

**Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности
(Госатомнадзор России)**

РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ

Утверждено
постановлением
Госатомнадзора России
от 29 декабря 2000 г.
№ 19

**ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ
ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ХРАНИЛИЩ
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

РБ-011-2000

Введено в действие
с 1 марта 2001 г.

Москва 2000

**УДК
ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ.
РБ-011-2000**

**Госатомнадзор России
Москва, 2000**

Настоящее руководство по безопасности содержит рекомендации Госатомнадзора России по методологии проведения оценки безопасности приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов, а именно: по определению сценариев их эволюции, разработке и использованию концептуальных и математических моделей приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов и проведению анализа результатов математического моделирования.

Выпускается впервые.

Настоящее руководство разработано Научно-техническим центром по ядерной и радиационной безопасности Госатомнадзора России при участии Калиберды И.В., Кудрявцевой А.В., Неретина В.А., Строганова А.А., Шарафутдинова Р.Б.

В процессе разработки рассмотрены и учтены замечания: Управления по надзору за ядерной и радиационной безопасностью предприятий топливного цикла и Управления по надзору за радиационной безопасностью в народном хозяйстве Госатомнадзора России, Центрального, Северо-Европейского, Уральского, Сибирского, Волжского межрегиональных территориальных округов Госатомнадзора России, Всероссийского научно-исследовательского института неорганических материалов им. А.А. Бочвара, Горно-химического комбината, ПО "Маяк", Машиностроительного завода, ГНЦ "Институт биофизики", МосНПО "Радон".

Оглавление

Термины и определения

1. Назначение и область применения
 2. Основные положения
 3. Этапы оценки безопасности хранилища РАО
 - 3.1. Разбиение хранилища РАО на подсистемы
 - 3.2. Определение исходных данных для оценки безопасности хранилища РАО
 - 3.3. Определение сценариев эволюции хранилища РАО
 - 3.4. Анализ сценариев облучения человека и определение соответствующих критических групп при различных сценариях эволюции хранилища РАО
 - 3.5. Разработка концептуальных моделей хранилища РАО
 - 3.6. Разработка математической модели хранилища РАО
 - 3.7. Выбор программных средств и исходных параметров расчета
 4. Перенос радионуклидов из хранилища РАО в окружающую среду
 - 4.1. Основные механизмы переноса радионуклидов из приповерхностных хранилищ РАО в окружающую среду
 - 4.2. Уравнения переноса радионуклидов
 - 4.3. Механизмы переноса радионуклидов в сценариях их возможного выноса с газами
 5. Рекомендации по проведению количественных оценок безопасности хранилища РАО
 - 5.1. Использование упрощенных моделей для предварительной оценки безопасности
 - 5.2. Рекомендации по определению периода времени, для которого следует проводить количественную оценку безопасности
 - 5.3. Рекомендации по оценке погрешности полученных результатов
- Приложение 1. Примерный перечень событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, существенно влияющих на безопасность приповерхностных хранилищ РАО
- Приложение 2. Рекомендации по проведению анализа сценариев облучения населения от хранилища РАО и определению критических групп лиц из населения
- Приложение 3. Некоторые подходы для разработки концептуальных моделей хранилища РАО
- Приложение 4. Схема проведения расчетной оценки формирования индивидуальных доз облучения населения, живущего в зоне потенциального влияния хранилища РАО
- Приложение 5. Основные процессы и факторы переноса жидкости и газов через пористые среды и их влияние на различные аспекты безопасности хранилища РАО
- Приложение 6. Пример оценки безопасности реального приповерхностного хранилища низкоактивных РАО, проведенной с использованием специализированного пакета программных средств AMBER-3.1
- Приложение 7. Оценка периода времени, для которого необходимо проводить количественное моделирование
- Список использованной литературы

Термины и определения

1. Барьер безопасности - несущий и (или) вмещающий хранилище радиоактивных отходов (РАО) грунт или элемент инженерного сооружения, препятствующий рассеиванию радионуклидов.

2. Барьер безопасности естественный - несущий и (или) вмещающий хранилище РАО грунт.

