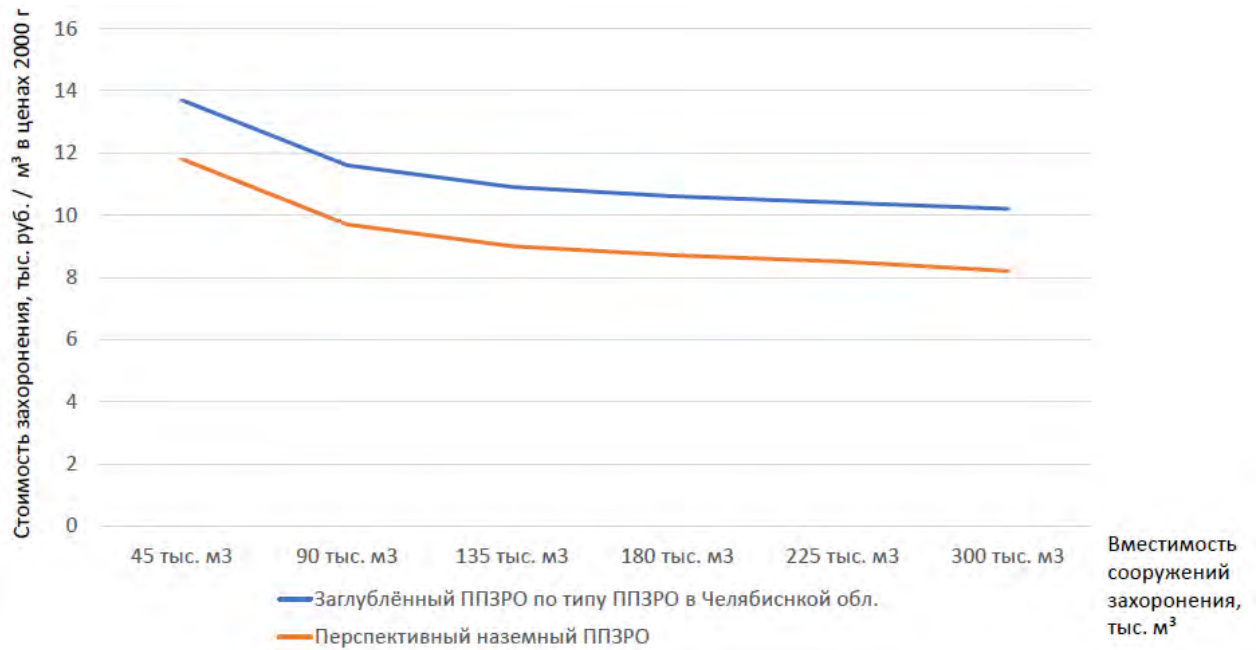


Рисунок 4.18 – Усреднённые удельные затраты на захоронение РАО классов 3 и 4

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).

Выводы к главе 4

Оценки безопасности и экономической эффективности выбранных технических решений по приповерхностному захоронению РАО классов 3 и 4 позволяют сделать вывод, что:

- предложенные в главе 3 решения по выбору способа захоронения РАО удовлетворяют требованиям безопасности российских норм и правил;
- предложенная конструкция модулей захоронения выдерживает внешние воздействия, включая падение самолёта массой около 5 т, что позволяет обеспечить безопасность модулей, загруженных РАО на этапе эксплуатации и после закрытия ППЗРО;
- решение по применению природных сорбентов по типу клиноптилолита позволяет снизить риски затопления упаковок РАО и отказаться от дорогостоящих и сложных в эксплуатации инспекционных галерей;
- предложения по дифференциации требований к ИББ для РАО классов 3 и 4 дают экономию не менее 20 % по сравнению с решениями, реализованными в проектах полузаглублён-

ных ППЗРО [5-7]. Применение контейнеров новой разработки типа КПН и КНГО для захоронения РАО класса 4 даёт основной экономический эффект по снижению стоимости ППЗРО.

Для предложенной конструкции сооружений захоронения решения по созданию покрывающего экрана целесообразно разрабатывать с учётом прогнозных величин проседания экрана, обусловленного наличием пустот в упаковках РАО согласно установленным в настоящей работе зависимостям.

При выполнении оценок безопасности подтверждена перспективность применения цеолитовых сорбентов в качестве материала подстилающего экрана и отмечена целесообразность заполнения таким материалом пространства до границ глинистого слоя покрывающего экрана.

Отмечено, что основную потенциальную опасность (основной вклад в формирование потенциальных дозовых воздействий на население) при захоронении РАО представляют долгоживущие радионуклиды, что необходимо учитывать в перспективе при разработке локальных критериев приемлемости ППЗРО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 НАО и САО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов в мире намечается тенденция на использование наземных ППЗРО, как наиболее экономичных и универсальных в части требований к гидрогеологическим характеристикам площадки захоронения;

- окончательная изоляция НАО и САО с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов, 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 ППЗРО, определены факторы, влияющие на стоимость захоронения, определен вклад каждого ИББ в стоимость ППЗРО. Показано, что для российских проектов ППЗРО наибольший вклад в стоимость захоронения вносят контейнеры, ограждающие конструкции и покрывающие экраны. На основе анализа функций барьеров безопасности предъявлены требования к каждому ИББ и перечислены ключевые параметры ИББ, которые должны контролироваться при создании ППЗРО.

При исследовании технико-экономических показателей ППЗРО и основных требований к ИББ выявлено, что:

- стоимость существующих контейнеров для НАО завышена 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, в связи с чем целесообразно рассмотреть варианты оптимизации компоновки модулей захоронения и со-

здания одного экрана для нескольких очередей строительства и сооружения захоронения ППЗРО;

– требуется приведение в соответствие сроков службы ограждающих конструкций и сроков службы упаковок РАО класса 3 (в разработанных российских проектах ППЗРО ограждающие конструкции рассчитаны на 100 лет, а контейнеры для РАО класса 3 не менее чем на 300 лет).

3) Предложено использование полимерных и композитных контейнеров для захоронения РАО класса 4, дающих экономию затрат на приобретение контейнеров, а также затрат на передачу РАО класса 4 на захоронение. Разработаны и обоснованы предложения по экономичному способу контейнеризации и окончательной изоляции РАО классов 3 и 4, образующихся на АЭС с реакторами ВВЭР-1200.

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) По разработанным автором настоящего диссертационного исследования исходным данным и расчётным моделям выполнены оценки эксплуатационной безопасности ППЗРО, оценки миграции радионуклидов из сооружений захоронения, оценки устойчивости модулей захоронения к внешним воздействиям, прогнозы проседания покрывающего экран в зависимости от заполняемости упаковок РАО. Результаты оценок безопасности показали, что в ППЗРО могут быть размещены РАО классов 3 и 4, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации АЭС, согласно критериям классификации, установленным постановлениями Правительства РФ №1069 от 19.10.2012 г. [2] и №1929 от 29.10.2022 г. [3].

6) 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. Определён облик сооружений захоронения РАО классов 3 и 4 для будущих проектов ППЗРО. Оптимизированы транс-

портно-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.

Разработанные решения по захоронению РАО классов 3 и 4 соответствуют современным тенденциям развития технологий окончательной изоляции РАО, федеральным нормам и правилам, регулирующим обращение с РАО, санитарным правилам в области обеспечения радиационной безопасности, а также законодательству Российской Федерации об охране окружающей среды.

Список сокращений и условных обозначений

АЭС	– Атомная электростанция
ВЭ	– Вывод из эксплуатации
ВВЭР	– Водно-водяной энергетический реактор
ВЭ	– Вывод из эксплуатации
ГОСТ	– Государственный стандарт
ДЖН	– Долгоживущие нуклиды
ЕГС	– Единая государственная система
ЖРО	– Жидкие радиоактивные отходы
ЖЦ	– Жизненный цикл
ИББ	– Инженерные барьеры безопасности
ИОС	– Ионообменные смолы
КЖН	– Короткоживущие нуклиды
КМЗ	– Контейнер металлический защитный
КНГО	– Контейнер невозвратный для горючих отходов класса 4
КПН	– Контейнер полимерный невозвратный
МАГАТЭ	– Международное агентство по атомной энергии
МКР	– Мягкий контейнер разовый
МРЗ	– Максимальное расчётное землетрясение
НАО	– Низкоактивные отходы
НД	– Нормативный документ
НЗК	– Невозвратный защитный контейнер
НИР	– Научно-исследовательская работа
НП	– Нормы и правила

ОИАЭ	– Объекты использования атомной энергии
ОНАО	– Очень низкоактивные отходы
ОНРАО	– Очень низкоактивные радиоактивные отходы
ООБ	– Отчет по обоснованию безопасности
ОСПОРБ	– Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности
ОЯТ	– Отработавшее ядерное топливо
ПГЗРО	– Пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов
ПГЗЖРО	– Пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов
ПЗРО	– Пункт захоронения радиоактивных отходов
ПНД	– Полиэтилен низкого давления
ППЗРО	– Приповерхностный пункт захоронения радиоактивных отходов
ПП	– Постановление правительства
РАО	– Радиоактивные отходы
РБ	– Руководство по безопасности
РВ	– Радиоактивные вещества
РФ	– Российская Федерация
САО	– Среднеактивные отходы
СЗЗ	– Санитарно-защитная зона
ТРО	– Твердые радиоактивные отходы
УВ	– Уровень вмешательства
УГВ	– Уровень грунтовых вод
УПВ	– Уровень подземных вод
ФЗ	– Федеральный закон
ФНП	– Федеральные нормы и правила

