УТВЕРЖДЕНО

Приказ начальника Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
От 04.10.2022 г. № 55

Руководство по ядерной и радиационной безопасности «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов»

ГЛАВА 1
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Руководство по ядерной и радиационной безопасности «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов» (далее – Руководство по безопасности) содержит рекомендации по:

разработке основных положений оценки долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (далее – ППЗРО);

разработке и обоснованию сценариев эволюции системы захоронения радиоактивных отходов (далее – РАО), включая сценарии миграции радионуклидов в окружающую среду и облучения человека (далее – сценарии эволюции системы захоронения РАО);

разработке и обоснованию концептуальных моделей ППЗРО в соответствии с принятыми сценариями эволюции системы захоронения РАО (далее – концептуальные модели) и математических (расчетных) моделей, реализующих разработанные концептуальные модели (далее – математические модели), проведению численных прогнозных расчетов;

представлению и анализу результатов оценки долговременной безопасности ППЗРО с учетом их неопределенностей (погрешностей).

2. Руководство по безопасности предназначено для проведения оценки долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, относящихся к классам 3 и 4.

3. Настоящее Руководство по безопасности разработано в соответствии с Законом Республики Беларусь от 30 июля 2008 г. № 426-З «Об использовании атомной энергии», Законом Республики Беларусь от 18 июня 2019 г. № 198-З «О радиационной безопасности» и содержит разъяснения и рекомендации Департамента по ядерной и радиационной

безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (далее – Госатомнадзор) по выполнению требований норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности», утвержденных постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 3 мая 2021 г. № 32, в части проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО, в том числе прогнозного расчета оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ППЗРО. Для целей настоящего Руководства по безопасности используются термины и их определения в значениях, установленных Законом Республики Беларусь «О радиационной безопасности», Законом Республики Беларусь «Об использовании атомной энергии» и иных законодательных актах в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, а также следующий термин:

административный контроль – проводимый эксплуатирующей или иной уполномоченной организацией в пределах срока, установленного в проекте ППЗРО, периодический радиационный контроль и мониторинг системы захоронения РАО.

4. Настоящее Руководство по безопасности предназначено для применения:

специалистами Госатомнадзора при осуществлении ими государственного надзора в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, контроля за выполнением лицензиатами законодательства о лицензировании, лицензионных требований и условий осуществления деятельности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения;

эксплуатирующими организациями и организациями, выполняющими для эксплуатирующих организаций работы и оказывающими эксплуатирующим организациям услуги, влияющие на ядерную и радиационную безопасность объектов использования атомной энергии в части захоронения РАО, проектирования, возведения, ввода в эксплуатацию, эксплуатации, реконструкции, ремонта и закрытия ППЗРО, (изыскательские, проектные, научно-исследовательские, строительные организации);

специалистами организаций научно-технической поддержки, осуществляющими экспертизу безопасности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения.

5. Требования норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности в части проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО могут быть реализованы с использованием иных способов (методов), чем те, которые содержатся в настоящем

Руководстве по безопасности, при условии обоснования выбранных способов (методов).

ГЛАВА 2
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

6. Оценку долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выполнять в целях определения радиационного воздействия ППЗРО на население и окружающую среду, обусловленного возможным выходом радионуклидов из РАО и их распространением за пределы барьеров безопасности ППЗРО в окружающую среду после закрытия ППЗРО в период потенциальной опасности захороненных РАО:

при нормальном (эволюционном) протекании естественных внешних и внутренних процессов на площадке размещения ППЗРО (наиболее вероятных сценариях эволюции системы захоронения РАО (далее – сценарии нормальной эволюции);

при маловероятных (катастрофических) внешних воздействиях природного и техногенного характера на площадке размещения ППЗРО и внутренних воздействиях, включая непреднамеренное вторжение (проникновение) человека в систему захоронения РАО (далее – альтернативные сценарии).

7. Оценку долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выполнять путем проведения прогнозных численных расчетов радиационного воздействия на население и окружающую среду на основе разработанных сценариев эволюции системы захоронения РАО и соответствующих концептуальных и математических моделей.

8. Оценку долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется проводить на всех этапах жизненного цикла ППЗРО, начиная с выбора площадки ППЗРО и размещения ППЗРО, его проектирования, возведения, ввода в эксплуатацию и эксплуатации, в том числе при реконструкции, ремонте и модернизации, а также при закрытии ППЗРО и в период после закрытия ППЗРО.

9. Оценку долговременной безопасности эксплуатируемого ППЗРО рекомендуется проводить при выполнении периодической оценки безопасности ППЗРО, продлении срока эксплуатации ППЗРО и в случае внесения изменений, важных для безопасности ППЗРО, в проектные решения.

10. Оценку долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выполнять в объеме и с периодичностью, установленными эксплуатирующей организацией с учетом проекта ППЗРО, особенностей размещения ППЗРО и достаточными для обоснования соответствия безопасности ППЗРО требованиям законодательства о ядерной и радиационной безопасности.

11. Оценку долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выполнять на основе технического задания на проектирование ППЗРО, проектных материалов ППЗРО и соответствующей эксплуатационной документации, с учетом фактического состояния ППЗРО и барьеров безопасности.

12. При проведении оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется учитывать имеющийся опыт проектирования, возведения и эксплуатации рассматриваемого ППЗРО, включая данные радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО, результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований и наблюдений, выполненных ранее оценок безопасности ППЗРО, а также опыт проектирования, возведения, эксплуатации, реконструкции, ремонта и закрытия аналогичных ППЗРО и результаты выполненных оценок их долговременной безопасности.

13. Оценку долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выполнять с использованием итерационного подхода, блок-схема которого приведена в приложении 1 к настоящему Руководству по безопасности.

14. Оценку долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выполнять на основе дифференцированного подхода, согласно которому детальность и полнота исследований отдельных факторов, явлений и процессов определяется их значимостью для обеспечения безопасности ППЗРО.

15. Оценка долговременной безопасности ППЗРО может выполняться на основе консервативного или реалистичного подходов или их комбинации.

Выбор того или иного подхода определяется целями проведения оценки безопасности, этапом жизненного цикла ППЗРО, на котором выполняется оценка долговременной безопасности, полнотой и доступностью исходных данных, в том числе характеристик ППЗРО, района и площадки размещения ППЗРО, а также выбором и проработанностью сценариев, сложностью применяемых моделей и методов расчета и программных средств.

16. При применении консервативного подхода рекомендуется использовать сценарии, модели, параметры и исходные данные, заведомо приводящие к наиболее неблагоприятным результатам, то есть

в предположении максимального воздействия ППЗРО на персонал (работников), население и окружающую среду. Данный подход целесообразно применять для проведения упрощенных (оценочных) расчетов, в том числе на начальных этапах жизненного цикла ППЗРО (выбор площадки, проектирование и возведение ППЗРО), с целью обоснования концепции обеспечения безопасности ППЗРО и основных технических и организационных решений по обеспечению безопасности ППЗРО, установления границ санитарно-защитной зоны (далее – СЗЗ) и зоны наблюдения (далее – ЗН) ППЗРО, а также при недостаточности исходных данных и параметров.

В приложении 1.1 к настоящему Руководству по безопасности приведены рекомендации по реализации консервативного подхода при моделировании миграции радионуклидов в системе барьеров безопасности и вмещающей геологической среде в рамках оценки долговременной безопасности ППЗРО.

17. При применении реалистичного подхода рекомендуется рассматривать наиболее вероятные сценарии воздействия ППЗРО на население и окружающую среду, использовать при моделировании системы захоронения РАО разумные допущения, предположения и граничные условия и учитывать значения исходных данных и параметров математических моделей, соответствующие реальной системе захоронения РАО и условиям захоронения РАО и подтвержденные экспериментально, или их наиболее вероятные значения (полученные, например, для объектов-аналогов). Реалистичный подход целесообразно применять для получения приближенных к реальному поведению системы захоронения РАО результатов, в том числе в целях анализа функционирования системы захоронения РАО, оптимизации проектных, технологических и организационных решений ППЗРО и отдельных элементов системы захоронения РАО, уточнения СЗЗ и ЗН, при разработке системы радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО, разработке критериев приемлемости РАО для захоронения, а также при разработке мероприятий по защите работников (персонала) и населения в случае аварии на ППЗРО и ликвидации последствий аварий.

18. В зависимости от рассматриваемого сценария и в соответствии с дифференцированным подходом при выполнении оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется применять методы детерминистического или вероятностного анализа или их комбинации.

19. При применении методов детерминистического анализа исходные данные и параметры, описывающие рассматриваемые процессы и явления, и состояние системы захоронения РАО ППЗРО, а

также принятые последовательности событий, процессов и явлений носят определенный (детерминированный) характер и задаются однозначно (в виде единственных значений). Реализацию детерминистского метода рекомендуется производить с использованием консервативного подхода, в соответствии с которым для каждого параметра из диапазонов возможных значений выбираются такие, при которых значения расчетных величин будут наибольшими.

Методы детерминистического анализа рекомендуется применять при разработке и анализе сценариев нормальной эволюции системы захоронения РАО, для выполнения оценочных расчетов на начальных этапах жизненного цикла ППЗРО, а также при недостаточности исходных данных и параметров. На более поздних этапах жизненного цикла ППЗРО детерминистический метод рекомендуется дополнять или заменять вероятностным.

Консервативность расчетов при детерминистском методе можно снизить за счет уменьшения диапазонов величин, используемых в расчетах, и совершенствования расчетной модели.

20. При применении методов вероятностного анализа задаются вероятностные распределения значений исходных данных и вероятности реализации различных последовательностей событий, процессов и явлений, которые, соответственно, задаются вероятностным образом. В этом случае результаты расчетов также представляют собой вероятностные распределения, что приводит к более реалистичным оценкам по сравнению с детерминистским методом.

Методы вероятностного анализа рекомендуется применять для разработки и анализа альтернативных сценариев, а также при разработке корректирующих мероприятий по повышению долговременной безопасности ППЗРО. При разработке и анализе альтернативных сценариев рекомендуется оценить вероятности реализации сценария и относительные вероятности различных вариантов развития событий и процессов.

21. При применении детерминистического подхода в рамках проведения оценки безопасности ППЗРО рекомендуется обосновывать степень консерватизма (реализма) принятых предположений и значений исходных данных и параметров, используемых в расчетах, при применении вероятностного подхода – выбранные вероятностные распределения.

22. Оценку долговременной безопасности ППЗРО, включая сбор и подготовку исходных данных и описание системы захоронения РАО, разработку сценариев эволюции системы захоронения РАО, концептуальных и математических моделей, выполнение расчетов с

помощью программных средств, а также проведение анализа результатов расчетов, включая анализ неопределенностей (погрешностей), рекомендуется выполнять и документировать в соответствии с программой обеспечения качества, требования к которой устанавливаются в соответствии с законодательством о ядерной и радиационной безопасности.

23. Результаты оценки долговременной безопасности ППЗРО представляют в проектной документации (далее – проект) ППЗРО и отчете по обоснованию безопасности (далее – ООБ) ППЗРО в соответствии с требованиями законодательства о ядерной и радиационной безопасности, регулирующего безопасность при захоронении РАО и регламентирующих требования к составу и содержанию указанных документов.

24. При проведении оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выделять следующие основные этапы:

разработка основных положений оценки долговременной безопасности ППЗРО;

описание системы захоронения РАО, сбор и подготовка исходных данных;

разработка и обоснование сценариев эволюции системы захоронения РАО;

разработка и обоснование концептуальных и математических моделей и их реализация с помощью программных средств;

анализ результатов оценки долговременной безопасности с учетом их неопределенностей (погрешностей).

25. В рамках разработки основных положений оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется определить:

цели проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО;

критерии и показатели безопасности ППЗРО и расчетные величины;

репрезентативное лицо;

значимые периоды времени, в том числе расчетный период.

26. Цель проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО определяет подходы и методы выполнения оценки, в том числе использование консервативных или реалистичных подходов, применение методов детерминистского или вероятностного анализа, необходимость применения упрощенных или сложных математических моделей.

27. В зависимости от этапа жизненного цикла ППЗРО, на котором проводится оценка долговременной безопасности ППЗРО, целью проведения оценки могут являться:

27.1. на этапе размещения (выбора площадки) ППЗРО:

разработка и обоснование концепции захоронения РАО, основных технических и организационных решений по обеспечению безопасности размещаемого ППЗРО для различных вариантов размещения ППЗРО;

разработка технического задания на проектирование ППЗРО с учетом условий размещения ППЗРО;

определение наиболее значимых для безопасности размещаемого ППЗРО характеристик площадки и района его размещения, планирование изысканий и исследований по условиям размещения ППЗРО;

определение объема изысканий и научных исследований для обоснования условий размещения ППЗРО, обоснование пригодности площадки для размещения ППЗРО с учетом явлений, процессов и факторов природного и техногенного происхождения;

обоснование возможности обеспечения долговременной безопасности размещаемого ППЗРО с учетом условий его размещения, включая предварительную оценку потенциального радиационного воздействия размещаемого ППЗРО на человека и окружающую среду;

разработка концепции закрытия размещаемого ППЗРО;

27.2. на этапах проектирования и возведения ППЗРО:

уточнение технического задания на проектирование ППЗРО с учетом условий размещения ППЗРО;

разработка и обоснование технических, технологических и организационных решений проектируемого ППЗРО;

обоснование возможности обеспечения долговременной безопасности проектируемого (сооружаемого) ППЗРО с учетом разрабатываемых технических, технологических и организационных решений;

разработка и обоснование пределов и условий безопасной эксплуатации проектируемого (сооружаемого) ППЗРО;

разработка и обоснование критериев приемлемости РАО для захоронения в данном ППЗРО;

разработка системы радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО, определение объема, методов, порядка и периодичности проведения радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО;

разработка и выбор варианта закрытия проектируемого (сооружаемого) ППЗРО;

27.3. на этапе эксплуатации ППЗРО:

обоснование текущего уровня безопасности ППЗРО и оценка соответствия эксплуатируемого ППЗРО установленным критериям безопасности;

оптимизация системы захоронения РАО;

разработка, при необходимости, и обоснование дополнительных мероприятий по повышению безопасности эксплуатируемого ППЗРО;

оценка и обоснование необходимости модернизации эксплуатируемого ППЗРО, в том числе в целях создания дополнительных барьеров безопасности ППЗРО;

разработка и обоснование проекта реконструкции и модернизации эксплуатируемого ППЗРО и его отдельных систем (элементов);

обоснование внесения изменений в проектную и технологическую документацию;

корректировка критериев приемлемости РАО для захоронения;

оптимизация системы радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО при эксплуатации ППЗРО и определение программы наблюдений после закрытия ППЗРО;

разработка и обоснование проектных и организационных решений по закрытию эксплуатируемого ППЗРО;

27.4. на этапе закрытия (после закрытия) ППЗРО:

оптимизация проектных и организационных решений по закрытию ППЗРО и технологии закрытия ППЗРО;

подтверждение долговременной безопасности закрываемого (закрытого) ППЗРО в период потенциальной опасности РАО;

разработка и обоснование программы проведения периодического радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО после закрытия ППЗРО.