3. Барьер безопасности инженерный - элемент строительных конструкций хранилища РАО, контейнер, буферный материал, матричный материал, запечатывающий элемент.

4. Буферный материал - вещества, помещаемые в хранилище вокруг упаковок РАО и служащие дополнительным барьером безопасности.

5. Запечатывающие (хранилище РАО) элементы - элементы конструкции хранилища РАО, заполняющие при выводе его из эксплуатации инженерные и транспортные коммуникации, использованные при эксплуатации хранилища для транспортирования и размещения РАО.

6. Жизненный цикл хранилища РАО - совокупность этапов функционирования хранилища РАО как объекта, обеспечивающего изоляцию РАО от человека и окружающей среды: размещение, сооружение, эксплуатация, вывод из эксплуатации и последующее за этим функционирование хранилища РАО.

7. Приповерхностное захоронение РАО - захоронение РАО в хранилище на поверхности земли или на глубине нескольких десятков метров.

8. Сценарий эволюции хранилища РАО - одна из возможных в течение жизненного цикла хранилища РАО последовательностей логически связанных между собой событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, определяющих эволюцию хранилища РАО, характеристики миграции радионуклидов из него в окружающую среду, уровни облучения человека.

9. Эволюция хранилища РАО - логически обусловленная и упорядоченная во времени последовательность взаимосвязанных состояний хранилища, принимаемых им в течение его жизненного цикла в результате:

- внешних воздействий природного и техногенного происхождения, включая инициирующие развитие аварий в хранилище;
- действий персонала, обслуживающего хранилище, включая ошибки персонала;
- физико-химических процессов, протекающих в хранилище.

1. Назначение и область применения

1.1. Руководство по безопасности "Оценка безопасности приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов" (далее - Руководство) конкретизирует основные положения ст. 48 Федерального закона "Об использовании атомной энергии" применительно к оценке безопасности приповерхностных хранилищ РАО, предназначенных для захоронения твердых и (или) отвержденных РАО (далее - хранилища РАО).

1.2. Настоящее Руководство содержит рекомендации Госатомнадзора России по методологии проведения оценки безопасности хранилищ РАО, а именно: по определению сценариев их эволюции, разработке концептуальных моделей хранилищ РАО, соответствующих этим сценариям (далее - концептуальные модели), разработке математических моделей хранилищ РАО, реализующих концептуальные (далее - математические модели), использованию математических моделей для количественной оценки безопасности хранилищ РАО, проведению анализа результатов математического моделирования.

1.3. Настоящее Руководство не содержит рекомендаций по проведению оценок надежности конструкций и сооружений хранилищ РАО.

1.4. Настоящее Руководство предназначено для проведения оценки безопасности хранилищ РАО при их проектировании, сооружении, эксплуатации и выводе из эксплуатации.

1.5. Настоящее Руководство распространяется на проектируемые, сооружаемые, эксплуатируемые и выводимые из эксплуатации хранилища РАО.

1.6. В случае, когда используется иная методология проведения оценки безопасности хранилищ РАО по сравнению с определенной настоящим Руководством, ее использование должно быть обосновано.

2. Основные положения

2.1. Оценка безопасности хранилищ РАО должна быть выполнена для всего периода потенциальной опасности РАО для человека и окружающей среды, так как при захоронении РАО должны быть обеспечены надежная изоляция РАО от окружающей среды и защита настоящего и будущих поколений и биологических ресурсов от радиационного воздействия сверх установленных нормами и правилами в области использования атомной энергии пределов. Поэтому оценка безопасности хранилищ РАО в отличие от иных радиационно опасных объектов проводится не только для периодов времени их эксплуатации и вывода из эксплуатации, но и для периода времени после вывода из эксплуатации хранилищ РАО.

2.2. Следует учитывать, что при обеспечении безопасности (изоляции РАО от человека и окружающей среды) при захоронении РАО существенная роль должна быть отведена естественным барьерам безопасности.