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестой национальный доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. – Москва, 2020. – URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/russian-federation-7rm_russian.pdf (дата обращения 10.04.2025).
2. Российская Федерация. Правительство. 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: постановление Правительства Рос. Федерации от 19.10.2012 г. № 1069 // Собрание законодательства Рос. Федерации. – 2012. – № 44. – Ст. 6017.
3. Российская Федерация. Правительство. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069: постановление Правительства Рос. Федерации от 29.10.2022 г. № 1929 // Собрание законодательства Рос. Федерации. – 2022. – № 45. – Ст. 7713.
4. Российская Федерация. Законы. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон № 190-ФЗ от 11.07.2011 г.: принят Гос. Думой 29.06.2011 г.: одобрен Советом Федерации 06.07.2011 г. // Техэксперт: профессиональная справочная система. – Москва, 2011. – Загл. с титул. экрана.
5. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию первой очереди стационарного объекта, предназначенного для захоронения радиоактивных отходов – приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов, отделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) Том 1. – URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 10.04.2025).
6. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Челябинская область, Озерский городской округ. Том 1. – URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 10.04.2025).
7. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Томская область, город-

- ской округ, ЗАТО Северск. Том 1. – URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 10.04.2025).
8. Тимофеев-Ресовский Н.В., Савич А.В., Шальнов М.И. Введение в молекулярную радиобиологию (физико-химические основы). – М.: Медицина. – 1981. – 320 с.
 9. Радиобиология. Биологическое действие ионизирующих излучений. Сер.: Итоги науки и техники. Биологические науки / Под ред. А.М. Кузина. – М. – 1957. – 436 с.
 10. Циммер К.Г. Проблемы количественной радиобиологии / Под ред. В.И. Корогодина. – Москва: Госатосиздат. – 1962. – 100 с.
 11. Алексахин Р.М., Удалова А. А., Гераськин С.А. Учение В.И. Вернадского о биосфере и современные проблемы радиоэкологии // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2014. – № 54 (4). – С. 432-439.
 12. Клечковский В.М., Поликарпов Г.Г., Алексахин Р.М. и др. Радиоэкология. – М. – 1971. – 420 с.
 13. Хлопин В.Г. Избранные труды. Том 1. Труды в области радиохимии. – Москва; Ленинград.: Академия наук СССР. – 1957. – 372 с.
 14. Белюстина А.А., Белинская Ф.А. Академик Б.П. Никольский. Жизнь. Труды. Школа. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета. – 2000. – 293 с.
 15. Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. Учебник для вузов. – СПб.: Наука. – 2020. – 559 с.
 16. Калмыков С.Н. Роль коллоидных частиц в миграции актинидов с подземными водами: автореферат ... доктора химических наук: 02.00.14. – Москва. – 2008. – 49 с.
 17. Савоненков В.Г., Андерсон Е.Б., Шабалёв С.И. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов. – Санкт-Петербург.: Инфо Ол. – 2012. – 215 с.
 18. Рахимов Р. З., Рахимова Н. Р., Ожован М. И. Строительные материалы в иммобилизации радиоактивных отходов и защите от радиации: учебное пособие для вузов. – Санкт-Петербург.: Лань. – 2025. – 256 с.
 19. Мартынов К. В., Жаркова В. О., Захарова Е. В. Фильтрация воды через глиняные барьеры безопасности ПЗРО // Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Москва, 18—19 апреля 2018 года. – М.: ГЕОХИ РАН. – 2018. – С. 425-428
 20. Сорокин В.Т. Разработка и научное обоснование стратегии и технических решений по обращению с низко- и среднеактивными отходами на завершающих стадиях: диссертация ... доктора технических наук: 25.00.36. – Санкт-Петербург. – 2008. – 269 с

21. Чистяков В.Н. Эколого-экономическое обоснование выбора вариантов обращения с твердыми и отвержденными радиоактивными отходами: автореферат ... канд. экономических наук: 08.00.05. – Москва. – 2012. – 23 с.
22. Гупало В.С., Фещенко А.И. Техничко-экономическое обоснование региональных производственно-логистических инфраструктур обращения с радиоактивными отходами в ЕГСО РАО // Вестник Российской Академии Естественных Наук. – 2017. – № 17 (2). – С. 30-34.
23. Нечаев А.Ф., Смирнов Н.В. Экономика заключительной стадии жизненного цикла ядерных и радиационно-опасных объектов. – СПб: Инфо Ол. – 2014. – 112 с.
24. Российская Федерация. Правительство. Об определении порядка и сроков создания единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами: постановление Правительства Рос. Федерации от 19.11.2012 г. № 1185 // Собрание законодательства Рос. Федерации. – 2012. – № 48. – Ст. 6693.
25. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов, принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14: утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22.08.2014 г. № 379. // Техэксперт: профессиональная справочная система. – Загл. с титул. экрана.
26. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов, требования безопасности. НП-069-14: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 06.06.2014 г. № 249. // Техэксперт: профессиональная справочная система. – Загл. с титул. экрана.
27. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2014 г. № 572. // Техэксперт: профессиональная справочная система. – Загл. с титул. экрана.
28. РБ-117-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов: утв. приказом Ростехнадзора от 14.12.2016 г. № 531. – Москва, 2016.
29. РБ-155-20. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по порядку, объему, методам и средствам контроля радиоактивных отходов в целях подтверждения их соответствия критериям приемлемости для захоронения: утв. приказом

- Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30.06.2020 № 253. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2020. – 72 с.
30. ГОСТ Р 52037-2003. Государственный стандарт Российской Федерации. Могильники приповерхностные для захоронения радиоактивных отходов. Общие требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 24 с.
 31. ГОСТ Р 59968-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Радиоактивные отходы атомных станций определение радиационных характеристик для передачи на захоронение. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022. – 40 с.
 32. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами, общие положения. НП-058-14: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 05.08.2014 г. № 347. – М.: Ростехнадзор, 2015. – 15 с.
 33. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы. –М. Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.
 34. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-17: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30.11.2017 г. № 514. – М.: Ростехнадзор, 2017. – 66 с.
 35. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ). НП-016-05: утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 02.12.2005 г. № 11. – М.: Ростехнадзор, 2005. – 12 с.
 36. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01: утв. постановлением Госатомнадзора России от 19.10.2001 г. № 9. – М.: Ростехнадзор, 2001. – 28 с.
 37. Российская Федерация. Законы. Об использовании атомной энергии: Федеральный закон № 170-ФЗ: принят Гос. Думой 20.10.1995 г. – Москва, 1995. – 71 с.
 38. Российская Федерация. Правительство. Об утверждении положения о передаче радиоактивных отходов на захоронение, в том числе радиоактивных отходов, образовавшихся при осуществлении деятельности, связанной с разработкой, изготовлением, испытанием, эксплуатацией и утилизацией ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения: постановление Правительства Рос. Федерации от 10.09.2012 г. № 899 // Собрание законодательства РФ. – 17.09.2012 – № 38. – Ст. 5111.

39. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. НП-100-17: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.06.2017 г. № 218. – М. Ростехнадзор, 2017. – 122 с.
40. Российская Федерация. Законы. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 190-ФЗ: принят Гос. Думой 22.12.2004 г.: одобрен Советом Федерации 24.12. 2004 г. – Москва: ЦЕНТРМАГ, 2025. – 628 с.
41. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон № 384-ФЗ: принят Гос. Думой 23.12.2009 г.: одобрен Советом Федерации 25.12.2009 г. – Москва, 2009. – 25 с.
42. Российская Федерация. Правительство. Об утверждении перечня организаций, которые могут осуществлять захоронение радиоактивных отходов: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 07.12.2015 № 2499-р. // Техэксперт: профессиональная справочная система. – Загл. с титул. экрана.
43. Установление категории потенциальной опасности радиационного объекта. Методические указания. МУ 2.6.5.08-2019: утв. Главным санитарным врачом ФМБА России от 04.04.2019 г. – Москва, 2019. – 13 с.
44. Российская Федерация. Правительство. Положение об отнесении объектов использования атомной энергии к отдельным категориям и определении состава и границ таких объектов: постановление Правительства Рос. Федерации от 30.12.2012 г. № 1494 // Собрание законодательства Рос. Федерации. – 2013. – № 2. – Ст. 99.
45. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. – Москва, 2009. – 100 с.
46. РБ-141-18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по разработке критериев приемлемости радиоактивных отходов для захоронения при проектировании пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.05.2018 г. № 228. – Москва, 2019.
47. ГОСТ 28177-89. Межгосударственный стандарт. Глины формовочные бентонитовые. Общие технические условия: утв. и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.06.89 г. № 2263 // Техэксперт: профессиональная справочная система. – Загл. с титул. экрана.

48. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с изменениями № 1, 2): Свод правил: утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19.12.2018 г. № 832/пр. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 124 с.
49. ГОСТ 27751-2014. Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения: утв. Приказом Росстандарта от 11.12.2014 г. № 1974-ст. – М. : Стандартинформ, 2019. – 16 с.
50. ГОСТ 31384-2017. Межгосударственный стандарт. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования: утв. Приказом Росстандарта от 05.10.2017 г. № 1361-ст. – М. Стандартинформ, 2010. – 50 с.
51. Материалы оценки воздействия на окружающую среду // ФГУП «НО РАО». – URL: <http://www.norao.ru/ecology/> (дата обращения 10.04.2025).
52. Российская Федерация. Законы. Земельный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 136-ФЗ: принят 28.09.2001 г.: одобрен Советом Федерации 10.10.2001 г. // Собрание законодательства Рос. Федерации. – 2001 – № 44. – Ст. 4147, 4148.
53. Myasoedov, B. F., Novikov, A. P. Main sources of radioactive contamination in Russia and methods for their determination and speciation // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 229. – 1998. – 33 p.
54. Особые радиоактивные отходы. — Под общей редакцией И.И. Линге. – М.: ООО «САМ полиграфист». – 2015. – 240 с.
55. Пронь И.А., Коновалов В.Ю. Опыт эксплуатации приповерхностного пункта захоронения РАО 3 и 4 классов // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 4 (5). – С. 8-14.
56. Ильина О.А., Крупская В.В., Винокуров С.Е. и др. Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. – 2019. – № 4 (9). – С. 71-84.
57. 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.
58. Прозоров Л.Б. Оценка состояния хранилищ РАО приповерхностного типа // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – 2011. – № 2. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2013/05/17/41640> (дата обращения 01.04.2025).
59. 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.
60. Анисимов Н.А., Куваев А.А. Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 3 (20). – С. 97-106.
 61. Игин И.М., Минин А.В., Бамборин М.Ю., Кузьмин Е.В., Трофимова Ю.В. Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 3 (20). – С. 50-60.
 62. 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.
 63. Захоронение радиоактивных отходов. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и окружающей среды. Конкретные требования безопасности № SSR-5: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2011. – 76 с.
 64. Пункты приповерхностного захоронения радиоактивных отходов. Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды. Специальное руководство по безопасности № SSG-29: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2024. – 125 с.
 65. Мониторинг пунктов захоронения радиоактивных отходов и надзор над ними. Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды. Специальное руководство по безопасности № SSG-31: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2024. – 85 с.
 66. Обоснование безопасности и оценка безопасности захоронения радиоактивных отходов. Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды Специальное руководство по безопасности № SSG-23: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2024. – 146 с.
 67. Система менеджмента для захоронения радиоактивных отходов. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Руководство по безопасности № GS-G-3.4: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2015. – 88 с.
 68. Принципы и подходы, применяемые при проектировании пунктов захоронения радиоактивных отходов. Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии № NW-T-1.27: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2024. – 99 с.

69. Классификация радиоактивных отходов. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Руководство по безопасности № GSG-1: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2014. – 54 с.
70. Политика и стратегии обращения с радиоактивными отходами. Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии № NW-G-1.1: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2012. – 80 с.
71. Состояние и тенденции в области обращения с РАО и ОЯТ. Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии № NW-T-1.14: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2022. – 88 с.
72. Определение пределов активности при захоронении радиоактивных отходов в пунктах приповерхностного захоронения № IAEA-TECDOC-1380. Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2003. – 152 с.
73. Оценка безопасности объектов и деятельности. Нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды. Общие требования безопасности № GSR Part 4: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2016. – 46 с.
74. Порядок и способы закрытия пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов № IAEA-TECDOC-1260: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2001. – 96 с.
75. Характеристики инженерных барьерных материалов в пунктах приповерхностного захоронения радиоактивных отходов № IAEA-TECDOC-1255: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2001. – 56 с.
76. Технические аспекты, связанные с проектированием и строительством инженерных барьеров для защиты окружающей среды. Серия технических отчетов № 493: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2023. – 163 с.
77. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Серия норм безопасности МАГАТЭ № WS-R-1, IAEA: Международное агентство по атомной энергии. – Вена, 2003. – 38 с.
78. Chino P., Duret F., Voinis S. The Centre de la manche disposal facility: entering into the institutional control period // WM'99 conference, February 28 - march 4. –1999.
79. Jousselin D., Medal G., Augustin X. French Experience in Design and Construction of Near-Surface Disposal Facilities for Low-Level Waste // INIS IAEA, NCL Collection. – 200-213 p. – URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/050/26050947.pdf (дата обращения 02.04.2025).

80. ATOMECO // Andra's Disposal Facilities Feedback of 40-year Operations in France, National Radioactive Waste Management Agency. – Moscow, 2013.
– URL: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentetion_31_10_2013/Bolia.pdf (дата обращения 02.04.2025).
81. Andra: A Collective International Dynamic for The Disposal of Radioactive Waste, Aube Waste Disposal Facility (CSA), – URL: <https://international.andra.fr/operational-facilities/aube-waste-disposal-facility-csa/concept-and-design> (дата обращения 02.04.2025).
82. Ouzounian G., Ozanam O. Disposal project for Low-Level Long-Lived Radioactive Waste in France // WM 2009 Conference, March 1 – 5, 2009, Phoenix, AZ.
83. Portier J.M. ANDRA's Centre de l'Aube: Design, construction, operation of a state of the art surface disposal facility for low and intermediate level waste // Report IAEA-CSP--6/C. – 2001.
84. Schacherer Laurent. From waste acceptance to disposal CSA and Cires Andra International Training Sessions, – URL: <https://alara.ee/wp-content/uploads/2018/08/konditioneeriminePrantsusmaa.pdf> (дата обращения 02.04.2025).
85. Navarro M., Gómez F., García E. Lessons Learned From the Operation of a LILW National Disposal Centre: The Cabril and the Spanish Case // ASME 2009 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, October 11–15, 2009, Liverpool, UK.
86. Zuloaga P. Low- and intermediate disposal in Spain - licensing and safety aspects // NETEC workshop on shallow land disposal technology, Taejon, Korea. – 1997. – p. 183-220.
87. Low and intermediate waste management in Spain.
– URL: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2002/ENAN/E05/E05_579.PDF (дата обращения 02.04.2025).
88. B25 project. Near Surface Repository for Low and Intermediate Level Short-lived Radioactive Waste. – URL: <https://www.iae.lt/en/b25-project.-near-surface-repository-for-low-and-intermediate-level-short-lived-radioactive-waste/470> (дата обращения 02.04.2025).
89. Reference Design for a Near Surface Repository for Low- and Intermediate- Level Short Lived Radioactive Waste in Lithuania. SKB, SWECO International, Westinghouse Atom Joint Venture, LT NSR Final Project Report, 2002.
90. Ziehm R., Pichurin S. Engineered near surface disposal facility of the industrial complex for solid radwaste management at Chernobyl nuclear power plant // WM'03 Conference, February 23–27, 2003, Tucson, AZ.
91. Radioactive waste management in rep. of Korea. – URL: https://www.oecd-neo.org/rwm/profiles/Korea_report_web.pdf. (дата обращения 02.04.2025).

92. Biurrun E., Gonzalez E., Stefanova I. The national disposal facility. A State-of-the-Art Solution for Bulgaria's Radioactive Waste.
– URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/079/45079187.pdf (дата обращения 02.04.2025).
93. Design and Construction of a Loess-Cement Cushion as an Integral Component of an SL-LILW Repository – 16077 // WM'2016 Conference, March 6 – 10, 2016, Phoenix, Arizona, USA.
94. Пронкин Н.С., Шарафутдинов Р.Б., Гераскин Н.И. Регулирование безопасности обращения с радиоактивными отходами: Учебное пособие / Под ред. Н.С. Пронкина. – М: НИЯУ МИФИ. – 2011. – 264 с.
95. Disposal Aspects of Low and Intermediate Level Decommissioning Waste. Results of a coordinated research project 2002–2006. № IAEA-TECDOC-1572: International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2007. – 44 p.
96. Preter P.D., Wacquier W., Cool W. The Belgian Program for Low and Intermediate Short Lived Waste Management: From 1985 to License Application // ASME 2013, 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, September 8–12, 2013, Brussels, Belgium.
97. The Long-term Radiological Safety of a Surface Disposal Facility for Low-level Waste in Belgium / Nuclear Energy Agency, France. – 2012. – 98 p.
98. General Data required under Article 37 of the Euratom Treaty. Repository for the surface disposal of radioactive waste in Dessel, Belgium: Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials. – 2019. – URL :<https://afcn.be/fr/system/files/2019-11-14-euratom-art37-rapport.pdf> (дата обращения 02.04.2025).
99. ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials. – 2012. – 411 p.
100. Low-Level Radioactive Waste Site Post-Closure Activities – URL: https://dpbh.nv.gov/Reg/Low-Level-Waste/Low-Level-Waste_-_Home/ (дата обращения 02.04.2025).
101. Finster M., Kamboi S. International low level waste disposal. Practices and facilities. Fuel cycle research & development // Prepared for U.S. Department of Energy. Used Fuel Disposition Campaign. Argonne National Laboratory, October 7, 2011. – 128 p.
102. Locations of Low-Level Waste Disposal Facilities // U.S.NRC. – 2020. – URL: <https://www.nrc.gov/waste/llw-disposal/licensing/locations.html> (дата обращения 02.04.2025).
103. Backgrounder on Radioactive Waste // U.S.NRC. – 2024. – URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/radwaste.html> (дата обращения 02.04.2025).