28. Критерии безопасности ППЗРО при эксплуатации ППЗРО и после его закрытия, к которым относятся основные пределы доз облучения, допустимые уровни монофакторного воздействия, граничные дозы облучения и референтные уровни, устанавливаются в проекте ППЗРО в соответствии с нормативными правовыми актами в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, в том числе санитарными нормами и правилами и гигиеническими нормативами. В целях демонстрации соблюдения критериев безопасности ППЗРО рекомендуется применять показатели безопасности ППЗРО, к которым относятся удельная (объемная) и общая активность радионуклидов в объектах окружающей среды (почва, породы, подземные и поверхностные воды, атмосфера), уровни вмешательства по содержанию отдельных радионуклидов в питьевой воде и иные величины, установленные нормативными документами и (или) проектом ППЗРО.

29. Конечным результатом оценки долговременной безопасности ППЗРО являются значения расчетных параметров, которые подлежат сравнению с установленными критериями (показателями) долговременной безопасности ППЗРО. Выбор

расчетных параметров проводится в соответствии с критериями (показателями) безопасности, установленными для конкретного ППЗРО.

30. Для каждого сценария эволюции системы захоронения РАО при проведении оценки радиационного воздействия на население, включая лица, которые в ходе их производственной деятельности, осуществляемой после закрытия ППЗРО, могут подвергаться радиационному воздействию, рекомендуется определить репрезентативное лицо.

Репрезентативное лицо, то есть индивидуум, получивший дозу излучения, которая репрезентативна для наиболее высоко облученных индивидуумов в популяции от данного ППЗРО, рекомендуется определять с учетом условий формирования дозы облучения населения по всем возможным путям радиационного воздействия (с учетом внешнего и внутреннего облучения).

31. Репрезентативное лицо рекомендуется выбирать с учетом демографических условий размещения ППЗРО, в том числе расположения населенных пунктов, численности, плотности размещения и половозрастной структуры населения, особенностей образа жизни и рациона питания, структуры природопользования, водопотребления и водоснабжения, типичных для данной местности биоценозов, а также радионуклидного состава РАО, захораниваемых в ППЗРО.

32. С целью определения репрезентативного лица рекомендуется проанализировать значения уровней облучения различных групп населения при реализации каждого из сценариев эволюции системы захоронения РАО, прогноза выхода и распространения радионуклидов из ППЗРО в окружающую среду и соответствующего радиационного воздействия.

33. Для каждого сценария эволюции системы захоронения РАО рекомендуется определить в общем случае несколько различных однородных групп лиц из населения, подвергающихся максимальному (по отношению к данному сценарию) и повышенному (по сравнению со сценарием нормальной эволюции) радиационному воздействию.

Для сценариев непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО рекомендуется определить по условиям профессиональной деятельности, предполагающей вторжение в систему захоронения РАО, подвергающихся наибольшему радиационному воздействию по рассматриваемому в данном сценарии пути облучения.

34. Для целей проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется определить периоды времени, важные для разработки сценариев эволюции ППЗРО:

период административного контроля ППЗРО;

период времени, для которого выполняется оценка долговременной безопасности ППЗРО (расчетный период).

35. При разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО целесообразно предполагать, что в период административного контроля ППЗРО доступ населения на территорию закрытого ППЗРО ограничен и контролируется, однако возможно проживание населения на прилегающих к ППЗРО территориях, ведение строительной, сельскохозяйственной и иной промышленной деятельности, ограниченной определенными условиями. При этом обеспечивается предотвращение проникновения (вторжения) человека в систему захоронения РАО. После окончания периода административного контроля предполагается неограниченный доступ человека на территорию закрытого ППЗРО.

36. Учитывая, что неопределенность результатов прогнозных расчетов возрастает со временем, период, для которого выполняется количественный прогнозный расчет оценки долговременной безопасности ППЗРО (расчетный период), допустимо ограничить сроком, для которого результаты расчетов показывают, что уровень радиационного воздействия ППЗРО на население и окружающую среду достигает максимального значения и далее уже не может возрастать.

37. При установлении расчетного периода рекомендуется убедиться в том, что в пределах рассматриваемого диапазона времени реализованы все значимые процессы и события, влияющие на выход радионуклидов из ППЗРО и их перенос в окружающей среде, в том числе учтены цепочки радиоактивных превращений и образование дочерних радионуклидов (например, накопление ^{237}Np вследствие распада ^{241}Pu и ^{241}Am).

38. При описании системы захоронения РАО, сборе и подготовке исходных данных в целях выполнения оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется рассматривать ППЗРО и окружающую его природную среду, население как совокупность следующих составляющих:

область системы захоронения РАО, включающая:

область источника радионуклидов, к которой относятся упаковки РАО, включающие матрицу РАО, контейнер и другие элементы упаковки (если имеются);

инженерная часть ППЗРО, представляющая собой совокупность важных для безопасности сооружений, систем и элементов ППЗРО, к которым относятся инженерные барьеры безопасности ППЗРО, включающие строительные конструкции ячеек захоронения РАО, буферные материалы, запечатывающие элементы, покрывающий и подстилающий экраны;

вмещающие и (или) несущие горные породы, измененные в процессе возведения и (или) эксплуатации ППЗРО или на которые может быть оказано влияние после закрытия ППЗРО (ближняя зона);

горные породы, на которые не оказывалось влияние при возведении и эксплуатации ППЗРО, состояние и характеристики которых влияют на миграцию радионуклидов в окружающей природной среде, изменение состояния которых в связи с любыми возможными процессами и событиями как природного, так и техногенного происхождения может привести к изменению этих характеристик (неизмененные породы, или дальняя зона);

объекты природной среды, в которых возможна миграция радионуклидов (например, часть атмосферы, почвы, поверхностные воды, растительный и животный мир) (далее – биосфера);

совокупность всех элементов непосредственного окружения населения, живущего в зоне, в которой оно может подвергнуться радиационному воздействию ППЗРО (далее – зона влияния ППЗРО), и само население.

39. При описании системы захоронения РАО рекомендуется представить:

описание состава системы захоронения РАО, ее отдельных элементов и их взаимосвязи;

описание общей концепции обеспечения безопасности системы захоронения РАО и функций безопасности для каждого из элементов системы, важного для безопасности;

описание выполнения элементами системы захоронения РАО возложенных на них функций безопасности при нормальной эволюции системы и при учитываемых внешних и внутренних воздействиях;

описание технических решений, предусмотренных проектом ППЗРО для реализации принципов и требований безопасности;

описание геологических, радиационных, химических, биологических, механических и тепловых процессов, которые могут повлиять на эволюцию системы захоронения РАО;

описание характеристик РАО с учетом пространственной неоднородности РАО;

описание предполагаемых изменений свойств и поведения элементов системы захоронения РАО и их взаимодействия во времени, в том числе их защитных и изолирующих свойств;

описание предполагаемых изменений условий окружающей среды и их воздействия на элементы системы захоронения РАО;

описание возможных механизмов выхода и путей миграции радионуклидов при нормальной эволюции системы захоронения РАО и при альтернативных сценариях;

оценку неопределенностей, обусловленных неполнотой имеющейся информации.

40. Описание системы захоронения РАО, окружающей природной среды и зоны влияния ППЗРО, включая население, рекомендуется актуализировать по мере поступления новых или уточненных исходных данных, входных параметров, допущений и предположений в отношении их свойств и их изменения во времени в соответствии с итерационным подходом, приведенном в приложении 1 настоящего Руководства по безопасности.

41. В качестве исходных данных для проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется использовать данные технического задания на проектирование ППЗРО, проектной и технической документации ППЗРО, экспериментальные данные, полученные в результате проведенных изысканий, исследований и наблюдений, выполненных при проектировании, возведении, эксплуатации, реконструкции, ремонте и закрытии рассматриваемого ППЗРО, данные радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО, картографические материалы, статистические и литературные данные (справочные издания, книги, монографии и статьи), а также информацию по объектам-аналогам, включая сведения о характеристиках и свойствах аналогичных площадок и районов и данные, полученные при проектировании, возведении, эксплуатации, реконструкции, ремонте и закрытии аналогичных ППЗРО.

42. Получение экспериментальных данных в целях проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО может выполняться:

путем прямых измерений (например, физические и химические свойства РАО, коэффициенты сорбции инженерных барьеров и вмещающих пород);

путем косвенных измерений (например, состав и свойства РАО, если проведение прямых измерений невозможно);

путем аппроксимации (например, параметры, характеризующие изолирующие свойства барьеров безопасности на основе аналогичных материалов и пород);

путем приближений и прогнозов на основе проводимых наблюдений, в том числе многолетних (например, скорость и механизмы деградации барьеров безопасности, характеристика возможной деятельности человека, состояние биосферы).

43. В целях качественной подготовки исходных данных целесообразно разработать программу сбора данных, в рамках которой рекомендуется:

определить перечень требуемых для расчета исходных данных;

определить источники различных исходных данных (например, справочные данные, экспериментальные исследования, изыскания), включая источники информации, на основе которой формируется прогноз возможного поведения человека, проживающего в районе размещения ППЗРО;

определить методы и порядок сбора данных, в том числе указать методы определения количества размещенных РАО и их характеристик;

обосновать полноту и достаточность программ сбора и подготовки исходных данных;

обосновать достоверность исходных данных;

оценить неопределенности (погрешности) исходных данных.

44. Сбор исходных данных, необходимых для выполнения количественных прогнозных расчетов, рекомендуется проводить с учетом разработанных сценариев эволюции системы захоронения РАО и применяемых математических моделей на основе итерационного подхода параллельно с развитием и уточнением сценариев и моделей.

45. Рекомендуемый перечень исходных данных для выполнения оценки долговременной безопасности ППЗРО приведен в приложении 2 к настоящему Руководству по безопасности.

46. Для эксплуатируемых ППЗРО оценку долговременной безопасности рекомендуется проводить с учетом следующих факторов:

фактического состояния ППЗРО и барьеров безопасности;

объема, состава и характеристик захороненных РАО и их фактического состояния;

фактической радиационной обстановки, подтвержденной, в том числе, данными радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО, включающими результаты наблюдений за распространением радионуклидов в окружающей среде и данные о загрязнении окружающей среды (например, донных отложений водных объектов, почвы, подземных и поверхностных вод и атмосферного воздуха);

последствий нарушений нормальной эксплуатации ППЗРО, включая радиационные аварии, имевшие место при эксплуатации ППЗРО.

ГЛАВА 3
РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ЭВОЛЮЦИИ СИСТЕМЫ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

47. При выполнении оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется разработать сценарии эволюции системы захоронения РАО – возможные последовательности логически связанных между собой событий, явлений и факторов природного и

техногенного происхождения и физико-химических процессов, определяющих возможную эволюцию системы захоронения РАО, возможность миграции радионуклидов через инженерные барьеры безопасности ППЗРО, их распространение в окружающей среде и воздействие на человека и окружающую среду в результате предполагаемого поведения системы захоронения РАО в период потенциальной опасности захороненных РАО.

48. При разработке сценария эволюции системы захоронения РАО рекомендуется качественно и (или) количественно определить:

эволюцию системы захоронения РАО, включая:

учитываемые события, явления и факторы природного и техногенного происхождения;

происходящие в системе захоронения РАО физико-химические процессы, приводящие к изменению физико-химического состава материала барьеров безопасности, механических характеристик барьеров, поведения системы барьеров безопасности, сроков сохранения инженерными барьерами безопасности своих изолирующих свойств (целостности), скорости и механизмов деградации инженерных барьеров ППЗРО и их отдельных элементов;

механизмы и скорости выхода радионуклидов из инженерных барьеров ППЗРО и их переноса в окружающей среде, включая:

механизмы выхода (конвекция, диффузия, гидродисперсия), значения скоростей выхода и параметры сред, в которых происходит перенос радионуклидов;

скорость и механизмы переноса радионуклидов в ближней и дальней зонах, динамику и количественные данные поступления радионуклидов в водоносный горизонт и атмосферный воздух;

скорость, механизмы переноса и накопления радионуклидов в окружающей среде;

формирование радиационного воздействия на население и окружающую среду.

49. При определении сценариев эволюции системы захоронения РАО рекомендуется:

рассмотреть все возможные значимые события, явления и факторы природного и техногенного происхождения и физико-химические процессы, существенно влияющие на эволюцию системы захоронения РАО;

проанализировать причинно-следственные связи и установленные корреляции между этими событиями, явлениями, процессами и факторами;

определить возможные пути поступления радионуклидов в окружающую среду и воздействия на человека.