3. Этапы оценки безопасности хранилища РАО

3.1. Разбиение хранилища РАО на подсистемы

Оценку безопасности хранилища РАО рекомендуется начать с определения основных исходных данных, необходимых для ее проведения. Для этого следует сгруппировать все исходные данные в отдельные блоки, каждый из которых относится к одной из подсистем, на которые может быть разбито хранилище РАО.

Предлагается рассматривать хранилище РАО как совокупность следующих подсистем:

- **Область хранилища РАО, являющаяся источником радионуклидов (далее - область источника радионуклидов)** - упаковка РАО, включающая матрицу отходов, контейнер и другие элементы упаковки (если имеются).
- **Здания, сооружения, системы и элементы хранилища РАО (далее - инженерная часть хранилища РАО)** - инженерные барьеры безопасности хранилища РАО, включающие строительные конструкции хранилища РАО, буферные материалы и запечатывающие элементы, а для приповерхностных хранилищ РАО, сооружаемых открытым способом, - также покрывающий и подстилающий слои материалов.
- **Ближняя зона хранилища РАО** - контактирующая с сооружениями хранилища РАО часть вмещающих и (или) несущих грунтов, процессы в которой могут быть взаимосвязаны с процессами, протекающими в инженерной части хранилища РАО.
- **Дальняя зона хранилища РАО** - часть вмещающих и (или) несущих грунтов, контактирующая с ближней зоной хранилища РАО и с биосферой, состояние и характеристики которой влияют на миграцию радиоактивных веществ от границы ближней зоны хранилища РАО к границе биосферы и изменение состояния которой в связи с любыми возможными процессами и событиями как природного, так и техногенного происхождения может привести к изменению этих характеристик.
- **Окружающая среда (биосфера)** - в контексте настоящего Руководства совокупность всех элементов непосредственного окружения популяции человека, живущей в зоне, в которой она может подвергнуться радиационному воздействию хранилища РАО (далее - зона влияния хранилища РАО), и сама популяция.

Примечания.

1. В совокупность всех элементов рассматриваемой при оценке безопасности приповерхностного хранилища РАО окружающей среды (биосферы) должны быть включены все природные среды, загрязнение которых радионуклидами из хранилища РАО может влиять на радиационную безопасность популяции человека, живущей в зоне влияния хранилища РАО: нижний приповерхностный слой атмосферы, почва, приповерхностные подземные воды, поверхностные водоемы, включая донные отложения относительно мелких водоемов и исключая донные отложения крупных водоемов, а также биота - существующие во всех элементах биосферы сообщества живых организмов.
2. Для хранилищ РАО рассмотрение окружающей среды допускается ограничить оценкой или расчетом концентраций радионуклидов в воде и грунте в местах их возможного использования человеком.
3. Принятые при оценке безопасности хранилища РАО пространственные границы дальней зоны хранилища РАО должны быть такими, чтобы за их пределами при любых сценариях возможного нормального облучения популяции человека концентрации радионуклидов в элементах окружающей среды не могли бы превысить значения, при которых эффективные дозы облучения критической группы лиц из населения могут быть выше 10 мкЗв/год.

3.2. Определение исходных данных для оценки безопасности хранилища РАО

Рекомендуется рассмотрение следующих исходных данных:

- **исходные данные, характеризующие область источника радионуклидов:**
 - тип РАО;
 - физико-химические характеристики РАО (содержание свободной воды, выщелачиваемость, стабильность, газовыделение, горючесть, термическая стойкость, содержание биологически активных, гниющих, разлагающихся, ядовитых и взрывоопасных веществ и др.);
 - радиационные характеристики РАО (в том числе данные о полной активности, удельной активности и радионуклидном составе);
 - материал и конструкция контейнеров;
- **исходные данные, характеризующие инженерную часть хранилища РАО:**
 - структура системы барьеров безопасности;
 - геометрические характеристики барьеров безопасности;
 - используемые материалы;