104. Near Surface Disposal Facility – Chalk River Laboratories // Government of Canada: the official website of the Government of Canada. – URL: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/research-reactors/chalk-river/near-surface-disposal-facility-project/> (дата обращения 02.04.2025).
105. Texas Compact Waste Facility (CWF) // Waste Control Specialists LLC (WCS). – 2023. – URL: <https://www.wcstexas.com/about/our-facilities/facilities/> (дата обращения 02.04.2025).
106. U.S.NRC // USA Codes Federal Regulation (CFR's): 10 CFR 61.55 – Waste classification. – 2021/ – URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part061/part061-0055.html> (дата обращения 02.04.2025).
107. Coyle A., Grimwood P. D., Paul W. J. Waste acceptance policy and operational developments at the UK's Drigg LLW disposal site // Planning and operational of Low Level Waste Disposal Facilities, symposium, June 17 – 21, 1996, Vienna.
108. Managing radioactive waste with geological disposal // GOV.UK. – 2018. – URL: <https://www.gov.uk/guidance/why-underground> (дата обращения 02.04.2025).
109. Uchida M. New Regulation for Intermediate Depth Disposal and Future Issues in Japan: Regulatory Standard and Research Department // Secretariat of Nuclear Regulation Authority (NRA), Japan – 2018. – URL: https://ncrponline.org/wp-content/themes/ncrp/PDFs/2018/NCRP-HPS_Workshop_2-2018_Presentations.pdf (дата обращения 02.04.2025).
110. Japan nuclear fuel limited // Low-Level Radioactive Waste Disposal. – URL: <https://www.jnfl.co.jp/en/business/llw/> (дата обращения 02.04.2025).
111. SURAO // Dukovany repository. – URL: <https://www.surao.cz/en/public/operational-repositories/dukovany-repository/> (дата обращения 02.04.2025).
112. Wattal P.K. Indian programme on radioactive waste management // Indian Academy of Sciences. Sadhana. – Vol. 38. – Part 5. – October 2013. – P. 849–857.
113. Near surface disposal of radioactive solid waste // Guide № AERB/NRF/SG/RW-4 Atomic Energy Regulatory Board. –Mumbai-400 094. –India. – May 2006.
114. Vaalputs National Radioactive Waste Disposal Facility. Public Information Document (PID). NRWDI-COM-0001, Rev.1. – 43 p.
115. Kuizi W., Chunying H., Baozhen L., Tingjun L. Northwest disposal site for LLW and ILW in China radioactive impact assessment: Bejjin Institute of Nuclear Engeneering. – China. – P. 221-238.
116. Torres P., Cahen B., Dutzer M. The Cires Facility in Morvilliers: from a VLL Waste Disposal Facility to the Development of Industrial Activities // WM'2015 Conference, March 15-19, 2015, USA, Arizona.

117. Beceiro A.R. Disposal solutions implemented for VLLW: ENRESA // Science and Technology for Safe and Sustainable Solutions, September 2014, Vienna, Austria. – URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2014/cn219/Presentations/14Beceiro.pdf> (дата обращения 02.04.2025).
118. ARAO // Low- and intermediate-level radioactive waste disposal facility at Vrbina, Krško. – URL: <https://arao.si/en/kljucni-podatki-o-odlagaliscu/> (дата обращения 02.04.2025).
119. Duhovnik B., Spiler J. Preliminary Design of the Vrbina LILW Repository // International Conference Nuclear Energy for New Europe 2010, September 6-9, 2010, Slovenia. – URL: <https://arhiv.djs.si/proc/port2010/pdf/902.pdf> (дата обращения 02.04.2025).
120. The Final Repository SFR: This is where Sweden keeps its radioactive operational waste // SKB. – URL: <https://skb.com/our-operations/sfr/> (дата обращения 02.04.2025).
121. POSIVA, Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa nuclear power plants. Summary of operations in 2012 (2012). – URL: <https://cms.posiva.fi/posivas-safety-case-introduction/common-introduction-to-safety-case> (дата обращения 02.04.2025).
122. Korea Radioactive Waste Agency (KORAD). – URL: https://www.korad.or.kr/resources/ebooks/brochure2023/korad_brochure_eng_2023.pdf (дата обращения 02.04.2025).
123. Baksay A. Low and intermediate level waste disposal in Hungary // International Workshop on the Safe Disposal of Low Level Radioactive Waste ASN Headquarters, Montrouge, France, February 2015. – URL: [https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Waste%20Management/Feb%202015%20WS%20on%20LLW%20disposal/Day%202\)%20Hungary.pdf](https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Waste%20Management/Feb%202015%20WS%20on%20LLW%20disposal/Day%202)%20Hungary.pdf) (дата обращения 02.04.2025).
124. Duna-Drava cement // Radioactive waste storage at Bataapati. – URL: <https://www.duna-drava.hu/en/radioactive-waste-storage-bataapati> (дата обращения 02.04.2025).
125. SURAO // Richard repository. – URL: <https://www.surao.cz/en/public/operational-repositories/richard-repository/> (дата обращения 02.04.2025).
126. BGE // Asse II mine. – URL: <https://www.bge.de/en/asse/> (дата обращения 02.04.2025).
127. BGE // Morsleben repository. – URL: <https://www.bge.de/en/morsleben/> (дата обращения 02.04.2025).
128. BGE // Konrad repository. – URL: <https://www.bge.de/en/konrad/> (дата обращения 02.04.2025).
129. Deep geological repository: safe underground disposal of radioactive waste // Nagra. – URL: <https://nagra.ch/en/knowledge-centre/deep-geological-repository/> <https://www.bge.de/en/konrad/> (дата обращения 02.04.2025).

130. Gierszewski, P. Overview of Ontario Power Generation's Proposed Deep Geologic Repository for Low & Intermediate Level Waste at the Bruce Site, Ontario, Canada-8517 // WM'2008 Conference, February ,2008. –URL: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2008/pdfs/8517.pdf> (дата обращения 02.04.2025).
131. Managing Radioactive Waste // IAEA [official website]. – URL: <https://web.archive.org/web/20120125062648/http://www.iaea.org/Publications/Factsheets/English/manradwa.html> (дата обращения 02.04.2025).
132. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО: ФГУП «НО РАО» – М.: Комтехпринт, 2015. – 208 с.
133. Disposal of Low- and Intermediate-Level Waste: International experience [Electronic resource]. – URL: https://radwasteplanning.ca/sites/default/files/lilw_white_paper_final.pdf (дата обращения 02.04.2025).
134. Bergstrom U., Pers K., Almen Y. International perspective on repositories for low level waste: Report of SKB International AB: K-11-16. – December, 2011. – 78 p.
135. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Технологии окончательной изоляции радиоактивных отходов: европейский опыт и тенденции // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 4 (5). – с. 24–32.
136. Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste. IAEA-TECDOC-1256 // International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2001. – 60 p.
137. Underground disposal concepts for small inventories of intermediate and high level radioactive waste. IAEA tecdoc series. IAEA-TECDOC-1934 // International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2020. – 92 p.
138. 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.
139. Containers for Packaging of Solid and Intermediate Level Radioactive Wastes. Technical reports series №355. IAEA. – Vienna, 1993. – 67 p.
140. Radioactive waste management disposal of low level RAW. Mochovce Site. Nuclear Facility. National Radioactive Waste Repository (NRWR). – URL: <https://www.javys.sk/data/web/dokumenty/Publikacie/brozura-2016/ukladanie-rao-eng.pdf> (дата обращения 02.04.2025).
141. The Chernobyl Gallery: Buriakivka – radioactive waste facility. – URL: www.chernobylgallery.com/galleries/buriakivka-radioactive-waste-disposal-facility/ (дата обращения 02.04.2025).