50. Выбор сценариев эволюции системы захоронения РАО для определенного ППЗРО рекомендуется осуществлять с учетом особенностей данного ППЗРО, в том числе условий его размещения, включая геологические, гидрогеологические, гидрологические, геохимические, геоморфологические, метеорологические и демографические условия, проектные решения ППЗРО, а также характеристики и объемы захороненных РАО. При разработке сценария эволюции системы захоронения РАО рекомендуется учитывать примерный перечень исходных событий, установленный согласно приложению 2 к нормам и правилам по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности», утвержденным постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 20.01.2012 №7.

51. При разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО рекомендуется выделять сценарий нормальной эволюции и альтернативные сценарии.

52. Сценарий нормальной эволюции системы захоронения РАО описывает наиболее вероятное протекание природных процессов в ходе эволюции системы захоронения РАО и предполагает выполнение барьерами ППЗРО функций безопасности в соответствии с проектом ППЗРО и постепенное снижение защитных, прочностных и изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности со временем.

53. В качестве альтернативных рассматриваются сценарии эволюции системы захоронения РАО, реализация которых приводит к изменению в эволюционном ходе развития системы захоронения РАО вследствие внешних или внутренних воздействий природного и техногенного происхождения, а также внутренних процессов, не включенных в проектные основы ППЗРО.

Альтернативные сценарии эволюции системы захоронения РАО могут включать преждевременное снижение прочностных или изолирующих инженерных барьеров ППЗРО и их различных элементов, внутренние процессы в системе захоронения РАО, приводящие к преждевременной деградации барьеров, а также внешние воздействия природного и техногенного характера и изменение условий размещения ППЗРО, в том числе метеорологических условий, режима поверхностных и подземных вод, увеличение интенсивности опасных природных процессов.

54. К альтернативным сценариям эволюции системы захоронения РАО относят также сценарии непреднамеренного (несанкционированного) вторжения человека в систему захоронения РАО, под которыми понимают непреднамеренные

несанкционированные действия человека, которые приводят к нарушению целостности системы захоронения РАО, барьеров безопасности ППЗРО и вскрытию ячеек захоронения РАО и, как следствие, изменению механизмов и скорости выхода радионуклидов из ППЗРО.

55. Для сценариев эволюции системы захоронения РАО, описывающих нарушение целостности системы захоронения РАО вследствие непреднамеренного вторжения, предполагается, что лицо или группа лиц, проникших в ППЗРО, будет в течение некоторого времени подвергаться радиационному воздействию РАО, не подозревая о существующей опасности.

56. Рекомендуется определить конечный перечень сценариев эволюции системы захоронения РАО (базовые сценарии), которые по совокупности позволят учесть основные особенности возможной эволюции ППЗРО и процессы, определяющие его радиационное воздействие на человека и окружающую среду.

57. Выбор сценариев эволюции системы захоронения РАО рекомендуется выполнять на основе дифференцированного подхода, исходя из анализа системы захоронения РАО и условий размещения ППЗРО, с учетом цели проведения оценки долговременной безопасности, установленных критериев безопасности и расчетных параметров таким образом, чтобы выбранные сценарии в совокупности позволили учесть основные факторы и процессы, определяющие возможное радиационное воздействие ППЗРО на человека и окружающую среду в период потенциальной опасности РАО.

58. При разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО рекомендуется использовать системный подход, обеспечивающий учет всех потенциально значимых свойств (особенностей) системы захоронения РАО, протекающих в системе процессов, а также внешних и внутренних воздействий и событий, а также их комбинаций, которые могут привести к количественно отличающимся результатам оценки безопасности.

59. Метод разработки сценариев эволюции системы захоронения РАО можно считать приемлемым, если разработанные сценарии соответствуют целям оценки безопасности, отражают в необходимой степени поведение системы захоронения РАО и возможные направления ее эволюции, а также учитывают возможные ошибки в определении эффективности барьеров безопасности ППЗРО.

60. При разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО рекомендуется использовать следующие методы или их комбинации:

экспертный метод;

анализ списка свойств, событий и процессов, важных для безопасности ППЗРО;

построение матрицы взаимодействий.

61. Экспертный метод, применяемый в целях определения и выбора сценариев эволюции системы захоронения РАО, основан на анализе мнений специалистов (экспертов), их знании условий размещения ППЗРО, системы захоронения РАО, ее отдельных элементов, возможных состояний (элементов) системы и ее поведения со временем в предполагаемых условиях, а также имеющегося опыта, например, в части проектирования или эксплуатации аналогичных объектов, и состоит в формализации такого мнения.

62. Метод анализа списка свойств, событий и процессов, важных для безопасности ППЗРО, предполагает анализ полного перечня свойств, событий и процессов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, характерных для конкретных района, площадки размещения ППЗРО, а также системы захоронения РАО и влияющих на безопасность ППЗРО, на основании которого выделяются наиболее важные свойства, события и процессы, определяющие соответствующие сценарии эволюции системы захоронения РАО.

63. При применении метода анализа списка свойств, событий и процессов, важных для безопасности ППЗРО, рекомендуется использовать индуктивный или дедуктивный методы или их комбинацию.

При применении дедуктивного метода анализа (метод анализа дерева отказов, метод «сверху вниз») рекомендуется на основе анализа наиболее вероятных событий и процессов, которые могут произойти в рассматриваемом ППЗРО, разработать определенный сценарий и на основе данного сценария определить перечень учитываемых свойств, событий и процессов.

При применении индуктивного метода анализа (метод анализа дерева событий, метод «снизу вверх») рекомендуется определить наиболее важные для безопасности ППЗРО свойства, события и процессы и на их основе разработать соответствующие сценарии эволюции системы захоронения РАО.

64. Применение при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО метода построения матриц взаимодействия, который основан на анализе совокупности факторов, событий и процессов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов и их взаимного влияния, позволяет формализовать процесс разработки сценария, что повышает степень объективности

принимаемых решений, позволяет установить иерархию свойств, событий и процессов и учесть их взаимосвязь.

65. На этапе выбора площадки размещения ППЗРО основное внимание рекомендуется уделять разработке сценария нормальной эволюции системы захоронения РАО, консервативно учитывая при этом изменение свойств инженерных барьеров со временем.

В качестве альтернативных сценариев эволюции системы захоронения РАО на данном этапе рекомендуется рассматривать возможность преждевременного полного или частичного разрушения инженерных барьеров или их отдельных элементов по истечению определенного времени после закрытия ППЗРО, а также возникновения внешних воздействий природного и техногенного происхождения.

66. На этапах проектирования и возведения ППЗРО при разработке сценария нормальной эволюции системы захоронения РАО рекомендуется использовать реалистичный подход, в том числе при учете изменения свойств инженерных барьеров со временем в соответствии с проектом ППЗРО.

При разработке альтернативных сценариев эволюции системы захоронения РАО на данных этапах рекомендуется рассматривать возможность преждевременного полного или частичного разрушения инженерных барьеров или их отдельных элементов и возникновения внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ППЗРО, учитывая при этом опыт размещения ППЗРО и технические и организационные решения, определенные в проекте ППЗРО.

67. На этапе эксплуатации ППЗРО при разработке сценария нормальной эволюции системы захоронения РАО рекомендуется использовать реалистичный подход и учитывать накопленные данные о районе и площадке размещения ППЗРО, а также данные, полученные при эксплуатации ППЗРО, включая результаты радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО. При этом рекомендуется реалистично (на основе проекта ППЗРО и с учетом опыта эксплуатации ППЗРО) учитывать изменение состояния инженерных и естественных барьеров и влияние этих изменений на возможность выхода радионуклидов за пределы инженерных барьеров и последующую миграцию в естественных барьерах.

В качестве альтернативных сценариев эволюции системы захоронения РАО рекомендуется рассматривать сценарии преждевременного разрушения инженерных барьеров и их отдельных элементов и возникновения внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ППЗРО, учитывая при этом опыт размещения, проектирования, возведения и эксплуатации данного

ППЗРО и используя при разработке сценариев уточненные исходные данные и допущения.

68. На этапе закрытия ППЗРО и после его закрытия рекомендуется уточнить сценарий нормальной эволюции ППЗРО и альтернативные сценарии с учетом технических и организационных решений, предусмотренных проектом закрытия ППЗРО, и их реализации.

69. Сценарии непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО рекомендуется учитывать на всех этапах жизненного цикла ППЗРО, в том числе при разработке критериев приемлемости РАО для захоронения в данный ППЗРО.

70. При проведении оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется обосновать достаточность рассмотренного перечня сценариев эволюции системы захоронения РАО для достижения целей проведения оценки долговременной безопасности ППЗРО на определенном этапе жизненного цикла ППЗРО с учетом рассмотренного перечня факторов природного и техногенного характера, событий и процессов, значимых для безопасности ППЗРО.

ГЛАВА 4
РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗНЫХ РАСЧЕТОВ

71. Для перехода от сценария эволюции системы захоронения РАО к количественной оценке его последствий, выполнению прогнозных расчетов распространения радионуклидов в окружающей среде и радиационного воздействия на население и окружающую среду рекомендуется разработать соответствующие выбранным сценариям концептуальные и математические модели.

72. Концептуальные модели представляют собой набор предположений об особенностях эволюции системы захоронения РАО, происходящих в ней и вне ее событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, влияющих на безопасность системы захоронения РАО, а также определяющих процессы переноса радионуклидов от источника в окружающую среду и их радиационное воздействие на население и окружающую среду.

73. Цель разработки концептуальной модели ППЗРО состоит в систематическом качественном описании ППЗРО как объекта радиационного воздействия на население и окружающую среду, отражающем его эволюцию в соответствии с разработанными сценариями эволюции системы захоронения РАО.

74. В концептуальную модель рекомендуется включить краткое описание:

характеристик системы захоронения РАО как источника радионуклидов (содержание и активность радионуклидов, скорость их выхода из упаковок РАО, формы миграции радионуклидов и их гидрогеохимические свойства, физико-химическая форма РАО и т.д.), ее элементов и взаимосвязи между ними;

эволюции системы захоронения РАО в соответствии с принятым сценарием;

перечня событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов;

свойств геосферы в районе размещения ППЗРО;

свойств биосферы в районе размещения ППЗРО;

физико-химических процессов, определяющих выход радионуклидов из упаковки РАО (например, путем диффузии, инфильтрации атмосферных осадков, газовыделения вследствие различных процессов, эвапотраспирации) и миграцию радионуклидов через инженерные барьеры и далее в геосфере (конвективно-дисперсионный и диффузионный механизмы переноса с учетом различных физико-химических процессов (сорбции, ионного обмена, растворения (выщелачивания));

возможных процессов, определяющих миграцию радионуклидов в биосфере;

путей воздействия радионуклидов на человека и окружающую среду (например, внешнее и внутреннее облучение, потребление загрязненной воды и продуктов питания, вдыхание радиоактивной пыли);

пределов применимости концептуальной модели в рассматриваемых пространственной области и временном диапазоне с учетом допущений, при которых она была разработана;

начальных и граничных условий, задаваемых при проведении прогнозных расчетов.

75. Наряду с общим описанием концептуальную модель рекомендуется представлять в виде блок-схемы.

76. Разработанную концептуальную модель рекомендуется использовать в качестве основы для разработки математической (расчетной) модели (или моделей), представляющей собой совокупность математических соотношений, уравнений и неравенств, описывающих основные закономерности, присущие изучаемым системе захоронения РАО и внешним и внутренним процессам с соответствующими начальными и граничными условиями.

77. Для оценки долговременной безопасности ППЗРО допустимо использовать универсальные математические модели или модели, разработанные для моделирования определенных процессов и (или) элементов системы захоронения РАО, в том числе:

модели источника радионуклидов и его изменения со временем;

модели миграции радионуклидов через инженерные барьеры (с учетом изменений свойств материалов барьеров);

модели миграции радионуклидов через измененную в ходе возведения и эксплуатации ППЗРО вмещающую среду;

модели миграции радионуклидов в геологической среде;

модели переноса радионуклидов в поверхностной гидросфере;

модели атмосферного переноса радионуклидов;

модели внешних воздействий и условий окружающей среды и их изменения со временем (например, изменение количества атмосферных осадков, уровней подземных вод, режима поверхностных водоемов и водотоков);

модели радиационного воздействия на население и окружающую среду;

модели, применяемые для расчета исходных данных и входных параметров других моделей.

В приложении 3 к настоящему Руководству по безопасности приведены примеры математических моделей источника, фильтрации подземных вод и переноса радионуклидов с подземными водами, применяемых при оценке долговременной безопасности ППЗРО.

В приложении 4 к настоящему Руководству по безопасности приведены примеры моделей радиационного воздействия для типовых сценариев непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО.

78. При проведении численных расчетов оценки долговременной безопасности ППЗРО допустимо применять численные или аналитические математические модели в зависимости от цели проведения оценки безопасности ППЗРО, удобства и возможности применения тех или иных моделей в данных расчетах.

Допустимо в одной модели использовать сочетание аналитических и численных решений.

79. При разработке математических моделей рекомендуется определить перечень входных параметров расчета (переменных), определить их значения и оценить соответствующие неопределенности (погрешности).

80. Если при оценке входных параметров применялся вероятностный подход, рекомендуется обосновать выбранные распределения вероятности.

81. На начальных этапах жизненного цикла ППЗРО допустимо использовать упрощенные математические модели и усложнять их при необходимости на последующих итерациях по мере получения новых данных о системе захоронения РАО и ее поведении во времени.

Упрощенные модели также рекомендуется использовать для обнаружения ошибок в расчетах, быстрого анализа полученных результатов, оценки влияния отдельных процессов на конечный результат, выбора дозообразующих радионуклидов и других целей.

82. При моделировании переноса радионуклидов из ППЗРО в окружающую среду в рамках упрощенной модели допустимо:

ограничить круг рассматриваемых процессов наиболее значимыми;

рассматривать схематичное описание системы захоронения РАО;

принимать упрощенное описание процессов выхода радионуклидов из источника;

предполагать постоянство условий переноса радионуклидов;

принимать упрощенные граничные и начальные условия;

использовать упрощенные модели процессов переноса радионуклидов;

предполагать гомогенность сред, в которых происходит перенос радионуклидов.