- защитные, прочностные и другие характеристики барьеров безопасности, в том числе относящиеся к их долговременной стабильности в данной геохимической обстановке, определяемой ближней зоной хранилища;
- **исходные данные, характеризующие ближнюю зону хранилища РАО:**
 - минералогический и гранулометрический состав вмещающих и (или) несущих грунтов;
 - структура вмещающих и (или) несущих грунтов;
 - физико-химические свойства вмещающих и (или) несущих грунтов: плотность, прочность, пористость, коэффициент фильтрации, коэффициенты диффузии различных радионуклидов, коэффициенты межфазного распределения или эквивалентные им при данной пористости коэффициенты задерживания различных радионуклидов и т.д.;
 - данные, характеризующие долговременную стабильность вмещающих и (или) несущих грунтов как барьеров безопасности по отношению к изменениям геохимической обстановки, возможным под влиянием инженерной части хранилища РАО;
- **исходные данные, характеризующие дальнюю зону хранилища РАО:**
 - те же, что и для ближней зоны (за исключением данных, характеризующих долговременную стабильность грунтов как барьеров безопасности по отношению к изменениям геохимической обстановки, возможным под влиянием инженерной части хранилища РАО);
 - геолого-тектонические, гидрогеологические, сейсмические и инженерно-геологические условия;
- **исходные данные, характеризующие окружающую среду (включая популяцию человека):**
 - топографические условия;
 - демографические условия;
 - гидрометеорологические условия (климатические, метеорологические, гидрологические);
 - аспекты, связанные с деятельностью и спецификой поведения человека;
 - характеристики биоты.

3.3. Определение сценариев эволюции хранилища РАО

3.3.1. Количество сценариев возможной эволюции хранилища РАО бесконечно, и проанализировать каждый из них невозможно. Для проведения оценки безопасности хранилища РАО рекомендуется определить конечный набор таких сценариев, которые в совокупности позволили бы учесть основные особенности возможной эволюции хранилища РАО, определяющие его радиационное воздействие на человека и окружающую среду.

3.3.2. Рекомендуется следующая схема определения такого набора сценариев.

3.3.2.1. Необходимо выбрать несколько сценариев эволюции хранилища РАО, принципиально отличных друг от друга по учитываемым в них событиям, явлениям и факторам природного и техногенного происхождения и физико-химическим процессам и по уровням возможного радиационного воздействия на человека и окружающую среду (базовых сценариев).

3.3.2.2. В качестве каждого базового сценария из множества сценариев возможной эволюции хранилища РАО, близких к друг другу по учитываемым в них событиям, явлениям, процессам и факторам (отличающихся лишь малозначимыми деталями), следует выбрать такой, который характеризуется наибольшим уровнем возможного радиационного воздействия на человека и окружающую среду. Затем следует принять вероятность реализации данного базового сценария, равной сумме вероятностей реализации всех близких сценариев (включая базовый), после чего исключить все близкие сценарии, кроме базового, из дальнейшего рассмотрения. Такое упрощающее допущение эквивалентно принятию всех близких сценариев идентичными базовому сценарию по уровню воздействия хранилища РАО на человека и окружающую среду и является консервативным.

3.3.2.3. После определения значений вероятностей реализации всех выбранных базовых сценариев следует проверить, равняется ли единице сумма полученных значений вероятностей этих сценариев для каждого момента времени жизненного цикла хранилища РАО.

3.3.2.3.1. Если эта сумма меньше единицы, это значит, что не был учтен ряд возможных сценариев эволюции хранилища РАО. Если эти неучтенные сценарии близки по учитываемым в них событиям, явлениям, процессам и факторам хотя бы к одному из выбранных базовых сценариев, следует скорректировать значение вероятности его реализации, повторив процедуру разработки набора сценариев, начиная с пп. 3.3.2.2. Если же эти неучтенные сценарии существенно отличаются от каждого из выбранных базовых сценариев, следует расширить набор базовых сценариев, повторив процедуру разработки набора сценариев, начиная с пп. 3.3.2.1.

3.3.2.3.2. Если полученная сумма значений вероятностей реализации всех выбранных базовых сценариев больше единицы, это значит, что допущена ошибка при определении вероятностей реализации базовых сценариев (т. е. некоторое количество сценариев было учтено неоднократно).