142. 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. – № 5(101). – 2024. – С. 44-47.
143. Ledoux M.R., Cade M.S. Licensing and Operations of the Clive, Utah Low-level Containerized Radioactive Waste Disposal Facility - A Continuation of Excellence / WM'02 Conference, February 24-28, 2002 Tucson, AZ.
144. Bulk Waste Disposal and Treatment Facilities. Waste Acceptance Criteria. Revision 10. Energy Solutions Clive, Utah. – 2015. – 58 p.
145. Benson C., Philip J., Gupta D., Waganer L. Lifecycle Waste Disposal and Decommissioning costs for ARIES systems code, Aries-Pathways Project Meeting, May 28-29, 2008. – 21 p.
146. Supplemental Information on the Low Level Burial Grounds, Environmental Restoration Disposal Facility, Borrow Pits, Trench Liners, and Disposal Facility Barriers // Final HSW EIS January 2004.
147. Low-Level Radioactive Waste Repositories: An Analysis of Costs // Nuclear Energy Agency, OECD. – 1999. – 179 p.
148. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle // Nuclear Energy Agency. OECD. – 2013. – 193 p.
149. APM 2016. Lifecycle cost estimate. Update Summary Report // Nuclear Waste management organization. APM-REP-00440-0202. Canada. – 2016. – 309 p.
150. Analysis of the total system life cycle cost of the civilian radioactive waste management program, fiscal year 2007 // U.S. Department of Energy. Office of Civilian Radioactive Waste Management Washington, D.C. DOE/RW-0591. – 2008. – 66 p.
151. Cost considerations and financing mechanisms for the Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste // IAEA. IAEA-TECDOC-1552. – 2007. – 39 p.
152. Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste // IAEA. IAEA-TECDOC-1308. – 2002. – 32 p.
153. Вахрушева К. Сравнение стоимости и методики расчета платы за захоронение РАО в России и других странах // Рабочий документ ООО «Беллона». – 2016.
154. Zeleznik N., Lokner V., Levenat I. Comparison of costs for LILW Repository Development // 22 International Conference Nuclear Energy for New Europe, September 9-12, Slovenia. – 2013.
155. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Стоимость захоронения РАО: зарубежные оценки // Радиоактивные отходы. – 2019. – № 6. – С. 46-55.

156. BGE // Gorleben mine. – URL: <https://www.bge.de/en/the-gorleben-mine/> (дата обращения 02.04.2025).
157. Eriksson L.G. The WIPP Disposal Decision Plan: the Successful Road Map for Transparent and Credible. Decision-Making. – URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/086/34086332.pdf (дата обращения 02.04.2025).
158. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. НП-053-16: утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.09.2016 г. № 388. – М.: Ростехнадзор, 2017. – 114 с.
159. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-019-15: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.06.2015 г. № 242 – М.: Ростехнадзор, 2015. – 22 с.
160. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-020-15: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.06.2015 г. № 243. – М.: Ростехнадзор, 2015. – 14 с.
161. ГОСТ Р 50927-96. Государственный стандарт Российской Федерации. Отходы радиоактивные битумированные. Общие технические требования: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 18.07.1996 г. № 468. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 7 с.
162. ГОСТ Р 50926-96. Государственный стандарт Российской Федерации. Отходы высокоактивные отвержденные. Общие технические требования: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 18.07.1996 г. № 467. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 8 с.
163. ГОСТ Р 51883-2002. Государственный стандарт Российской Федерации. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 04.04.2002 г. № 129-ст. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 7 с.
164. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в

- организации. НП-067-16: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28.11.2016 г. № 503 – М.: Ростехнадзор, 2017. – 84 с.
165. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 (с Изменениями № 1, 3-7): Свод правил: утв. приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству от 25.12.2012 г. № 109/ГС. – Москва: Госстрой, ФАУ «ФЦС», 2012. – 196 с.
166. ГОСТ 13015-2012. Межгосударственный стандарт. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения: принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве (МНТКС) (дополнение N 1 к приложению В протокола от 04.06.2012 г. № 40). – М.: Стандартиформ, 2019. – 20 с.
167. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования по безопасности к строительным конструкциям зданий и сооружений атомных станций. НП-041-22: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26.12.2022 г. № 464. – М. Ростехнадзор, 2023. – 34 с.
168. РБ-042-24. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по обоснованию выбора и применению барьерных глинистых материалов в пунктах хранения радиоактивных отходов: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.02.2025 г. № 63. – Москва. – 2025.
169. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по обоснованию выбора инженерных барьеров безопасности на основе глинистых материалов для систем размещения и захоронения радиоактивных отходов (проект руководства по безопасности при использовании атомной энергии).
170. СТО 95 12094-2024. Стандарт государственной корпорации по атомной энергии «РОСАТОМ». Инженерные барьеры безопасности пунктов хранения и захоронения радиоактивных отходов на основе глинистых материалов. Контроль качества: утв. И введен в действие приказом Госкорпорации «Росатом» от 02.11.2024 г. №1/2086-П. – Москва. – 2024.– 14 с.
171. Стандарт государственной корпорации по атомной энергии «РОСАТОМ». Инженерные барьеры безопасности пунктов хранения и захоронения радиоактивных отходов на основе глинистых материалов. Нормы проектирования и расчет конструкций: документ находит-

- ся в стадии разработки (проект стандарта государственной корпорации по атомной энергии «РОСАТОМ»).
172. ГОСТ Р 51824-2001. Государственный стандарт Российской Федерации. Контейнеры защитные невозвратные. Для радиоактивных отходов из конструкционных материалов на основе бетона. Общие технические требования: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 12.11.2001 г. N 457-ст. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 11 с.
 173. Аналитический отчет о научно-исследовательской работе. Разработка рекомендаций по техническим решениям по сооружениям технологического назначения пункта захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС в соответствии с его концептуальным проектом // АО «КИС «ИСТОК». – Инв. № 24-03518. – 2024.
 174. Об утверждении Единых отраслевых методических указаний по установлению классов радиоактивных отходов для захоронения: Приказ Государственной корпорации по атомной энергии «РОСАТОМ» от 31.01.2024 г. №1/148-П. – Москва. – 2024.
 175. 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.
 176. Шарафутдинов Р.Б., Савельева Е.А., Свительман В.С. и др. Методические аспекты учета особенностей, событий и процессов природного и техногенного происхождения при обосновании долговременной безопасности системы захоронения РАО // Ядерная и радиационная безопасность. – 2018. – № 4 (90). – С. 1-14.
 177. 345 Механический завод: официальный сайт. – URL: <https://345mz.ru/kontejneryi-dlya-rao> (дата обращения 02.04.2025).
 178. Алексеев С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М.: Стройиздат. – 1990. – 320 с.
 179. Гатауллин Р. М., Давиденко Н. Н., Свиридов Н. В., Сорокин В. Т. и др. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности: монография / Под ред. Сорокина В. Т. — М.: Логос. – 2012. – 255 с.
 180. Степанова В.Ф. Долговечность бетона: Учебное пособие для вузов. – М: Ассоциация строительных вузов. – 2014. – 126 с.
 181. Долган М.И. Изменение свойств полимерных материалов в процессе старения при хранении. Товароведение и экспертиза товаров // Вестник Белорусского Государственного Экономического Университета. – 2016. – № 3(116)– С. 58-66.

182. Bart F. Cau-dit-Coumes C., Frizon F. Lorente S. Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage. – Springer Science+Business Media. – New York. – 2013. – 264 p.
183. ФГУП «НО РАО» // Тарифы на захоронение радиоактивных отходов на период с 2018 по 2022 годы. – URL: <http://www.norao.ru/about/tarify/> (дата обращения 15.04.2025).
184. Ильясов Д. Ф., Иванов А. Ю., Кузнецова Е. О., Будунова А. С., Степанян П. О., Михайленко А. А. Сравнительный анализ стоимости операций по обращению с РАО на российском и международном рынках // Радиоактивные отходы. – 2020. – № 4 (13). – С. 14-21.
185. Нассонов Г.П., Нечаев А.Ф. Экономические аспекты «обезвреживания» радиоактивных отходов // Известия СПбГТИ (ТУ). – № 24. – 2014. –URL: https://elib.biblioatom.ru/text/nassonov_ekonomicheskie-aspekty-rao_2014/p93/ (дата обращения 15.04.2025).
186. Проектная документация. Приповерхностный пункт захоронения твёрдых радиоактивных отходов 3 и 4 классов (Челябинская обл., Озёрский городской округ). Этапы строительства 1-5 // Уральский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон»-«УПИИ ВНИПИЭТ». – Инв. №318-204/ДСП. – 2019.
187. Методические указания по укрупнённой оценке стоимости работ по обращению с РАО. Приложение №3 к приказу ГК «Росатом» №1/1061-П.
188. 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.
189. Гусаков-Станюкович И.В. Сбалансированный ЯТЦ. АО «Техснабэкспорт» // опубликовано 19.09.2022 на портале AtomInfo.Ru. –URL: <http://www.atominfo.ru/newsz05/a0501.htm> (дата обращения 15.03.2024).
190. Линге И.И., Баринов А.С. О создании пунктов захоронения РАО в Европейской части России // Радиоактивные отходы. – 2024. – № 1 (26). – С. 8-15.
191. Луговская О.М., Д.Е. Павлов, С.А. Шестовская. Стратегия обращения с радиоактивными отходами в Республике Беларусь // Радиоактивные отходы. – 2023. – № 4 (25). – С. 72–80.
192. Нестеров А. Перспективная площадка для размещения пункта захоронения радиоактивных отходов будет определена к 2025 году. Беларусь сегодня // опубликовано 29.04.24 на сайте SB.BY/ – URL: <https://www.sb.by/articles/perspektivnaya-ploshchadka-dlya-razmeshcheniya-punkta-zakhoroneniya-radioaktivnykh-otkhodov-budet-op.html?ysclid=m4sll42d68911696864>
193. Учет метеорологических и гидрологических опасностей при оценке площадок для ядерных установок. Специальное руководство по безопасности № SSG-18. Нормы безопасно-