83. При выборе и определении параметров математических моделей рекомендуется:

документировать перечень и значения параметров, используемых в моделях и программных средствах для оценочных расчетов, и обосновывать их применение;

документировать сведения о методах определения значений параметров.

84. При построении математических моделей рекомендуется применять итерационный подход и представлять модель в виде отдельных блоков, подлежащих самостоятельной верификации, в целях сокращения объема аналитических и натурных испытаний при верификации общей модели.

85. При разработке математических моделей рекомендуется обосновать пригодность модели, ее соответствие целям моделирования и целям оценки долговременной безопасности ППЗРО и убедиться в достоверности и точности результатов, получаемых в ходе моделирования.

86. При выборе или разработке модели для решения задач оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется провести анализ следующих характеристик модели:

адекватность (достоверность), то есть степень соответствия модели реальному объекту и моделируемым процессам, а также целям моделирования;

устойчивость, то есть способность модели сохранять адекватность (достоверность) при изменении исходных данных, входных параметров, граничных условий и допущений, включая изменение состава, границ и свойств системы захоронения РАО, перечня и характеристик внешних и внутренних воздействий и процессов, а также иных объектов и процессов, подлежащих моделированию, в установленном диапазоне их возможных изменений;

чувствительность, то есть степень влияния изменения исходных данных или входных параметров модели (в некотором заданном диапазоне) на результат моделирования.

87. Адекватность (достоверность) и точность моделей, применяемых расчетных методик и расчетных схем рекомендуется обосновывать (верифицировать) путем сопоставления результатов моделирования:

с результатами теоретического анализа;

с результатами, полученными при применении других моделей, адекватность (достоверность) и точность которых оценена;

с результатами, полученными с использованием аттестованных программных средств, если таковые имеются;

с экспериментальными данными и эксплуатационными данными, включая данные радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО.

88. При анализе чувствительности математических моделей рекомендуется определить исходные данные, входные параметры и предположения, которые оказывают наибольшее влияние на результат моделирования, оценить диапазон их изменений и влияние изменений на поведение моделей и результат моделирования.

89. При анализе чувствительности математических моделей рекомендуется задавать отклонение одного или нескольких исходных данных или входных параметров в пределах разумного диапазона выбранных референтных или средних значений и определять при этом изменения выходных значений характеристик модели, устанавливая таким образом степень зависимости выходных параметров модели от входных характеристик.

90. Для повышения качества результатов моделирования при проведении оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выполнить коррекцию (калибровку, уточнение) математической модели на основе реальной информации (экспериментальных данных и исследований).

91. Коррекцию (калибровку, уточнение) модели рекомендуется осуществлять итеративно путем изменения модели в целом, изменения определенных блоков модели или отдельных элементов моделирования (в частности, изменения законов распределения моделируемых величин), а также отдельных входных параметров (калибровочных параметров).

92. Численные прогнозные расчеты при оценке долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется проводить с использованием программных средств, реализующих соответствующие математические модели и содержащих численные схемы для решения уравнений математических моделей. При этом могут быть использованы как существующие, так и специально разработанные для этой цели программные средства.

93. Для получения корректного результата при выполнении прогнозных расчетов оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется задавать обоснованные входные параметры для используемого программного средства и учитывать возможные отличия перечня и значений входных параметров программного средства от реальных данных, а также соответствующие неопределенности (погрешности) определения входных параметров.

ГЛАВА 5
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ППЗРО С УЧЕТОМ ИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ (ПОГРЕШНОСТЕЙ)

94. Оценку потенциального радиационного воздействия ППЗРО на население и окружающую среду после закрытия ППЗРО в период потенциальной опасности захороненных РАО, вывод об обеспечении долговременной безопасности ППЗРО и соответствующие решения о необходимости разработки и обоснования мер по обеспечению и повышению безопасности ППЗРО рекомендуется делать на основе сопоставления численных результатов прогнозных расчетов с установленными критериями (показателями) безопасности ППЗРО с учетом неопределенности (погрешности) полученных результатов.

95. Результаты прогнозных расчетов оценки долговременной безопасности ППЗРО в зависимости от формата расчетных величин (в виде единственного значения расчетной величины (например, удельная активность определенного радионуклида в определенном месте в фиксированный момент времени) или распределения расчетных величин (например, зависимость удельной активности определенного радионуклида в определенном месте от времени)) рекомендуется

представлять в виде таблиц или графиков в форме, удобной для сопоставления результатов с установленными критериями (показателями) безопасности ППЗРО, с указанием неопределенностей (погрешностей) полученных значений.

96. В целях возможности сопоставления результатов прогнозных расчетов с установленными критериями (показателями) безопасности ППЗРО и обоснования достоверности результатов рекомендуется проводить качественный и количественный анализ неопределенностей (погрешностей) полученных результатов.

97. Анализ неопределенностей (погрешностей) результатов прогнозного расчета рекомендуется проводить с целью оценки границ погрешностей величин и неопределенности предположений, используемых при расчетах, анализа их влияния на неопределенности (погрешности) расчетных величин, оценки их допустимости и разработки подходов к их снижению.

98. При анализе неопределенностей (погрешностей) результатов прогнозного расчета рекомендуется описать источник неопределенностей и погрешностей, характер и величину с использованием количественных и качественных методов, в том числе профессиональных суждений.

99. Неопределенность (погрешность) результатов прогнозных расчетов рекомендуется определять двумя составляющими – методической и константной (параметрической):

источники методической составляющей неопределенности (погрешности), упрощающие допущения, принятые в сценариях эволюции системы захоронения РАО, концептуальных и математических моделях, определяющих и количественно описывающих процессы эволюции системы захоронения РАО, а также переноса радионуклидов от источника к объекту воздействия и само воздействие;

источники константной (параметрической) составляющей неопределенности (погрешности) – неопределенности (погрешности) значений исходных данных или параметров расчета, связанные с неполнотой или неточностью исходных данных, получаемых либо экспериментальным путем, либо в результате использования других математических моделей, характеризующихся, в свою очередь, присущими им методической и константной составляющими неопределенности (погрешности).

100. При анализе неопределенности (погрешности) результатов прогнозных расчетов оценки долговременной безопасности ППЗРО рекомендуется выделять их следующие составляющие:

неопределенности, присущие сценариям эволюции системы захоронения РАО;

неопределенности, присущие концептуальным и математическим моделям;

неопределенности (погрешности), обусловленные недостаточностью или неточностью исходных данных и входных параметров моделей и их изменчивостью во времени.

Рекомендуется оценить все составляющие неопределенности (погрешности) результатов оценки долговременной безопасности ППЗРО.

101. Неопределенность сценариев эволюции системы захоронения РАО обусловлена неопределенностью процессов эволюции системы захоронения РАО в будущем и состояния системы захоронения РАО и включает неопределенность в развитии и поведении системы захоронения РАО, неопределенность прогноза изменения условий района и площадки размещения ППЗРО, возникновении тех или иных внешних воздействий и процессов и их параметров, а также неопределенность условий существования человека и его поведения в отдаленном будущем. Как правило, неопределенности определения сценариев эволюции системы захоронения РАО оценивают качественно.

102. Неопределенность моделей является следствием несовершенных аппроксимаций реальности, неизбежно содержащих в себе приближения и упрощения, и обусловлена несовершенством знания системы захоронения РАО и процессов, проходящих как в ППЗРО, так и за его пределами, а также следствием упрощений, допущений и идеализации сложных процессов и явлений, происходящих в рассматриваемой системе, неопределенностью и погрешностью параметров модели, начальных и граничных условий и ограниченной точностью численных методов решения математических уравнений, описывающих поведение расчетной модели в целом.

103. Неопределенность (погрешность) исходных данных и входных параметров могут быть связаны с неполнотой информации, неточностью их экспериментального измерения, а если исходные данные или входные параметры получают расчетным путем в ходе математического моделирования, с неопределенностями, присущими соответствующим математическим моделям.

Неопределенность исходных данных и входных параметров рекомендуется оценивать количественно с учетом результатов анализа чувствительности соответствующих моделей к данным величинам.

104. При анализе неопределенностей (погрешностей) результатов прогнозного расчета рекомендуется учитывать, что при моделировании

последовательного ряда процессов результаты расчетов предыдущего процесса являются исходными данными для расчета последующего. В этом случае обе составляющие неопределенности расчетных величин тем существеннее, чем большее количество процессов вовлечено в моделирование.

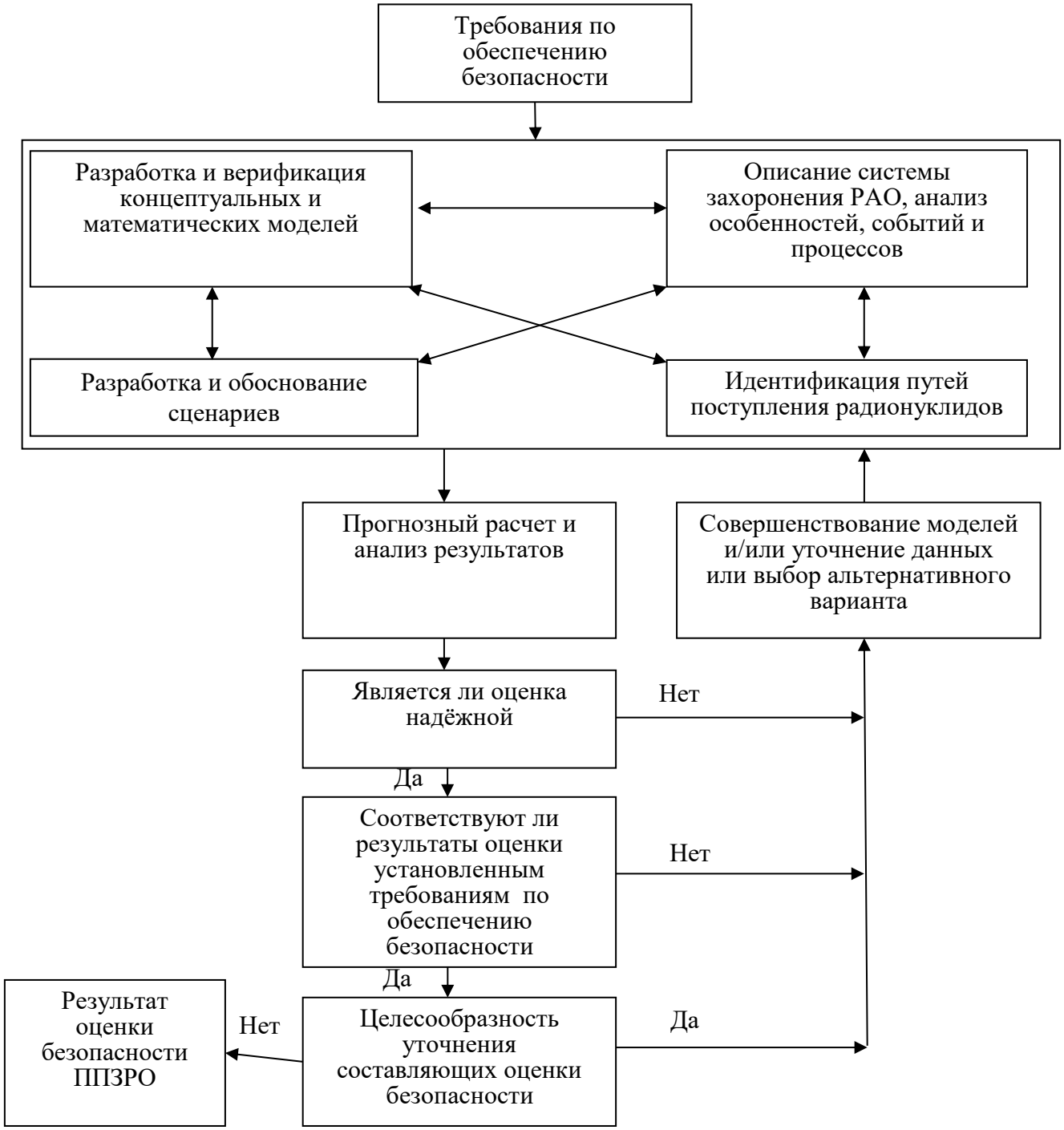
105. При анализе результатов прогнозных расчетов в целях оценки степени влияния исходных данных и входных параметров математической модели на поведение моделей и результат моделирования рекомендуется определить относительную важность применяемых исходных данных и входных параметров по степени влияния присущих им неопределенностей и погрешностей на неопределенности и погрешности расчетных величин; выявить наиболее значимые данные и параметры и оценить качественно или количественно их влияние на результаты расчетов, что выполняется в рамках проведения анализа чувствительности соответствующих математических моделей.

106. Для наиболее важных по результатам анализа чувствительности математической модели в целях повышения достоверности и точности результатов моделирования рекомендуется при последующих итерациях оценки долговременной безопасности ППЗРО использовать экспериментальные данные, в том числе полученные в ходе натурных исследований, радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО.

107. В целях снижения неопределенностей (погрешностей) результатов оценки долговременной безопасности ППЗРО целесообразно при выполнении расчетов использовать подходы, основанные на применении либо наиболее консервативных значений исходных данных, параметров, допущений или предположений, либо достоверной информации, в том числе использовать реалистичные значения исходных данных и входных параметров моделей, полученные или подтвержденные экспериментально, и стремиться к снижению неопределенности в прогнозировании поведения системы захоронения РАО и рассматриваемых процессов путем проведения соответствующих теоретических и экспериментальных исследований.