3.3.2.3.3. Если эта сумма равна единице, значит, определенный таким образом набор базовых сценариев можно считать полным. Он позволяет учесть основные особенности возможной эволюции хранилища РАО как при нормальном (наиболее вероятном) протекании природных процессов, так и при различных внешних воздействиях, реализующихся с вероятностью, существенно меньшей единицы, включая воздействия максимальной возможной интенсивности, существенно изменяющие ход эволюции хранили-

ща РАО и приводящие к значительному радиационному воздействию хранилища РАО на человека и окружающую среду.

3.3.2.4. Сценарием нормальной эволюции хранилища РАО принято называть базовый сценарий эволюции хранилища РАО, описывающий нормальное (наиболее вероятное) протекание природных процессов. Значение вероятности его реализации должно быть близко к единице.

3.3.2.5. Вероятностными сценариями эволюции хранилища РАО принято называть базовые сценарии, описывающие особенности возможной эволюции хранилища РАО при различных внешних воздействиях, реализующихся с вероятностью, существенно меньшей единицы, включая воздействия максимальной возможной интенсивности.

3.3.3. При определении набора базовых сценариев эволюции хранилища РАО рекомендуется:

- рассмотреть все возможные значимые события, явления и факторы природного и техногенного происхождения и физико-химические процессы, существенно влияющие на эволюцию хранилища РАО;
- проанализировать причинно-следственные связи и экспериментально установленные корреляции между этими событиями, явлениями, процессами и факторами;
- определить возможные при данном сценарии эволюции хранилища РАО пути облучения человека и поступления радионуклидов в окружающую среду.

3.3.4. Для каждого проекта хранилища РАО необходимо создание своего перечня событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, так как этот перечень существенно зависит от конструктивных решений хранилищ РАО, характеристик размещенных в нем РАО, локальной геологической, геолого-ландшафтной и геохимической обстановки, конкретных климатических условий и т.д. Пример составления такого перечня приведен в приложении 1.

3.4. Анализ сценариев облучения человека и определение соответствующих критических групп при различных сценариях эволюции хранилища РАО

3.4.1. Конечным результатом количественной оценки уровня безопасности хранилища РАО на рассматриваемом этапе его жизненного цикла должны быть значения ожидаемых доз облучения критической группы лиц из населения. Критическая группа должна быть определена с учетом того, что формирование дозы облучения индивидуумов по всем возможным путям (внешнее и внутреннее облучение, в том числе доза при ингаляции, дозы, обусловленные пищевыми цепочками) зависит прежде всего от особенностей существования популяции человека в районе потенциального влияния хранилища РАО - от типичных для данной местности биоценозов, расположения населенных пунктов, половозрастной структуры населения, структуры природопользования и потребления продуктов питания местного производства, системы водопотребления и водоснабжения и т. д. Предположенная схема формирования дозы облучения индивидуумов представляет собой сценарий облучения человека.

3.4.2. При проведении оценки безопасности хранилища РАО должны быть рассмотрены несколько сценариев эволюции хранилища РАО. Каждому из них могут соответствовать различные критические группы, члены которых при этом сценарии эволюции хранилища РАО могут получить максимальную эффективную дозу облучения. Поскольку индивидуумов, входящих в эти группы, следует рассматривать как подвергающихся радиационному риску одновременно более чем в одном из возможных сценариев эволюции хранилища РАО, группой лиц, критической по сумме всех сценариев его эволюции (подвергающейся максимальному радиационному риску от данного хранилища РАО), в ряде случаев может оказаться группа лиц из населения, которая не является критической ни в одном из рассмотренных сценариев эволюции хранилища РАО. Поэтому при анализе каждого из сценариев эволюции хранилища РАО следует оценивать уровни облучения нескольких различных групп лиц из населения, а не только критической группы (в данном сценарии эволюции). Для определения группы лиц, являющейся критической по сумме всех сценариев эволюции, рекомендуется:

- для каждого из сценариев эволюции хранилища РАО определить соответствующие критические группы, а также группы лиц из населения, не являющиеся критическими, но наиболее близкие к ним по уровням радиационного воздействия хранилища РАО в рассматриваемый период времени;
- провести для всех определенных таким образом групп лиц суммирование всех без исключения относящихся к ней парциальных доз облучения по всем сценариям эволюции хранилища РАО.