- сти МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды: Международное агенство по атомной энергии. – Вена, 2023. – 168 с.
194. Учёт метеорологических явлений при оценке площадок для атомных электростанций. Серия норм безопасности № NS-G-3.4: Международное агенство по атомной энергии. – Вена, 2005. – 36 с.
 195. Российская Федерация. Законы. О радиационной безопасности населения: Федеральный закон № 3-ФЗ: принят Гос. Думой 05.12.1995 г. // Техэксперт: профессиональная справочная система. – Москва, 1996. – Загл. с титул. экрана..
 196. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Размещение пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. (НП–060–05): утв. постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31.08.2004 г. № 3. – М. Ростехнадзор, 2005. – 5 с.
 197. Панов, Ю.Т. Экструзия полимеров и литье под давлением: Учебное пособие для вузов. – Москва: Издательство Юрайт. – 2024. – 131 с.
 198. Хабазин И.С., Блазнов А.Н. Технология изготовления полимерных изделий методом ротационного формования // Ползуновский Вестник. – №4 Т.1. – 2016. – С. 204.
 199. 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.
 200. ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75). Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве (МНТКС) 17.11.1994 г. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 11 с.
 201. ГОСТ 12730.5-2018. Межгосударственный стандарт Бетоны. Методы определения водонепроницаемости: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 29.11.2018 г. № 54). – М.: Стандартиформ, 2019. – 24 с.
 202. Кларк Р. Х. Радиологическая защита. Рекомендации международной комиссии по радиологической защите относительно обращения с радиологическими отходами // Бюллетень МАГАТЭ. – 42/3/2000. – С. 21-23 – URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull42-3/42304692123_ru.pdf (дата обращения 25.04.2025).
 203. Савоненков В.Г., Андерсон Е.Б., Шабалев С.И. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов. – Санкт-Петербург: РОСАТОМ. – 2012. – 215 с.

204. Милютин В.В., Гелис В.М., Некрасова Н.А. и др. Сорбция радионуклидов Cs, Sr, U и Pu на природных и модифицированных глинах // Радиохимия. – 2012. – Т.54. – №1. – С. 71-74.
205. Колесникова Л.Г., Ланкин С.В., Юрков В.В. Ионный перенос в клиноптилолите. – Благовещенск: Изд-во БГПУ. – 2007. – 113 с.
206. Safety Guide Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance: safety guide. RS-G-1.7: IAEA. – Vienna. – 2004. – 39 p.
207. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин. Программа для трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования (GeRa/V1). – Регистрационный номер № 443 от 17.04.2018 г. – Ростехнадзор.
208. Аналитический отчет о научно-исследовательской работе. Разработка предложений по концептуальному проекту пункта захоронения (хранения) радиоактивных отходов (кроме высокоактивных), образующихся в процессе эксплуатации и вывода из эксплуатации Белорусской АЭС, на основе референтных технологий и существующих проектов // Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ СНПО «Элерон»-«ВНИПИЭТ». – Инв. № Э18-05418. – 2018.
209. Самойлов А.А. Оценка принципиальной возможности отказа от глубинного захоронения «короткоживущей фракции» от переработки ОЯТ // доклад на заседании секции № 1 «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС № 10 «Экология и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом» по вопросу: «Ход реализации работ по продуктовому направлению сбалансированного ядерно-топливного цикла». – Москва. – 2023.
210. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин. Программа для расчета среднегодовых дозовых нагрузок на население (Доза 3.0). – Паспорт аттестации программного средства ФБУ «НТЦ ЯРБ» № 338 от 12.09.2013 г.
211. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин. Программный комплекс для анализа методом конечных элементов и автоматизированного проектирования (ABAQUS). – Паспорт аттестации программного средства ФБУ «НТЦ ЯРБ» № 486, дата выдачи 19.12.2019 г.
212. Гигиенические нормативы. Критерии оценки радиационного воздействия: утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 г. № 213.
213. Санитарные нормы и правила. Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энер-

- гии и источников ионизирующего излучения: утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.12.2013 г. № 137.
214. Санитарные нормы и правила. Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами: утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.12.2015 г. № 142.
215. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия: утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 03.12.2016 г. № 891/пр. // Техэксперт: профессиональная справочная система. – Москва, 2016. – Загл. с титул. экрана.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблицы и расчёты к диссертационному исследованию

Таблица А.1 – Перечень основных нормативных документов, требования которых распространяются на захоронение РАО

Обозначение документа	Наименование документа
ФЗ №190-ФЗ от 11.07.2011 г. [4]	Федеральный закон от 11.07.2011 г. №190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»
ПП №1069 от 19.10.2012 г. [2]	Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 года № 1069 «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»
ПП №1929 от 29.10.2022 г. [3]	Постановление Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 года № 1929 «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. N 1069»
НП-055-14 [25]	Захоронение радиоактивных отходов, принципы, критерии и основные требования безопасности
НП-069-14 [26]	Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов, требования безопасности
НП-093-14 [27]	Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения
РБ-117-16 [28]	Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов
РБ-155-20 [29]	Рекомендации по порядку, объему, методам и средствам контроля радиоактивных отходов в целях подтверждения их соответствия критериям приемлемости для захоронения
ГОСТ Р 52037-2003 [30]	Могильники приповерхностные для захоронения радиоактивных отходов. Общие требования
ГОСТ Р 59968-2021 [31]	Радиоактивные отходы атомных станций определение радиационных характеристик для передачи на захоронение
НП-058-14 [32]	Безопасность при обращении с радиоактивными отходами, общие положения
СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010) [33]	Основные санитарные правила и нормы обеспечения радиационной безопасности

Обозначение документа	Наименование документа
НП-064-17 [34]	Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии
НП-016-05 [35]	Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ)
НП-031-01 [36]	Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций
ФЗ №170-ФЗ от 21.11.1995 [37]	Федеральный закон от 21.11.1995 г. №170-ФЗ «Об использовании атомной энергии»
ПП №1185 от 19.11.2012 г. [24]	Постановление правительства от 19.11.2012 г. №1185 «Об определении порядка и сроков создания единой государственной системы обращения с РАО»
ПП №899 от 10.09.2012 г. [38]	Об утверждении положения о передаче РАО на захоронение, в том числе РАО, образовавшихся при осуществлении деятельности, связанной с разработкой, изготовлением, испытанием, эксплуатацией и утилизацией ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения: Постановление Правительства Рос. Федерации от 10.09.2012 г. № 899
НП-100-17 [39]	Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов
ГК РФ [40]	Федеральный закон от 29.12.2004 г. № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации»
ФЗ №384-ФЗ от 30.12.2009 г. [41]	Федеральный закон от 30.12.2009 г. №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»
Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.12.2015 г. № 2499-р [42]	Перечень организаций, в результате осуществления деятельности которых по добыче и переработке урановых руд образуются РАО, и организации, эксплуатирующие особо радиационно-опасные и ядерно-опасные производства и объекты и осуществляющие деятельность, в результате которой образуются ОНРАО, которые могут осуществлять захоронение указанных отходов в ПЗ РАО, размещенных на используемых такими организациями земельных участках.
МУ 2.6.5.08-2019 [43]	Установление категории потенциальной радиационной опасности радиационного объекта. Методические указания.
ПП №1494 от 30.12.2012 г. [44]	Постановление правительства от 30.12.2012 г. №1494 «Положение об отношении объектов использования атомной энергии к отдельным категориям и определении состава и границ таких объектов»
СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009) [45]	Нормы радиационной безопасности
РБ-141-18 [46]	Рекомендации по разработке критериев приемлемости радиоактивных отходов для захоронения при проектировании пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов.