Приложение 1
к Руководству по ядерной и радиационной безопасности «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов»

Блок-схема итерационного подхода к оценке долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов



Приложение 1.1
к Руководству по ядерной и радиационной безопасности «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов»

Рекомендации по реализации консервативного подхода при моделировании миграции радионуклидов в системе барьеров безопасности и вмещающей геологической среде в рамках оценки долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов

1. Вариантом реализации консервативного подхода в рамках оценки долговременной безопасности ППЗРО является использование одномерного камерного моделирования для расчета миграции радионуклидов в системе барьеров безопасности и вмещающей геологической среде.

2. Создание камерной модели, описывающей систему захоронения РАО.

2.1. Система захоронения РАО рассматривается как совокупность камер (блоков), между которыми происходит перенос радионуклидов (камерная модель).

2.2. Камерная модель системы захоронения РАО имеет блочную структуру, включающую:

область захоронения РАО;

инженерные барьеры безопасности ППЗРО;

элементы ближней зоны системы захоронения РАО;

элементы дальней зоны системы захоронения РАО;

элементы окружающей среды (биосфера).

Пример камерной модели, состоящей из трех блоков, приведен на рисунке 1.

2.3. Элементы ППЗРО, в которых не происходит перенос (миграция) радионуклидов, не учитываются в камерной модели.

2.4. Перенос радионуклидов между камерами описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{dN_i}{dt} = \left(\sum_{j\neq i} \lambda_{ji} N_j + \lambda_m M_i + S_i(t)\right) - \left(\sum_{j\neq i} \lambda_{ji} N_i + \lambda_N N_i\right), \qquad (1)$$

где i и j – камеры;

N и M – количество (активность) радионуклидов N и M в камере (N – дочерний радионуклид в цепочке распада), Бк;

$S(t)$ – внешний источник радионуклида N, Бк/год;

λ_N, λ_M – постоянные распада для радионуклидов N и M, год$^{-1}$;

λ_{ji} и λ_{ij} – коэффициенты переноса, характеризующие процессы поступления и выхода радионуклида N из камер i и j, год$^{-1}$.

Для камерной модели, приведенной на рисунке 1, система линейных дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{gathered}\frac{dN_1}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{dr})N_1 + S(t) \\ \frac{dN_2}{\partial t} = -(\lambda_{23} + \lambda_{dr})N_2 + \lambda_{12}N_1, \\ \frac{dN_3}{\partial t} = -\lambda_{dr}N_3 + \lambda_{23}N_2\end{gathered} \tag{2}$$

где $S(t)$ характеризует поступление радионуклида в первую камеру модели;

λ_{dr} – постоянная радиоактивного распада, год$^{-1}$.

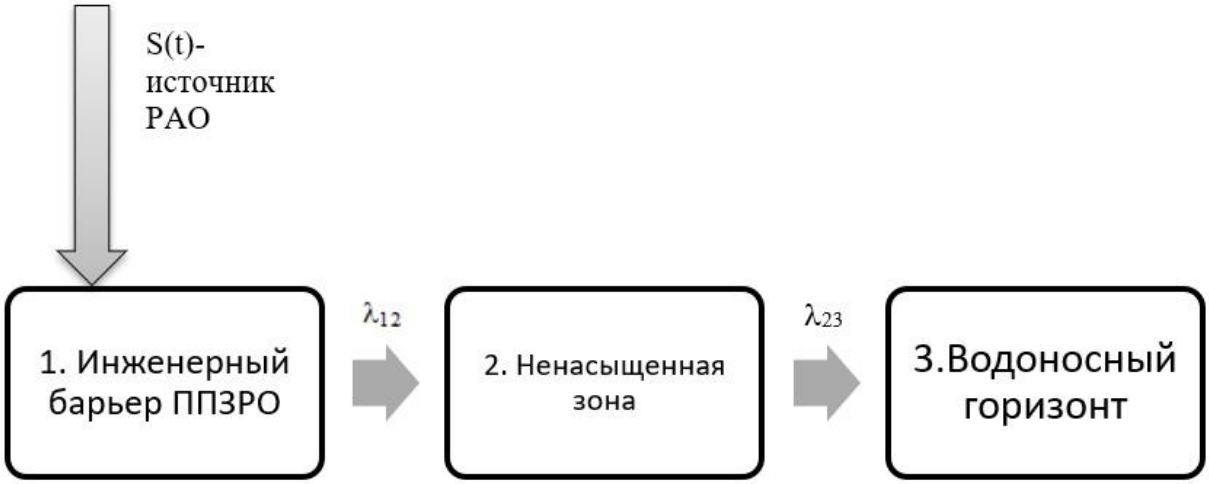


Рисунок 1. Трехкамерная модель системы захоронения РАО

2.5. В камерной модели предполагается так называемое полное смешивание радионуклида в соответствующей камере (мгновенное достижение равномерной концентрации радионуклида в камере).

2.6. Камерная модель системы захоронения РАО создается с учетом рекомендаций по использованию упрощенной модели переноса радионуклидов из ППЗРО, приведенных в п.82 настоящего Руководства по безопасности.

3. Определение коэффициентов переноса радионуклидов между камерами.

3.1. Вертикальный перенос радионуклидов в упаковках РАО, инженерных барьерах безопасности, ненасыщенной зоне.

Перенос радионуклидов в упаковках РАО, инженерных барьерах безопасности и ненасыщенной зоне описывается коэффициентом λ_{in}:

$$\lambda_{in} = \frac{q_{in}}{\theta_{\omega} dR}, \quad (3)$$

где q_{in} – скорость инфильтрации в среде (упаковках РАО/инженерных барьерах безопасности/ненасыщенной зоне), м/год;

θ_{ω} – активная пористость среды;

d – глубина (толщина) среды, через которую происходит перенос радионуклидов, м.

Безразмерный коэффициент задержки R определяется следующим образом:

$$R = 1 + \frac{\rho K_d}{\theta_{\omega}}, \quad (4)$$

где K_d – коэффициент межфазного распределения радионуклида в среде, м^3/кг;

ρ – плотность среды, кг/м^3.

3.2. Конвективный перенос.

Конвективный поток Φ_{ij} (Бк/год) радионуклида из камеры i в камеру j определяется следующим образом:

$$\Phi_{ij} = \theta_{\omega i} v_i \chi_{ij} C_i, \quad (5)$$

где v_i – скорость конвективного потока, м/год;

χ_{ij} – общая поверхность камер i и j, м^2;

C_i – объемная активность (концентрация) радионуклида в поровой воде камеры i, Бк/м^3.

Скорость конвективного потока v_i определяется следующим образом:

$$v_i = \frac{k_i \frac{\partial H}{\partial x}}{\theta_{\omega i}}, \quad (6)$$

где k_i – коэффициент фильтрации в камере i, м/год,

$\partial H/\partial x$ – градиент напора.

Коэффициент конвективного переноса между камерами i и j определяется следующим образом:

$$\lambda_{adv} = \frac{v_i}{R_i L_i}, \quad (7)$$

где v_i – скорость конвективного потока в камере i, м/год;
Ri – коэффициент задержки для материала камеры i;
Li – длина камеры i, м.

3.3. Диффузионный/дисперсионный перенос

Диффузионный/дисперсионный поток Φ_{ij} радионуклидов из камеры i в камеру j определяется следующим образом:

$$\Phi_{ij} = \theta_i D_i \chi_{ij} \frac{C_i - C_J}{\Delta}, \quad (8)$$

где D_i – коэффициент дисперсии в камере i, м^2/год, объединяющий процессы молекулярной диффузии в жидкости и дисперсии, возникающей при движении жидкости в поровой среде. Коэффициент дисперсии D_i определяется следующим образом:

$$D_i = \theta_i D_e + \alpha_L |v_i| \approx \alpha_L |v_i|, \quad (9)$$

где D_e – коэффициент молекулярной диффузии в жидкости, м^2/год;
θi – полная пористость в камере i;
α_L – продольная дисперсия, м;
Δ – длина, которая задается как расстояние между центрами камер или меньшая из длин двух камер в направлении потока, м.

Диффузионный/дисперсионный поток моделируется посредством задания прямого и обратного потоков с коэффициентами переноса между камерами i и j:

$$\lambda_{Dij} = \frac{\alpha_L v_i}{R_i L_i \Delta}, \quad (10)$$

$$\lambda_{Dji} = \frac{\alpha_L v_i}{R_j L_j \Delta}. \quad (11)$$

4. Реализация консервативного подхода.

Из параметров, от которых зависят коэффициенты переноса (7), (10), (11), наибольшей неопределенностью характеризуются α_L и K_d, значения которых для схожих условий могут изменяться в широких диапазонах. Значения этих параметров, с одной стороны, влияют на расчетную скорость переноса радионуклидов в рассматриваемых средах, а с другой – на размытие фронта движения радионуклидов и их концентрацию.

В задачах оценки долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов, в которых значения расчетных величин (например, концентраций радионуклидов в подземных водах) сравниваются с контрольными уровнями, рекомендуется проведение серии расчетов для различных допустимых значений исходных параметров, в том числе α_L и Kd. В ходе таких расчетов для условий конкретных сценариев определяются результаты, соответствующие наиболее неблагоприятным последствиям, которые в итоге принимаются в качестве консервативной оценки.

Приложение 2
к Руководству по ядерной и радиационной безопасности «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов»

Перечень исходных данных для оценки долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов

1. Исходные данные, характеризующие область источника радионуклидов, включают следующие сведения:

объем (масса) РАО;

происхождение, физическая форма и вид РАО;

физические и химические характеристики РАО (в том числе морфологический (химический) состав РАО, содержание свободной жидкости, скорость выщелачивания, скорость газообразования (газовыделения) и состав образующихся газов, горючесть, содержание легковоспламеняющихся, самовоспламеняющихся, окисляющих и иных пожаровзрывоопасных веществ, содержание органических гниющих, биологически активных и разлагающихся веществ, содержание коррозионно-активных, комплексообразующих и химически токсичных веществ);

радиационные характеристики РАО (упаковок РАО) (радионуклидный состав, удельная, поверхностная и суммарная активность; содержание ядерно-опасных нуклидов, радиоактивное загрязнение (объемное и (или) поверхностное загрязнение));

характеристики формы РАО, контейнеров и упаковок РАО: материалы, массогабаритные характеристики, конструкция; прочностные, фильтрационные и сорбционные свойства; огнестойкость; тепловыделение;

скорость и механизмы разрушения (деградации);

параметры, определяющие взаимодействие радиоактивного содержимого и материалов барьеров безопасности ППЗРО, приводящие к снижению изолирующих свойств барьеров безопасности (например, вследствие газообразования, коррозии, биологических процессов):

параметры, определяющие выход дозообразующих радионуклидов из РАО и ППЗРО:

растворимость радиоактивного содержимого РАО;

скорость выщелачивания (выхода)радионуклидов и ее изменение со временем;

скорость газообразования, объем и скорость выхода образующихся газов;

скорость смыва радионуклидов с загрязненных поверхностей упаковок РАО (неупакованных РАО);

характеристики, определяющие образование комплексных соединений, перенос радионуклидов в коллоидной форме, выпадение в осадок и кристаллизацию РАО.

При определении исходных данных, характеризующих область источника радионуклидов для эксплуатируемых ППЗРО, рекомендуется учитывать состояние РАО, формы, контейнеров и упаковок РАО и его изменение со временем вследствие процессов, происходящих в системе захоронения РАО.

2. Исходные данные, характеризующие инженерную часть ППЗРО, включают:

состав и характеристики системы барьеров безопасности;

конструкцию и геометрические характеристики барьеров безопасности;

конструкционные материалы;

защитные, прочностные, изолирующие характеристики барьеров безопасности, в том числе относящиеся к их долговременной стабильности в условиях захоронения:

механические, радиационные и тепловые нагрузки;

гидравлические и гидрогеологические процессы и условия;

химические и геохимические процессы и условия;

биохимические процессы и условия;

термические процессы и условия;

механизмы и условия разрушения (деградации).

Исходные данные, характеризующие свойства конструкционных материалов инженерных барьеров ППЗРО, их защитные, прочностные и изолирующие свойства и изменение со временем включают, в том числе:

пористость, плотность;

водопроницаемость (коэффициент фильтрации);

эффективный коэффициент диффузии основных дозообразующих радионуклидов;

коэффициент распределения дозообразующих радионуклидов в материалах инженерных барьеров;

скорость коррозии металлических элементов (арматуры, конструкций, контейнеров).

При определении исходных данных, характеризующих инженерную часть эксплуатируемых ППЗРО, рекомендуется учитывать состояние барьеров безопасности ППЗРО и их изменение со временем

вследствие процессов, происходящих в системе инженерных барьеров ППЗРО.

3. Исходные данные, характеризующие геологические и гидрогеологические характеристики пород, не измененных и измененных в процессе возведения и эксплуатации ППЗРО, включают:

тип и минералогический состав пород, их петрографическое описание;

плотность, пористость и влажность пород;

мощность от основания ППЗРО до водоносных горизонтов, в которых происходит миграция радионуклидов;

мощность ненасыщенной зоны (зоны аэрации);

мощности рассматриваемых водоносных горизонтов;

химический состав подземных вод, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия среды;

радионуклидный состав вод;

величину напоров для рассматриваемых водоносных горизонтов;

коэффициенты фильтрации для рассматриваемых водоносных горизонтов и для зоны аэрации;

коэффициенты межфазного распределения радионуклидов в породах;

коэффициенты продольной и поперечной дисперсии;

коэффициенты диффузии в рассматриваемых водоносных горизонтах и разделяющих толщах (водоупорных горизонтах);

характеристику водоупорных горизонтов (минералогический состав, глубина залегания, мощность, плотность, пористость, влажность, наличие фильтрационных окон).

Для эксплуатируемых ППЗРО рекомендуется учитывать возможные изменения приведенных исходных данных со временем в связи с изменениями геологических и гидрогеологических условий в ближней зоне, вызванными возведением и эксплуатацией ППЗРО.