Таким образом рекомендуется для каждого из сценариев эволюции хранилища РАО рассматривать несколько возможных сценариев облучения человека.

Рекомендации по определению критических групп на основе анализа нескольких различных сценариев облучения человека в каждом из сценариев эволюции хранилища РАО приведены в приложении 2.

3.4.3. При анализе сценариев облучения человека при реализации различных сценариев эволюции хранилища РАО рекомендуется сгруппировать сценарии эволюции хранилища РАО, характеризующиеся близкими типами возможных сценариев облучения популяции человека, следующим образом:

- сценарии, связанные с непреднамеренным проникновением человека в хранилище РАО;
- сценарии реализации маловероятных событий максимальной возможной интенсивности;
- сценарий нормальной эволюции хранилища РАО.

3.5. Разработка концептуальных моделей хранилища РАО

3.5.1. После разработки сценария эволюции хранилища РАО следует выбрать принципиальную схему для его количественного анализа. С этой целью для каждого из сценариев должен быть определен набор концептуальных предположений об особенностях эволюции хранилища РАО, происходящих в нем и вне его событиях, явлениях и факторах природного и техногенного происхождения и физико-химических процессах, влияющих на безопасность хранилища. Должен быть также определен и обоснован набор упрощающих предположений о начальных и граничных условиях, которые следует принять при проведении количественной оценки безопасности хранилища РАО, а также о размерности, достаточной для адекватного описания его геометрических характеристик. Указанные предположения составляют концептуальную модель хранилища РАО, соответствующую данному сценарию его эволюции.

3.5.2. Концептуальная модель хранилища РАО должна содержать описание:

- характеристик хранилища РАО как источника радионуклидов (полное содержание и концентрации радионуклидов, скорости их выхода из упаковок РАО, физико-химическая форма РАО);
- сред выхода - сред, с которыми радионуклиды выходят из упаковок РАО;
- механизмов выхода - физико-химических процессов, в результате которых происходит выход радионуклидов из источника;
- геосферных сред переноса - сред, с которыми радионуклиды мигрируют через геосферу;
- механизмов геосферного переноса - возможных процессов, определяющих миграцию радионуклидов через геосферу;
- биосферных сред переноса - сред, с которыми радионуклиды мигрируют через биосферу;
- механизмов биосферного переноса - возможных процессов, определяющих миграцию радионуклидов через биосферу;
- механизмов облучения - видов воздействия радионуклидов на человека и окружающую среду.

Концептуальная модель хранилища РАО должна давать адекватное и полное качественное описание хранилища как радиационно опасного объекта, оказывающего радиационное воздействие на человека и окружающую среду в соответствии с данными сценариями эволюции хранилища и облучения человека. Поскольку на этапе разработки концептуальной модели, как правило, нет возможности количественно оценить уровень безопасности хранилища, а подход к оценке безопасности должен быть консервативным, то каждому сценарию эволюции хранилища РАО может соответствовать более чем одна его концептуальная модель. С другой стороны, на практике часто удается разработать концептуальную модель хранилища РАО, соответствующую нескольким, а иногда и всем сценариям эволюции хранилища РАО и облучения человека.

3.5.3. Концептуальная модель хранилища РАО должна быть как можно более простой, но достаточно детализированной для адекватного описания его эволюции.

3.5.4. При разработке концептуальной модели должны быть определены:

- перечень событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов;
- набор взаимосвязей между элементами этого перечня;
- пределы применимости концептуальной модели в рассматриваемых пространственной области и временном диапазоне с учетом допущений, при которых она была разработана;
- начальные и граничные условия, которые следует предположить при проведении количественной оценки безопасности хранилища РАО, и размерность, которой достаточно для адекватного описания геометрических характеристик хранилища РАО.