Таблица А.2 – Сводная таблица данных по пунктам захоронения НАО и САО в разных странах

Страна	Название, годы эксплуатации, вместимость	Тип ПЗРО, данные по вмещающим породам и категориям изолируемых РАО				Ориентировочные сроки ведомственного контроля
		Наземный	Заглублённый (траншейный)	Подземный (глубина до 100 м)	Глубинный (глубина более 100 м)	
Франция [78-84]	CSM 1969 – 1994 гг. 527 тыс. м ³	КНАО, КСАО	-	-	-	500 лет
	CSA 1992 г. - н.в. 1 млн. м ³	КНАО, КСАО	-	-	-	300 лет
Испания [85-87]	El Cabril 1992 г. – н. в. 100 тыс. м ³	КНАО, КСАО	-	-	-	300 лет
Великобритания [107,108]	Drigg 1959 г. – н.в. 1 млн. м ³	-	КНАО	-	-	100 лет
	GDF Сроки не известны ~650 тыс. м ³	-	-	-	ДНАО, ДСАО, ВАО, ОЯТ.	Нет данных
Германия [126-128]	ASSE II 1967-1978 гг. ~25 тыс. м ³	-	-	-	НАО, САО 510 - 750 м	Нет данных
	Morsleben 1972-1998 37 тыс. м ³	-	-	-	НАО, САО 480 м	Нет данных
	Konrad 2027 г. 650 тыс. м ³	-	-	-	НАО, САО 800 - 1300 м	Нет данных
Швейцария [129]	Без названия 2050-2065 гг. 100 тыс. м ³	-	-	-	НАО, САО 400 м	Нет данных
Бельгия [114-117]	Dessel 2023 г. – н.в. 60-100 тыс. м ³	КНАО, КСАО	-	-	-	300 лет
	Без названия 2035 г. 12 тыс. м ³	-	-	-	ДНАО, ДСАО, ВАО 220 м	Нет данных
Швеция [120, 136]	SFR 1988 г. – по н. в. 63 тыс. м ³ . Расширение до 200 тыс. м ³	-	-	КНАО, КСАО 60 м	-	100 лет
	SFL Не ранее 2035 г. 16 тыс. м ³	-	-	-	ОЯТ, ДНАО, ДСАО 500 м	Нет данных

Страна	Название, годы эксплуата- ции, вместимос- ть	Тип ПЗРО, данные по вмещающим породам и катего- риям изолируемых РАО				Ориентиро- вочные сроки ведомствен- ного кон- троля
		Назем- ный	Заглублён- ный (тран- шейный)	Подземный (глубина до 100 м)	Глубинный (глубина бо- лее 100 м)	
Финлян- дия [121, 136]	VLJ Olkiluoto 1992 г. – н. в. 8,5 тыс. м ³	-	-	КНАО, КСАО 60-100 м	-	100 лет
	VLJ Loviisa 1998 г. – н.в. 8,7 тыс. м ³	-	-	-	КНАО, КСАО 110 м	100 лет
Венгрия [123, 124, 132, 136, 138]	RWTF 1976-2005 гг. 5 тыс. м ³	КНАО	-	-	-	100 лет
	Bataapati 2012 г. – н.в. 40 тыс. м ³	-	-	-	КНАО, КСАО 250 м	~
	Без названия 2064-2079 гг.	-	-	-	ДНАО, ДСАО, ВАО, ОЯТ	Нет данных
Чехия [125, 132, 136]	Richard 1960-н.в. 8,5 тыс. м ³	-	-	КНАО, КСАО 70-80 м	-	Нет данных
	Dukovany 1995 г.-н.в. 55 тыс. м ³	-	КНАО, КСАО	-	-	300 лет
Болгария [92, 133]	Radiana 2021 г.- н.в. 138 тыс. м ³	КНАО, КСАО	-	-	-	300 лет
Словения [118]	Vrbina 2020-2062 гг. 9,4-18,2 тыс. м ³	-	-	КНАО, КСАО 25-50 м	-	100 лет
Словакия [68, 141]	Моховце 2000 г. – н.в. 21 тыс. м ³	-	КНАО, КСАО	-	-	300 лет
Украина [90, 142]	Vektor (ENDSF) 55 тыс. м ³	КНАО, КСАО	-	-	-	300 лет
	Buryakivka 1987 г.-н.в. 690 тыс. м ³	-	НАО, САО	-	-	Нет данных
Литва [88, 89]	NSR B25 2027 г. 100 тыс. м ³	КНАО, КСАО	-	-	-	300 лет
Белорус- сия [143]	Без названия 2030 г. 30-40 тыс. м ³	КНАО, КСАО	-	-	-	300 лет
РФ [5-7]	Свердловская обл. 2016 г.- н.в 55 тыс. м ³	-	КНАО, КСАО	-	-	Нет данных
	Челябинская	-	КНАО,	-	-	Нет данных

Страна	Название, годы эксплуата- ции, вместимос- ть	Тип ПЗРО, данные по вмещающим породам и катего- риям изолируемых РАО				Ориентиро- вочные сроки ведомствен- ного кон- троля
		Назем- ный	Заглублён- ный (тран- шейный)	Подземный (глубина до 100 м)	Глубинный (глубина бо- лее 100 м)	
	обл. 2027 г. 225 тыс. м ³		КСАО			
	Томская обл. 2027 г. 138 тыс. м ³	-	КНАО, КСАО	-	-	Нет данных
США [119-121, 123, 145- 147]	Clive 1988 г.-н.в. Более 1 млн. м ³	-	ОНАО, КНАО (Class A)*	-	-	100 лет
	Hanford (Rich- land) 1960г.-н.в. 125 тыс. м ³	-	КНАО, КСАО (Class C)*	-	-	500 лет
	Barnwell 1971-н.в. 1 млн. м ³	-	ОНАО, КНАО, КСАО (Class A, B, C)*	-	-	500 лет
	Andrews 2013г.-н.в. 735 тыс. м ³	-	ОНАО, КНАО, КСАО (Class A, B, C)*	-	-	500 лет
	WIPP 1999-н.в. 180 тыс. м ³				ДСАО, ВАО (трансурано- вые) 660 м	100 лет
Канада [104, 130]	Chalk River 2030 г. 1 млн. м ³	-	НАО	-	-	300 лет
	Bruce 2036 г. 200 тыс. м ³	-	-	-	НАО, САО 680 м	300 лет
ЮАР [114]	Vaalputs 1986 г.-н.в. 140 тыс. м ³ . Возможно рас- ширение до 1,4 млн. м ³	-	КНАО КСАО	-	-	300 лет
Ю. Корея [122]	Wolsong Phase 1 2015 г. -н.в. 160 тыс. м ³ .	-	-	-	КНАО КСАО	100 лет
	Wolsong Phase 2, 3 2030 г.	-	КНАО	-	-	300 лет
Япония [109, 110]	Rokkasho 1992-н.в.	-	КНАО КСАО	-	-	300 лет

Страна	Название, годы эксплуатации, вместимость	Тип ПЗРО, данные по вмещающим породам и категориям изолируемых РАО				Ориентировочные сроки ведомственного контроля
		Наземный	Заглублённый (траншейный)	Подземный (глубина до 100 м)	Глубинный (глубина более 100 м)	
	125 тыс. м ³		(Категория L2**)			
Китай [115, 137]	Guangdong, South China 2011 г.-н.в. 240 тыс. м ³ .		КНАО КСАО	-	-	Нет данных
	Northwest LILW Repository, Gansu 1998 г.-н.в. 200 тыс. м ³ .	-	КНАО КСАО	-	-	Нет данных
Индия [112, 113, 137]	Tarapur (1969), Kota (1972), Kalpakkam (1984), Narora (1989), Kakrapar (1993), Kaiga (2000). Данных по вместимости нет	-	КНАО, КСАО	-	-	Нет данных
Условные обозначения: КНАО – короткоживущие НАО; КСАО – короткоживущие САО; ДНАО – долгоживущие НАО; ДСАО – долгоживущие САО  - Глины  - Скальные породы  - Соли						
Примечания: *Американская классификация РАО (Class A, B, C) представлена в [90]. **Японская классификация РАО приведена в [94].						

Таблица А.3 – Характеристики площадки размещения ППЗРО

№ п/п	Параметр	Значение
1	Площадь и границы санитарно-защитной зоны ПЗРО	0,5 км ² (500×1000 м)
2	Уклон рельефа площадки, не более	5°
3	Скорость ветра за 10- минутный интервал осреднения, не более	30 м/с
4	Среднегодовое количество осадков	700 мм
5	Среднегодовая температура	+5 °С

№ п/п	Параметр		Значение
6	Расчётный класс вероятного смерча (F) по шкале Фуджиты		F 1,9
7	Максимальное расчётное землетрясение (МРЗ), баллы шкалы MSK-64, не более		7 баллов
8	Вмещающие породы		Суглинки
9	Характеристика грунтов	Модуль деформации	20 МПа
		показатель консистенции, I _L	0,4
		коэффициент пористости, e	0,4
10	Расстояние до водных объектов	малой реки, не менее	50 м
		средней реки, не менее	100 м
		крупной реки, водохранилища, береговой линии морей, океанов, не менее	600 м
11	Водоносный горизонт (уровень относительно поверхности земли)		5 м
12	Скорость фильтрации подземных вод, не более	для пород водоносных горизонтов	10 м / сут
		для вмещающих пород ППЗРО	0,001 м/сут
13	Направление разгрузки подземных вод		Нисходящее
14	Наличие активных разломов		Площадка полностью располагается на целиковом блоке
15	Расстояние до объектов инфраструктуры, не менее	Военные объекты	30 км
		Склады и хранилища взрывчатых веществ и боеприпасов	10 км
		Организации, на территории которых возможны технологические взрывы, а также имеются сосуды, работающие под давлением	5 км
		Автомобильные и железные дороги, водный транспорт (исключая дороги и транспорт для обеспечения функционирования ОИАЭ)	5 км
		Магистральные трубопроводы нефти и газа, других горючих и легковоспламеняю-	7 км