4. Исходные данные, характеризующие условия (район и площадку) размещения ППЗРО, включают:

данные о физико-географических условиях: карта рельефа, геоморфологическая характеристика района, метеорологические данные (количество осадков, распределение осадков в течение года испарение, среднегодовая и среднесезонная температура воздуха, преобладающее направление ветра, глубина промерзания или оттаивания), описание поверхностных водоемов и водотоков, модуль поверхностного стока рассматриваемого района;

геологические данные: геологические, структурные и тектонические карты, геологические разрезы, стратиграфические колонки, характеристики горных пород;

гидрогеологические данные: карты, гидрогеологические разрезы, описание областей питания и разгрузки подземных вод, направление движения потока, данные режимных наблюдений за динамикой, химическим и радионуклидным составом;

данные о возможных внешних воздействиях природного происхождения (например, землетрясения, смерчи, затопления, эрозия, карстово-суффозионные процессы);

данные о возможных внешних воздействиях техногенного происхождения (авиакатастрофы, внешние пожары, взрывы);

демографические данные (численность и плотность населения в пределах зоны наблюдения, характер земле- и водопользования, рацион питания населения).

Приложение 3
к Руководству по ядерной и радиационной безопасности «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов»

Примеры моделей источника, фильтрации подземных вод и переноса радионуклидов с подземными водами, применяемых при оценке долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов

1.Модель источника загрязнения

Выщелачивание радионуклидов из матрицы РАО рассматривают как деструкцию, которая описывается уравнением кинетики первого порядка:

$$\frac{\boldsymbol{d}\mathrm{C}}{\boldsymbol{\partial t}} = -\boldsymbol{\lambda}\mathrm{C} - \boldsymbol{\Delta}\mathrm{C}, \qquad (1)$$

где: С-концентрация, кг/м^3;

ΔС-изменение концентрации за счет выхода, кг/м^3 год;

λ- константа скорости деструкции (распада), 1/год.

2.Модель фильтрации подземных вод

Гидродинамическая модель геофильтрационного потока представляет собой его описание с позиции математической физики и включает уравнение движения (основной закон фильтрации), уравнение неразрывности (баланса) потока, уравнения состояния, связывающие напряжения и деформации пласта, а также условия однозначности, состоящие из начальных и граничных условий процесса.

2.1 Основные уравнения модели фильтрации подземных вод

Уравнение движения для фильтрационного потока представляет собой математическую запись основного закона фильтрации (закона Дарси), который связывает расход фильтрационного потока с потерями напора, характеризующими затраты энергии потока. Согласно закону Дарси, в основной области фильтрации существует линейная связь между расходом потока и падением (градиентом) напора. Выражая градиенты напора в обобщенной форме закона Дарси через его производные по соответствующим направлениям, выводят уравнения движения. В потоке постоянной плотности компоненты скоростей

фильтрации ϑ_x, ϑ_y, ϑ_z – по направлению координат x,y,z – в анизотропном пласте имеются выражение:

$$\vartheta_x = -k_x \frac{\delta H}{\partial x},\ \vartheta_y = -k_y \frac{\delta H}{\partial y},\quad \vartheta_z = -k_z \cdot \frac{\delta H}{\partial z}, \tag{2}$$

где H-напор, м;

k_x, k_y, k_z – коэффициенты фильтрации, м/сут, по направлениям координат x,y,z.

Уравнением неразрывности описывается материальный баланс потока. Суммарное изменение материального количества воды при прохождении потока через элемент пространства по различным направлениям должно компенсироваться изменением количества воды, содержащейся в этом элементе. Уравнение неразрывности представляется в следующем виде:

$$-\frac{\partial(\gamma\vartheta_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\gamma\vartheta_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\gamma\vartheta_z)}{\partial z} = \frac{1}{1+\varepsilon} \cdot \frac{\partial(\gamma\varepsilon)}{\partial t}, \tag{3}$$

где: γ – удельный вес, кг/м^3;

ε – коэффициент пористости.

Дифференциальное уравнение фильтрации описывает распределение напора(давления) в фильтрационном потока:

$$\eta * \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial H}{\partial z}\right), \tag{4}$$

Где η^* - коэффициент упругоемкости, м$^{-1}$.

Начальные условия отвечают исходным напорам в пределах области фильтрации и задаются во всех точках в виде известной функции координат. Начальные условия применяются при исследовании нестационарных процессов.

Граничные условия в геофильтрационных расчетах задаются на границах потока в форме задания напора (условие первого рода), градиента напора или расхода потока (условие второго рода) или их линейной комбинации (условие третьего рода).

2.2 Фильтрация в зоне аэрации

Специфическим признаком зоны аэрации является неполное водонасыщение, тесно связанное с проявлением капиллярных сил.

При гравитационном влагопереносе в зоне неполного насыщения скорость фильтрации определяется законом, идентичным закону Дарси,

в котором коэффициент пропорциональности существенно зависит от влажности.

$$\vartheta = -k_{\omega}\frac{\partial H}{\partial l}, \quad (5)$$

где k_{ω} – коэффициент влагопереноса в зоне неполного насыщения(коэффициент фильтрации), м/сут.

Из теоретических соображений и анализа экспериментальных данных следует, что зависимость коэффициента влагопереноса от относительной влажность имеет степенной характер вида:

$$k_{\omega} = K_{\phi}\overline{\omega^{n}}, \quad (6)$$

где k_{ϕ} – коэффициент влагопереноса при полном водонасыщении (коэффициент фильтрации), м/сут.

$$\overline{\omega} = \frac{\omega-\omega_0}{\omega_n-\omega_0}, \quad (7)$$

где: $\overline{\omega}$ – относительная влажность;

ω – текущее влагосодержание свободной(несвязанной) воды;

ω_0 – влажность, при которой движение влаги практически отсутствует;

ω_n– полная влагоемкость.

Для показателя степени рекомендуется использовать значения n=3÷4.

В определенном диапазоне изменения влажности можно пользоваться экспоненциальной зависимостью коэффициента фильтрации от влажности:

$$k_{\omega} = k_{\phi}e^{-\propto(\omega_0-\omega)}, \quad (8)$$

где по литературным данным принимают $\propto\cong$ 20-70.

В теории влагопереноса обычно вместо высоты давления используется величина давления всасывания. Зависимость коэффициента фильтрации (влагопереноса) от давления всасывания рекомендуется выражение:

$$K_{\omega} = \frac{k_{\phi}}{1+\propto\psi^{m}}, \quad (9)$$

Где:$\psi = -h_P$: ψ- давление всасывания, м;

h_p – высота давления, м;

параметр *m для* песков принимают равным 2, для тяжёлых суглинков – 4.

уравнение вертикального влагопереноса:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(D_\omega \frac{\partial \omega}{\partial z}\right) + \frac{\partial k_\omega}{\partial z} = \frac{\partial \omega}{\partial t}, \qquad (10)$$

где D_ω – капиллярная диффузивность, или диффузивность почвенной влаги, м^2/сут.

Скорость инфильтрационного просачивания рассчитывается:

$$\vartheta_l = \frac{w}{\omega_0\left(\frac{w}{k_\text{ф}}\right)^{1/n} - \omega_e}, \qquad (11)$$

где ϑ_l – скорость инфильтрационного просачивания, м/сут;

w – интенсивность дождевания, м/сут;

ω_e – начальное значение влажности.

При n=3 получено решение:

$$\vartheta_i = \frac{1}{\omega_0} \cdot \sqrt[3]{w^2 k_\text{ф}}, \qquad (12)$$

При интенсивном протекании процессов влагопереноса существенно проявляется неупорядоченная неоднородность строения зоны аэрации, которая обуславливается литолого-фациальной изменчивостью пород, наличием ходов землероев и остатков растений. Для учета этого фактора при математическом описании влагопереноса используется модель блоковой гетерогенной среды, аналогичной среде с двойной емкостью. Влияние гетерогенности пород зоны аэрации на процессы инфильтрации подтверждается существующими данными о довольно резкой площадной неравномерности инфильтрации.

3. Модель подземной миграции радионуклидов

Гидродинамические основы миграции подземных вод базируются на представлении о тепло- и массопереносе в подземных водах.

3.1. Основные уравнения подземной миграции

3.1.1. Конвективный перенос

Важнейшим фактором в миграции подземных вод является конвективный перенос частиц воды фильтрационным потоком. В качестве основной характеристики скорости конвективного переноса используется действительная скорость фильтрации u, которая представляет собой отношение расхода фильтрационного потока к площади пор его поперечного сечения и связывается со скоростью фильтрации ϑ соотношением:

$$u = \frac{\vartheta}{n_a}, \quad (13)$$

где n_a – активная пористость породы, которая характеризует часть пор, заполненных свободной водой, в отличие от пор, открытых для фильтрации.

При достаточно длительном взаимодействии породы с раствором, имеющим постоянную во времени концентрацию C, зависимость между концентрацией компонента в растворе C и на твердой фазе N оказывается для данной температуры однозначной и определяется вид изотермы сорбции:

$$N_0 = f(C), \quad (14)$$

где N_0 – сорбционная емкость, определяющая предельно возможное в данных условиях содержание компонента в единице объема породы (равновесное с его содержанием в растворе), мэк/дм^3.

Отношение концентраций N_0 и C связывает коэффициент распределения пары «раствор-порода». Для несорбируемых компонентов K_d =0, для хорошего сорбируемых K_d, м^3/кг, измеряется сотнями и тысячами относительных единиц.

3.1.2. Диффузионно-кондуктивный перенос

Самопроизвольный перенос вещества под действием молекулярных сил возникает при наличии градиента концентрации. Общий поток вещества ориентирован в сторону уменьшения концентрации и определяется законом Фика:

$$Q_{D_M} = -D_M F_l \frac{\partial C}{\partial l}, \quad (15)$$

где Q_{D_M}– общий поток вещества, моль/сут;

D_M – коэффициент молекулярной диффузии, м^2/сут.;

F_l– расчётное сечение, м^2.

Молекулярная диффузия проявляется при фильтрации воды как фактор рассеяния, действующий между жидкостями с различной концентрацией на фронте вытеснения. С молекулярной диффузией ассоциируется механическая дисперсия (гидродисперсия), которая обусловлена неоднородностью поля действующих скоростей. Она также подчиняется закону Фика, но с другим параметром – коэффициентом механической дисперсии D_∂. Различают продольную и поперечную гидродисперсию. Продольная гидродисперсия ориентирована по направлению траекторий конвективного потока. Поперечная

гидродисперсия идет перпендикулярно основному направлению переноса, она приводит к формированию объемных (двух- и трехмерных) ореолов рассеяния. Поперечная дисперсия является важнейшим фактором рассеяния вещества, относительная роль которого возрастает (в отличие от продольной дисперсии) с увеличением масштаба переноса. Благодаря такому рассеянию идет замедление переноса в продольном направлении и сглаживание концентрированных распределений в пределах водоносного горизонта.

Аналогия в характере проявления молекулярной диффузии и механической дисперсии объединяет их в суммарный коэффициент дисперсии D:

$$D = D_M + D_\partial, \tag{16}$$

В приповерхностной зоне при значительных колебаниях температуры проявляется термодиффузия, создающая поток массопереноса под действием градиента температуры.

Тепловой поток подчиняется общему уравнению теплопередачи:

$$Q_T = -\lambda_T \omega \frac{d\theta}{dl}, \tag{17}$$

где: θ – температура в градусах;

λ_T – коэффициент теплопроводности, Вт(м·°С).

При расчетах переноса загрязнения в водоносных пластах, представленных дисперсными породами, определяющее значение обычно имеет конвективный перенос загрязняющих мигрантов с фильтрационным потоком, а различные формы дисперсии играют подчиненную роль. В связи с этим расчеты переноса загрязнения производятся, прежде всего, на основе представления поля скоростей потока, причем для определения направления потока требуется внимательное построение линий тока и траекторий движения мигранта. Учитывая медленность процессов переноса, обычно допустимо для их расчета рассматривать геофильтрационный поток как стационарный (квазистационарный), имея в виду, что при этом траектории будут совпадать с линиями тока.

Для расчетов скоростей и времени переноса мигранта используется схема «поршневого вытеснения», согласно которой в процессе взаимовытеснения жидкостей в фильтрационном потоке предполагается полное их замещение в пределах каждого элемента порового пространства.

Значительное влияние на процессы переноса загрязнения может оказывать профильная фильтрационная неоднородность потока по проницаемости, которая обуславливается в осадочных породах их слоистостью, а в коренных породах – изменениями трещиноватости и выветрелости по глубине.

Существует два принципиально различных метода учета такой неоднородности: метод непосредственной реализации профиля проницаемости при расчетах распределения скоростей переноса по мощности потока и метод опосредованного учета профилей неоднородности в модели конвективно-дисперсионного переноса, при котором определяются средние значения по глубине потока содержания мигрантов, а расчетные значения коэффициент дисперсии определяются по данным натурных наблюдений в аналоговых условиях. Первый метод является методом непосредственной реализации, и представляется, как правило, предпочтительным, поскольку позволяет дать более конкретную оценку влияния профильной неоднородности на распространение загрязняющих мигрантов по глубине потока, что особенно важно при изучении миграции загрязнения в потоках большой мощности. Второй метод, нередко рассматриваемый как основной, целесообразно использовать при расчетах переноса загрязнения в потоках небольшой мощности с неупорядоченной неоднородностью, которая не может схематизироваться как горизонтально слоистая.

Загрязнение подземных вод происходит обычно путем инфильтрации растворов загрязняющих компонентов с поверхности земли. Исходными для расчетов переноса таких загрязнений являются величины интенсивности инфильтрации (площадного питания) и концентрации загрязняющих веществ на входе в поток подземных вод - после прохождения зоны аэрации. Данные величины могут быть определены по результаты специальных наблюдений, а также материалам по объектам-аналогам.

Для оценки поступления радионуклидов через зону аэрации в подземные воды рассматривается задача массопереноса в ненасыщенной зоне.

Уравнение конвективно-дисперсионного переноса потоком влаги:

$$\frac{\partial \omega C}{\partial t} + \rho_d \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \omega D \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial q C}{\partial z} - a(\omega + K_d \gamma) \cdot C - C e_t, \qquad (18)$$

где: ρ_d – плотность скелета породы, кг/м^3;

q – скорость вертикального переноса, м/сут;

e_t – интенсивность отбора влаги корнями растений, м^3/сут;

z – глубина, м.

Для зоны аэрации, имеющей неоднородное строение потока по вертикали, при заданной интенсивности инфильтрации w и при наличии перетекания в подошве потока с интенсивностью $w_н$ скорость потока ϑ_z в вертикальном направление и время прохождения мигранта через i-слой определяется следующими формулами:

$$\vartheta_z = w - (w + w_н)\frac{T_z}{T}, \tag{19}$$

где $T_z = \int_0^z k\,dx$ – проводимость пласта в вертикальном направлении, м^2/сут.

$$\Delta t_i = \frac{n_i T}{k_i(w+w_H)} ln\left[1 + \frac{(w+w_H)\Delta T_i}{wT-(w+w_H)T}\right], \tag{20}$$

где: k_i – коэффициент фильтрации i-го слоя, м/сут;

n_i – активация (эффективная) пористость i-слоя;

$\Delta T_i = k_i \Delta z_i$ – проводимость i-го слоя, м^2/сут;

T – проводимость пласта с поверхности потока до подошвы расчетного i-го слоя, м^2/сут.

Приложение 4
к Руководству по ядерной и радиационной безопасности «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов»

Примеры моделей радиационного воздействия для типовых сценариев непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения радиоактивных отходов

В качестве типовых сценариев непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО ППЗРО рассматриваются следующие сценарии:

проведение буровых работ;

проведение строительных работ (строительство дороги);

проживание на территории захоронения РАО и ведение сельского хозяйства.

1.Проведение буровых работ

Непреднамеренное вторжение в систему захоронения РАО может быть обусловлено проведением буровых работ (например, при изысканиях). Такое вторжение в ППЗРО может вызывать повреждение барьеров безопасности и перенос радиоактивных веществ в окружающую среду и, как следствие, потенциальное облучение человека.

Выход радионуклидов происходит непосредственно при проведении буровых работ, в частности при извлечении загрязнённых горных пород и (или) керна.

Выделяются следующие возможные пути облучения рабочих, выполняющих указанные работы и рассматриваемых в качестве референтной группы:

внешнее облучение от бурового раствора и (или) облака пыли, образовавшегося во время бурения;

внешнее облучение от загрязнённых горных пород и (или) керна;

внутреннее облучение ингаляционным путем.

Выделяются следующие возможные пути облучения населения:

внешнее облучение от облака пыли, образовавшегося во время бурения;

внешнее облучения от загрязнения поверхностей;

внутреннее облучение ингаляционным путем.

Для расчета максимального разового выброса при бурении скважины применяется формула, г/сек:

$$m = Q \cdot q \ / \ 3600, \quad (1)$$

где Q – объемная производительность бурового станка, м^3/час;
q – удельное пылевыделение с 1 м^3 извлеченной породы.

Масса выбрасываемой пыли задается как y, кг/ч. При консервативном подходе предполагается отсутствие (или неисправность) систем улавливания пыли на буровом станке. Масса выбрасываемой пыли зависит от типа станка и категории крепости породы.

От типа бурового станка зависит также и время прохождения одного погонного метра скважины. Время прохождения бурового станка через хранилище с учетом толщины слоя отходов вычисляется по формуле, ч:

$$T = t \cdot h, \quad (2)$$

где: t – время бурения одного погонного метра скважины, час/м;
h – толщина слоя отходов, м.

При этом количество выброшенной в атмосферу пыли составит, кг:

$$X = T \cdot y, \quad (3)$$

Соответственно, активность выбрасываемой пыли составит, Бк:

$$A = A_{\text{уд}} \cdot X, \quad (4)$$

где $A_{уд}$ – удельная активность отходов, Бк/кг.

С учетом активности выброса A, диаметра скважины, средней скорости ветра в направлении населенного пункта, расстояния до населенного пункта, средней температуры и количества осадков, подстилающей поверхности и количества выброшенной в атмосферу пыли рассчитывается приземная концентрация радионуклидов по модели диффузии Гаусса.

Для расчета интеграла приземной концентрации радионуклида r в воздухе на расстоянии x, Бк с/м^3 используется формула:

$$C_{v,r}(x) = Q_r \cdot G_r(x), \quad (5)$$

где Q_r – суммарная активность поступившего в воздух радионуклида r, Бк;

$G_r(x)$ – временной интеграл фактора разбавления примеси в приземном слое воздуха с учетом истощения струи выброса, с/м^3 , рассчитывается по формуле:

$$G_r(x) = \frac{F(x)}{\pi \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot u} exp\left[-\frac{h(x)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right], \quad (6)$$

где: x – расстояние от источника по направлению ветра, м;

u – скорость ветра на высоте выброса, м/с;

$\sigma_y(x)$ – дисперсия струи в поперечном направлении на расстоянии x, м;

$\sigma_z(x)$ – дисперсия струи в вертикальном направлении на расстоянии x, м;

$F_r(x)$ – безразмерная функция истощения струи за счет сухого осаждения радионуклида r;

$h(x)$ – высота центра облака выброса над поверхностью земли на расстоянии x от места выброса, м.

Дисперсия струи в поперечном направлении на расстоянии x от источника выбросов $\sigma_z(x)$ определяется выражением:

$$\sigma_y(x) = \frac{c3 \cdot x}{\sqrt{1 + 0{,}0001 \cdot x}}, \quad (7)$$

где $c_з$ – параметр, зависящий от категории погоды.

Коэффициент вертикальной дисперсии σ_z рассчитывается по формуле:

$$\sigma_z(x) = \begin{cases} f(z_0, x) \cdot g(x) & \text{при } f(z_0, x) \cdot g(x) < \sigma_z^{max} \\ \sigma_z^{max} & \text{при } f(z_0, x) \cdot g(x) \geq \sigma_z^{max}, \end{cases} \quad (8)$$

где σ_z^{max} – предельное значение $\sigma_z(x)$ для данной категории устойчивости;

z_0 – высота шероховатости подстилающей поверхности, см;

x – расстояние от источника выброса, м.

Функции $f(z_0,x)$ и $g(x)$ рассчитывается по формулам:

$$g(x) = a_1 \cdot x^{b1} / \left(1 + a_2 \cdot x^{b2}\right), \quad (9)$$

$$f(z_0, x) = \begin{cases} \ln\left[cl \cdot x^{d1}\left(1 + c2 \cdot x^{b2}\right)\right] & \text{при } z_0 > 10 \text{ см} \\ \ln\left[cl \cdot x^{d1} / \left(1 + c2 \cdot x^{b2}\right)\right] & \text{при } z_0 < 10\text{см}, \end{cases} \quad (10)$$

В таблицах А1-А5 приведены значения параметров, используемых в формулах (8)-(10).

Таблица А1 – Высота шероховатости z_0 для различных типов подстилающей поверхности

Микрорельеф поверхности	Z_0, см
Снег, газон высотой до 1см	1
Скошенная и низкая трава до 15 см	1
Высокая трава до 60 см	4
Неоднородная поверхность с чередующимися участками травы, кустарника и т.п.	10
Парк, лес высотой до 10см	40
Городские постройки	100

Таблица А2 – Значения верхней границы σ_z^{max} для различных категорий устойчивости

Категории устойчивости атмосферы	σ_z^{max}, м
A	1600
B	1200
C	800
D	400
E	250
F	200

Расчет *F(x)* производится по формуле:

$$F(x) = exp\left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{V_g}{u} \cdot \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(x)} exp\left(-\frac{h(x)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right) dx\right], \qquad (11)$$

где V_g – скорость сухого осаждения радионуклида r на подстилающую поверхность (принимается 0,008 м/с).

Таблица А3 – Коэффициенты в функции g(x), используемые для расчета вертикальной дисперсии облака выброса $\sigma_z(x)$

Категория устойчивости	a1	b1	a2	b2
A	0,112	1,06	$5{,}38\cdot10^{-4}$	0,815
B	0,130	0,950	$6{,}52\cdot10^{-4}$	0,755
C	0,112	0,920	$9{,}05\cdot10^{-4}$	0,718
D	0,098	0,889	$1{,}35\cdot10^{-3}$	0,688
E	0,080	0,892	$1{,}58\cdot10^{-3}$	0,686
F	0,0609	0,895	$1{,}96\cdot10^{-3}$	0,684

Таблица А4 – Коэффициенты в функции $f(z_0,x)$

Высота Шероховатости z_0	c1	d1	c2	d2
1	1,56	0,0480	$5{,}25\cdot10^{-4}$	0,45
4	2,02	0,0269	$7{,}76\cdot10^{-4}$	0,37
10	2,72	0	0	0
40	5,16	-0,098	$5{,}36\cdot10^{-2}$	0,225
100	7,37	-0,0927	$2{,}33\cdot10^{-4}$	0,60
300	11,3	-0,128	$2{,}18\cdot10^{-5}$	0,78

Таблица А5 – Коэффициент c3, используемый при расчете $\sigma_y(x)$

Категория устойчивости	c3	Категория устойчивости	c3
A	0,22	D	0,08
B	0,16	E	0,06
C	0,11	F	0,06

При расчете входящих в формулу (6) характеристик дисперсии струи $\sigma_z(x)$, $\sigma_y(x)$ консервативно выбирается такая категория устойчивости атмосферы, при которой на заданном расстоянии x приземная концентрация радионуклидов будет максимальной.

В качестве источника внешнего облучения рабочих при проведении буровых работ рассматривается извлекаемый керн.

Внешняя доза облучения рабочих от обращения с керном цилиндрической формы высотой h, м, и радиусом R, м, определяется, как правило, в точке детектирования на боковой поверхности цилиндра на середине высоты. Плотность потока частиц в данной точке составляет, част/см^2 с:

$$\varphi = S_\gamma/2 \cdot h \cdot \beta(h/2R), \quad (12)$$

где S_γ – объемный выход частиц источника в телесный угол 4 π, част/см^3·с.

Коэффициент $\beta(h/2R)$ рассчитывается с использованием выражения:

$$\beta\left(\frac{h}{R}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + ln\frac{1+\sqrt{1+4\cdot(R/h)^2}}{2} + 2\frac{R}{h} - \sqrt{1+4\cdot R/h}\right], \quad (13)$$

С целью упрощения вычислений можно использовать замену для моноэнергетических источников при переходе от плотности потока частиц к мощности дозы гамма-излучения путем замены множителя $Sr/4\pi$ на множители A_v Γ_G, где A_v- полная объемная активность источника; Γ_G-гамма-постоянная радионуклида. Произведя замену $S_v/2=2\pi\cdot A_v\cdot\Gamma_G$, получается мощность дозы, Зв/ч:

$$H = 2\pi \cdot A_v \cdot \Gamma_G \cdot h \cdot \beta(h/2R), \quad (14)$$

Внешняя доза облучения рабочего от обращения с керном вычисляется по формуле, Зв/час:

$$D = H \cdot \tau, \quad (15)$$

где τ – время облучения рабочего с учетом времени обращения с каждым керном, времени пребывания керна на площадке, количества часов в смене для рабочих, ч.

Для проведения оценки внутреннего облучения рабочих и населения ингаляционным путем производится расчет эффективной дозы в различных органах и тканях (j) от радионуклида r для лиц возрастной группы a по формуле, Зв/год:

$$H^{a,r,j} = A^{a,r} \cdot R^{a,r,j}, \quad (16)$$

где $R^{a,r,j}$ – дозовый фактор конверсии при ингаляции, Зв/Бк;
$A^{a,r}$ – годовое поступление радионуклида, Бк/год.

Внешнее облучение от облака пыли для работников и население рассчитывается по формуле, Зв/год:

$$H^{r,j} = C_r \cdot R^{r,j} \cdot k, \quad (17)$$

где C_r – интеграл приземной концентрации радионуклида r в рассматриваемой точке x, Бк·с/м^3;

$R^{r,j}$ – дозовый фактор конверсии, Зв·м^3/с·Бк;

k – коэффициент защищенности зданиями.

При расчете внешней дозы от загрязненной поверхности для населения следует определить эффективную дозу H, Зв/год, по формуле:

$$H = C_r^s(x) \cdot K \cdot R^s \cdot k, \tag{18}$$

где C_r^s – выпадение радионуклида r в рассматриваемой точке x вследствие прохождения радиоактивного облака, Бк/м^2;

K – коэффициент, учитывающий время нахождения на местности;

R^s- дозовый фактор конверсии для облучения от поверхности, Зв·м^2/с·Бк.

Суммарная доза рабочих рассчитывается как сумма доз внешнего и внутреннего облучения, Зв/год:

$$H_p = H^{r,j} + D + H^{a,r,j}, \tag{19}$$

Суммарная доза населения рассчитывается как сумма доз внешнего и внутреннего облучения, Зв/год:

$$H_N = H^{r,j} + D + H^{a,r,j}, \tag{20}$$

2.Строительство дороги

В сценарии предполагается, что при строительстве дороги полностью снимается покрывающий экран ППЗРО, в результате чего оголяется верхний слой РАО и вследствие пылеобразования происходит радиоактивное загрязнение воздуха. Выделяются следующие возможные пути облучения рабочих, рассматриваемых в качестве референтной группы, и населения:

внешнее облучение от загрязненных материалов и РАО (для рабочих);

внутреннее облучение ингаляционным путем.

Количество образующейся при строительстве дороги пыли при работе бульдозера вычисляется по формуле, кг:

$$M = q \cdot 3{,}6 \cdot \gamma \cdot V \cdot t \cdot n \cdot 10^{-3} \cdot K_1 \cdot K_2 / t_{\text{ц}} \cdot K_p, \tag{21}$$

где q – удельное выделение пыли с 1 тонны материла, г/т;

γ – плотность породы, т/м^3;

V – объем призмы волочения, м^3;

t – время работы бульдозера в смену, час;

n – количество смен;

K_1 – коэффициент, учитывающий скорость ветра;

K_1 – коэффициент, учитывающий влажность материала;

$t_ц$ – время цикла;

$K_р$ – коэффициент разрыхления горной породы.