№ п/п	Параметр		Значение
		щихся жидкостей	
		Источники вредных (загрязняющих) веществ с химических предприятий, источники пожаров	7 км
16	Расстояние до ближайшего населенного пункта, не менее	Малого сельского поселения (200 чел.)	5 км
		Большого сельского поселения (1 тыс. чел.)	25 км
		Малого населенного пункта (50 тыс. чел.)	100 км
		Крупного населенного пункта (250 тыс. чел.)	150 км
		Крупнейшего населенного пункта (1 млн. чел.)	250 км
17	Средняя плотность населения в радиусе 25 км от площадки, не более		90 чел./км ²

Таблица А.4 – Расчёт стоимости элементов сооружений захоронения с применением аналогового метода

Объект расчёта		Аналог			Коэффициент пересчёта стоимости, k	Стоимость объекта расчёта* в ценах 2000 г, Р _о
Наименование	Характеристики	Наименование	Характеристики	Стоимость в ценах 2000 г, Р _а		
Контейнер КПН-1,5	Срок службы – 50 лет Материал - ПНД Высота падения без просыпания и рассеивания, мм – 1200 Длина, мм – 1280 Ширина, мм – 1280 Высота, мм – 1050 Толщина стенок, мм - 15 Ёмкость, м ³ – 1,5 Масса порожнего (с крышкой), кг - 100 Масса с ТРО, кг – 2000 Количество ярусов при штабелировании – 5 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 4Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – III	Контейнер КРАД 1,36	Срок службы – 50 лет Материал - сталь Высота падения без просыпания и рассеивания, мм – согласно требованиям к упаковке IP-2 по НП-053-16 Длина, мм – 1280 Ширина, мм – 1280 Высота, мм – 1050 Толщина стенок, мм - 3 Ёмкость, м ³ – 1,5 Масса порожнего (с крышкой), кг - 280 Масса с ТРО, кг – 3500 Количество ярусов при штабелировании – 7 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 3Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – II	9000 руб.	$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 0,36 \cdot 1,78 \cdot 0,8 = 0,51$ Коэффициент по массе $k_1 = 0,36$ Коэффициент по стоимости материала $k_2 = 1,78$ (стоимость полиэтилена ПНД 160 тыс. руб./т, стоимость стали 90 тыс. руб./т) Коэффициент по сложности изготовления $k_3 = 0,8$	4600 руб.
Контейнер КПН-3,5	Срок службы – 50 лет Материал - ПНД Высота падения без просыпания и рассеивания, мм – 1200 Длина, мм – 1650 Ширина, мм – 1650 Высота, мм – 1375 Толщина стенок, мм - 20 Ёмкость, м ³ – 3,2 Масса порожнего (с крышкой), кг - 300 Масса с ТРО, кг – 3500 Количество ярусов при штабелировании – 5 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 4Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – III	Контейнер КМЗ	Срок службы – 50 лет Материал - сталь Высота падения без просыпания и рассеивания, мм – согласно требованиям к упаковке типа А по НП-053-16 Длина, мм – 1650 Ширина, мм – 1650 Высота, мм – 1375 Толщина стенок, мм - 5 Ёмкость, м ³ – 3,2 Масса порожнего (с крышкой), кг - 870 Масса с ТРО, кг – 3500 Количество ярусов при штабелировании – 6 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 3Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – II	22325 руб.	$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 0,35 \cdot 1,78 \cdot 0,9 = 0,6$ Коэффициент по массе $k_1 = 0,35$ Коэффициент по стоимости материала $k_2 = 1,78$ (стоимость полиэтилена ПНД 160 тыс. руб./т, стоимость стали 90 тыс. руб./т) Коэффициент по сложности изготовления $k_3 = 0,9$	13500 руб.
Контейнер КНГО	Вместимость (кол-во бочек 200 л), шт. - 5 Общий объём внутренней полости, м ³ Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм - 1650×1650×1375 Срок службы – 50 лет Толщина стенки корпуса, не более, мм - 85 Толщина стенки крышки, не более, мм - 85 Масса порожнего, кг (нетто) - 800 Масса заполненного, кг (брутто) - 3000 Материал огнеупорного наполнителя - Базальт	Контейнер НЗК	Срок службы – 300 лет Материал - железобетон Высота падения без просыпания и рассеивания, мм – согласно требованиям к упаковке типа А по НП-053-16 Длина, мм – 1650 Ширина, мм – 1650 Высота, мм – 1375 Толщина стенок, мм - 150 Ёмкость, м ³ – 1,5	18735 руб.	$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 0,18 \cdot 2,5 \cdot 1,9 = 0,85$ Коэффициент по массе $k_1 = 0,18$ Коэффициент по стоимости материала $k_2 = 2,5$	16000 руб.

Объект расчёта		Аналог			Коэффициент пересчета стоимости, k	Стоимость объекта расчёта* в ценах 2000 г, P _о
Наименование	Характеристики	Наименование	Характеристики	Стоимость в ценах 2000 г, P _а		
	Материал оболочки - сталь Количество ярусов при штабелировании - 5 Огнестойкость по ГОСТ 30247.0-94 [185] – 0,75 ч Высота падения без просыпания и рассеивания, мм - 1200 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 4Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – III		Масса порожнего (с крышкой), кг - 4500 Масса с ТРО, кг – 8500 Количество ярусов при штабелировании – 6 Огнестойкость по ГОСТ 30247.0-94 [185] – 0,75 ч Классификационное обозначение по НП-016-05 – 3Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – II		Коэффициент по сложности изготовления k ₃ = 1,9	
Контейнер НЗК-150-1,5П ИОС с полимерным вкладышем	Срок службы – 300 лет Материал контейнера – железобетон Материал вкладыша – полимер (ПНД) Высота падения без просыпания и рассеивания, мм – согласно требования к упаковке типа А по НП-053-16 Длина, мм – 1650 Ширина, мм – 1650 Высота, мм – 1375 Толщина стенок, мм - 150 Ёмкость, м ³ – 1,5 Масса порожнего (с крышкой), кг - 4100 Масса с ТРО, кг – 6000 Масса вкладыша – 100 кг Количество ярусов при штабелировании – 6 Огнестойкость по ГОСТ 30247.0-94 [185] – 0,75 ч Классификационное обозначение по НП-016-05 – 3Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – II	Контейнер НЗК-150-1,5П ИОС с металлическим вкладышем	Срок службы – 300 лет Материал контейнера – железобетон Материал вкладыша – сталь Высота падения без просыпания и рассеивания, мм – согласно требования к упаковке типа А по НП-053-16 Длина, мм – 1650 Ширина, мм – 1650 Высота, мм – 1375 Толщина стенок, мм - 150 Ёмкость, м ³ – 1,5 Масса порожнего (с крышкой), кг - 4400 Масса с ТРО, кг – 6000 Масса вкладыша – 400 кг Количество ярусов при штабелировании – 6 Огнестойкость по ГОСТ 30247.0-94 [185] – 0,75 ч Классификационное обозначение по НП-016-05 – 3Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – II	27700 руб.	k = k ₁ · k ₂ · k ₃ = 0,93 · 1,78 · 0,5 = 0,83 Коэффициент по массе k ₁ = 0,93 Коэффициент по стоимости материала k ₂ = 1,78 (стоимость полиэтилена ПНД 160 тыс. руб./т, стоимость стали 90 тыс. руб./т) Коэффициент по сложности изготовления k ₃ = 0,5	23000 руб.
Ограждающие конструкции для РАО класса 3	Габариты одного модуля 60,6×18,6×7,6 Строительный объём одного модуля захоронения – 8570 м ³ Класс бетона – В25 по ГОСТ 26633-2015 Коэффициент армирования – 0,3 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 3Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – II	Модуль захоронения РАО ППЗРО в Челябинской обл.	Габариты одного модуля 76х69х7,5 м Строительный объём одного модуля захоронения – 39600 м ³ Класс бетона – В25 по ГОСТ 26633-2015 Коэффициент армирования – 0,3 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 3Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – II	687 руб. / м ³	k = 1	687 руб. / м ³
Ограждающие конструкции для РАО класса 4	Габариты одного модуля 60,4×18,4×7,6 Строительный объём одного модуля захоронения – 8450 м ³ Класс бетона – В20 по ГОСТ 26633-2015 Коэффициент армирования – 0,2 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 4Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – III	Модуль захоронения РАО ППЗРО в Челябинской обл.	Габариты одного модуля 76х69х7,5 м Строительный объём одного модуля захоронения – 39600 м ³ Класс бетона – В25 по ГОСТ 26633-2015 Коэффициент армирования – 0,3 Классификационное обозначение по НП-016-05 – 3Н Категория сейсмостойкости по НП-031-01 – II	687 руб. / м ³	k = 0,8	550 руб. / м ³
Буферный материал для РАО класса 3	Бентонит Толщина слоя от 50 до 500 мм Плотность – 1,8÷2,2 т/м ³ Пористость – до 40 % Паропроницаемость – 0,04-006 мг/(м·ч·Па) Показатели текучести: угол естественного откоса - 20° Коэффициент фильтрации – 10 ⁻⁸ ÷10 ⁻⁶ м/сут	Буферный материал для РАО класса 3 ППЗРО в Челябинской обл	Бентонитовый глинопорошок	998 руб. / м ³	k = 1	998 руб. / м ³