Дозы внешнего облучения от загрязнённых материалов и РАО (для рабочих) и дозы внутреннего облучения населения, полученные ингаляционным путем, вычисляются так же, как и в сценарии проведения буровых работ.

3. Проживание человека в районе размещения ППЗРО и ведение сельского хозяйства

В данном сценарии предполагается, что после закрытия ППЗРО и окончания периода административного контроля человек поселился в районе размещения в непосредственной близости от ППЗРО. При этом человек ведет натуральное хозяйство – питается растительной пищей, выращенной на приусадебном участке, содержит домашних животных, используется подземные воды для хозяйственно-бытовых нужд и полива.

Выделяются следующие основные пути облучения населения:

внешнее облучение от загрязненной радионуклидами поверхности земли;

внутреннее облучение ингаляционным путем;

потребление растительной пищи, выращенной на загрязненной почве;

потребление мясо-молочной продукции, произведенной от животных, вскормленных на загрязнённой территории;

потребление и использование воды, загрязненной радионуклидами;

непреднамеренное поступление радиоактивных веществ в организм.

Эквивалентное доза внутреннего облучения отдельных органов (тканей) или всего тела человека от поступления радионуклидов через органы дыхания и пищеварения рассчитывается по формуле:

$$D_{i,k} = K_{i,k} \cdot Q_i, \qquad (22)$$

где $D_{i,k}$ – ожидаемая за 70 лет эквивалентная доза на k-ый орган (ткань) от поступления i-ого радионуклида в организм, Бк;

$K_{i,k}$ – коэффициент дозового преобразования, определяемый как ожидаемая за 70 лет эквивалентная доза облучения k-го органа (ткани) на единицу активности поступившего в организм на заданное время i-ого радионуклида, Зв/Бк;

Q_i – поступление i-ого радионуклида в организм в течение заданного периода, Бк.

Поступление радионуклида в организм человека за заданную продолжительность времени в составе пищевого рациона и питьевой воды, Бк, оценивается следующим образом:

$$Q = \sum_i q_i(t_0)\, m_i G_i B_i, \tag{23}$$

где $q_i(t_0)$ – концентрация радионуклида в i-м продукте на начало его потребления, Бк/кг;

m_i – масса i-ого пищевого продукта (питьевой воды) в течение заданного периода времени, кг;

G_i – отношение интеграла концентрации радионуклида $q_i(t)$ в i-ом пищевом продукте (питьевой воде) за заданный период к концентрации на начало потребления $q_i(t_0)$ (длительность потребления продукта с концентрацией $q_i(t_0)$), сут:

$$G_i = \frac{\int_0^i q_i(t)dt}{q_i(t_0)}, \tag{24}$$

где B_i – коэффициент, учитывающий соотношение концентраций радионуклида в исходном продовольственном (сельскохозяйственном) i-ом продукте и продукте, готовом к непосредственному потребителю («коэффициент очистки»).

Поступление радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию и, соответственно, ее радиоактивное загрязнение может быть обусловлено:

аэрозольным (внекорневым) поступлением радионуклидов в урожай сельскохозяйственных растений вследствие ветрового подъёма радиоактивного вещества с поверхности почвенно-растительного покрова;

корневым поступлением радионуклидов в потребляемые части сельскохозяйственных растений.

Уровни радиоактивного загрязнения растительной продукции вследствие внекорневого поступления радионуклидов при ветровом подъеме радиоактивного вещества с поверхности почвенно-растительного покрова определяются согласно выражению:

$$q_{\text{в.п.}}(t) = \left(R v_g K^0_{\text{в.п.}}/a\right) \int_t \left(\frac{1}{t}\right) [1 - \exp(-\mu \cdot a \cdot t)] \cdot \exp[-(\lambda + \lambda_{\text{эк}} + \lambda_{\text{в.п.1}})t]\, dt, \quad (25)$$

где $q_{\text{в.п.}}(t)$ – концентрация радионуклида в продуктивной части урожая, обусловленная внекорневым поступлением радиоактивного загрязнения» Бк/кг/Бк/м^2;

v_g – скорость осаждения примеси из атмосферы, м/сут;

$K^0_{\text{в.п.}}$ – коэффициент ветрового подъема в месте произрастания культуры, м$^{-1}$;

$\lambda_{\text{в.п.1}}$ – константа скорости снижения интенсивности ветрового подъема, сут$^{-1}$.

Концентрация в растительной продукции, обусловленная корневым поступлением радионуклидов из почвы:

$$q_{\text{к.р}} = K_{\text{н}} \sigma \,/\, \rho_n, \quad (26)$$

где $q_{\text{к.р}}$ – концентрация радионуклида в урожае, при корневом поступлении, Бк/кг/Бк/м^2;

$K_{\text{н}}$ – коэффициент накопления радионуклида в урожае и почве;

σ – плотность радиоактивного загрязнения, Бк/м^2;

$\rho_{\text{п}}$ – масса слоя почвы единичной площади, из которого происходит корневое усвоение, кг.

Поступление радионуклидов в организм пастбищных животных осуществляется преимущественно перорально при потреблении загрязненных кормов и питьевой воды. Вследствие метаболических процессов в организме животного радионуклиды поступают в животные продукты, из которых в качестве критичных рассматривается молоко и мясо крупного рогатого скота. В качестве сопутствующего пути поступления радионуклидов в животную продукцию следует рассматривать потребление почвы, загрязняющей растительность, особенно при выпасе на скудных пастбищах. Условия содержания крупного рогатого скота включают в качестве наиболее неблагоприятных выпас на естественных пастбищах, а также кормление сеном с этих угодий в течение стойлового периода.

Концентрация радионуклидов в животной продукции за счет их поступления через органы пищеварения животного определяется соотношением:

$$q_{\text{ж}}(t) = K_p \left[\sum_j m_j q_j(t) + \left(\frac{1}{\rho_n}\right)\left(\sum_j m_j g_j \varphi\right) \exp(-\lambda t) + p_{\text{в}} q_{\text{в}}(t)\right] D, \quad (27)$$

где $q_{ж}(t)$ – концентрация радионуклида в животной продукции в расчете на единичную плотность загрязнения территории данным радионуклидом, Бк/кг/Бк/м^2;

K_p – коэффициент перехода радионуклида в 1 кг продукции при поступлении активности с кормами и питьем, сут/кг;

$q_i(t)$ – концентрация нуклида в j-м корме по всем путям загрязнения растений на время t после выпадений, Бк/кг/Бк/м^2;

g_i – доля почвы в массе j-го корма;

m_j, φ, $p_в$ – суточное потребление животным j-го корма, почвы, воды, кг/сут (таблица А6);

$\rho_п$ – масса односантиметрового слоя почвы на пастбище площадью 1 м^2, кг/м^2;

$q_в(t)$ – концентрация радионуклида в воде, потребляемой животными, на время после выпадений, Бк/кг/Бк/м^2, для поверхностных непроточных водоемов, наиболее радиологически значимых при потреблении воды животными в начальный период, $q_в(t) = K_r \exp[-(\lambda + \lambda_b)t]$;

K_r – коэффициент, характеризующий пропорциональную зависимость начальной концентрации радионуклида в воде поверхностных водоемов от начальной плотности радиоактивного загрязнения местности, Бк/кг/Бк/м^2.

λ_b – константа скорости снижения концентрации радионуклида в воде поверхностных водоемов, сут$^{-1}$.

Вследствие метаболических процессов, происходящих в организме животного, начальные концентрации радионуклидов в животной продукции будут наблюдаться с определенным сдвигом во времени после начала систематического потребления животными загрязненного кормового рациона. В последующий период концентрация радионуклидов в продукции отражает равновесный переход из рациона в данную продукцию.

Таблица А6 – Значение параметров, определяющих потребление корма в воды крупным рогаты скотом

Параметр	**Молочный скот**	**Мясной скот**
Суточное потребление травы или сена m_j (в расчете на сухую массу), кг/сут.	10	8
Суточное потребление почвы при выпасе φ, кг/сут.	0,4	0,3
Суточное потребление воды, $\rho_в$, кг/сут.	50	40
Время достижения максимальных концентраций радионуклида после начала поступления Δt, сут.	В молоке 5 (все радионуклиды, кроме изотопов йода)	В мясе 10 (все радионуклиды, кроме изотопов йода)

Вследствие метаболических процессов, происходящих в организме животного, начальные концентрации радионуклидов в животной продукции будут наблюдаться с определенным сдвигом во времени после начала систематического потребления животными загрязненного кормового рациона. В последующий период концентрация радионуклидов в продукции отражает равновесный переход из рациона в данную продукцию.

Для оценки поступления радионуклидов в составе пищевого рациона в организм человека необходима информация о массовом соотношении основных пищевых продуктов (таблица А7), подготавливаемых к потреблению.

Значения коэффициента Bi, представляющего собой долю активности радионуклида, остающейся в i-м пищевом продукте после подготовки и кулинарной обработки исходного сельскохозяйственного продукта, могут меняться для каждого отдельного продукта в зависимости от путей поступления активности в продукт (растительные продукты), природы радионуклида и способов обработки продукции. В общем случае можно применять осредненные значения и Bi для всех радионуклидов (таблица А8).

Таблица А7 – Среднестатистические объемы потребления отдельных категорий пищевых продуктов

Среднестатистические показатели (на душу населения)		Показатели для оценки доз (взрослое население)				
Категория продуктов	Годовой объем потребления, кг/год*	Продукт	Годовой объем потребления, кг/год		Суточный объем потребления, кг/сут	
			На товарную массу	На сухую массу	На товарную массу	На сухую массу
Овощи, бахчевые	82	Овощи, всего	82	8,2	0.23	0.02
		В том числе капуста	27	2,7	0.07	0.007
		Плодовые овощи	27	1,6	0.07	0.004
		(огурцы, помидоры) корнеплоды кроме картофеля	27	2,7	0.07	0.007
		зеленые	1	0,1	0,01	0,01
Фрукты, ягоды	77					
Хлеб и хлебопродукты в пересчете на муку	80	Хлеб в пересчете на зерно	-	80	-	0,22
Молоко и молочные продукты	281	Молоко и молочные продукты	281			
Мясо и мясопродукты	80	Мясо и мясопродукты	80	54	0,22	0,15
Рыба и рыбопродукты	16	Рыба и рыбопродукты	16	12	0,04	0,03
Картофель	58	Картофель	58	12	0,16	0,03
Яйца	228 шт. или ~ 12 кг	Яйца, шт	12	3	0,03	0,008

* Согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь за I квартал 2022 года

Входящее в оценки отношение G_i интеграла концентрации радио нуклида в заданном пищевом продукте к концентрации на начало потребления может быть рассчитано на основе данных о

прогнозируемой динамике изменения концентрации в продукции. Для того, чтобы рассмотреть достаточно длинный период потребления местного продукта, необходимо знать соотношение длительности потребления этого продукта в свежем (непосредственно в процессе производства) и запасенном (хранящимися в натуральном или переработанном виде) виде.

Таблица А8 – Значение доли активности B_i, остающейся в пищевом продукте после подготовки к потреблению исходного сельскохозяйственного продукта

Продукт	B_i
Картофель	0,8
Корнеплоды	0,5
Капуста и зеленые овощи	0,7
Огурцы и помидоры	0,7
Хлеб (в расчете на зерно)	0,3
Молоко, цельномолочные продукты	1
Мясо	0,9

Годовая эффективность доза облучения человека за счет перорального поступления радионуклидов в организм E_{per}, Зв/год, рассчитывается и использованием следующего выражения:

$$E_{per} = \varepsilon_{per}(Q_{dust}TA_m + C_w\, Ing_w + \sum_i x_i\, Ing_i), \qquad (28)$$

где суммирование производится по всем учтенным категориям пищевых продуктов (овощи, мясо и молоко), для которых выше рассчитаны удельные концентрации радионуклидов x_i Бк/кг;

Ing_i – норма потребления i-го продукта питания, кг/год, оценивается по статистическим данным потребления основных продуктов питания;

C_w – концентрация радионуклида подземной воде, Бк/м^3;

Q_{dust} – количество пыли, осевшей на поверхности предметов и поступающей в организм за единицу времени, кг/ч;

T – время пребывания на открытой местности, ч/год;

Ing_w – водопотребление, м^3/год;

ε_{per} – коэффициент внутреннего облучения при поступлении в организм радионуклида пероральным путем, Зв/Бк.

Годовая эффективная доза ингаляционного облучения E_{inh}, Зв/год, рассчитывается с использованием следующего выражения:

$$E_{inh} = \varepsilon_{inh} T V_a C_{dust} A_m, \quad (29)$$

где C_{dust} – концентрация пыли в воздухе, кг/м^3;

T – время пребывания на открытой местности, ч/год;

v_a – количество воздуха, вдыхаемого в единицу времени, м^3/ч;

ε_{inh} – коэффициент внутреннего облучения при поступлении в организм радионуклида ингаляционным путем, Зв/Бк.

Годовая эффективная доза внешнего облучения E_{ext}, Зв/год, рассчитывается с использованием следующего выражения:

$$E_{ext} = A_m \rho T DC_{est-soil}, \quad (30)$$

где A_m, Бк/кг, – удельная активность сухой породы;

ρ – плотность сухой почвы, кг/м^3;

T – время пребывания на открытой местности, ч/год;

$DC_{ext\text{-}soil}$, Зв ч$^{-1}$ /Бк м$^{-3}$– дозовые коэффициенты облучения для случая пребывания на поверхности загрязненной почвы.

Оценка эффективной дозы на население производится суммированием по всем путям формирования внутреннего и внешнего облучения от радионуклидов, содержащихся в РАО.