3.5.5. Для разработки концептуальных моделей хранилища РАО могут быть рекомендованы разнообразные подходы. В приложении 3 в качестве примера приводятся некоторые из них.

3.6. Разработка математической модели хранилища РАО

3.6.1. После разработки концептуальной модели для проведения количественной оценки безопасности хранилища РАО следует сконструировать математическую модель, используя известные уравнения, описывающие процессы переноса радионуклидов из хранилища через его инженерную часть, ближнюю и дальнюю зоны в окружающую среду в соответствии со схемой, представленной в приложении 4.

С этой целью концептуальную модель для каждого сценария следует выразить в виде группы алгебраических или дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями. Рассматриваемым концептуальным моделям может соответствовать более чем одно математическое уравнение, но все вместе эти уравнения представляют собой одну математическую модель.

3.6.2. Математические модели выбираются или разрабатываются, исходя из концептуальной модели. Математическое представление концептуальной модели зависит от степени детальности, с которой элементы перечня событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов должны быть отражены при моделировании. С выбором преимущественного метода решения уравнений математической модели могут быть связаны дополнительные ограничения, такие, как исключение нелинейных соотношений. Эти или другие ограничения могут потенциально привести к пересмотру перечня, который должен быть включен в уточненную модель. Любое ограничение рекомен-

дуются документировать и отмечать ожидаемое влияние новых элементов уточненного перечня на математическую модель.

3.6.3. Следует избегать двойного учета влияния определенных событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов или, наоборот, неоправданного исключения потенциально значимых элементов из перечня.

3.6.4. В ходе разработки математической модели определяется перечень параметров, относящихся к расчету. Каждый из них и его конкретное значение рекомендуется документировать для создания необходимой базы данных.

3.7. Выбор программных средств и исходных параметров расчета

3.7.1. Численные расчеты в соответствии с разработанной математической моделью следует проводить с использованием аттестованных программных средств.

3.7.2. В зависимости от решаемой задачи могут использоваться как существующие, так и специально разрабатываемые (для решения специфических математических моделей) программные средства.

3.7.3. В некоторых случаях (например, на ранних этапах процесса оценки безопасности) достаточно разработать упрощенные математические модели, в которых могут быть использованы простые и доступные программные средства, такие, как, например, электронные таблицы. Для последующего уточнения результатов может потребоваться усовершенствование отдельных моделей, для реализации которых могут понадобиться более сложные программные средства. Модели, используемые на последних этапах, особенно для выполнения итогового варианта оценки безопасности, должны быть наиболее обобщающими и точными.

3.7.4. Для получения адекватного результата при использовании программных средств необходимо корректно определить исходные параметры расчета, обращая внимание на учет погрешностей значений этих параметров. В ряде случаев требуется определить не только средние значения исходных параметров и интегральные характеристики погрешностей этих значений, но и детальные распределения плотности вероятности значений исходных параметров.

4. Перенос радионуклидов из хранилища РАО в окружающую среду

4.1. Основные механизмы переноса радионуклидов из приповерхностных хранилищ РАО в окружающую среду

4.1.1. С целью корректного проведения оценки безопасности хранилищ РАО для длительных периодов времени и протяженных пространственных областей в первую очередь должны быть спрогнозированы значения характеристик процесса переноса радионуклидов.

4.1.2. Для приповерхностных хранилищ РАО наиболее значимыми в сценарии нормальной эволюции хранилища РАО механизмами переноса радионуклидов и физико-химическими процессами, влияющими на этот перенос, являются, как правило:

- сорбция;
- адвекция;
- диффузия;
- дисперсия;
- распад и накопление радионуклидов.

4.2. Уравнения переноса радионуклидов

4.2.1. Основное уравнение переноса радионуклидов с жидкостью в сплошных средах может быть получено из уравнения баланса радионуклидов в твердой и жидкой фазах в предположениях о неподвижности твердой фазы и о химическом равновесии концентраций радионуклидов в жидкой и твердой фазах. Для описания переноса взвешенной твердой фазы или газообразной фазы, содержащихся в жидкостях-носителях и содержащих радионуклиды, как правило, требуется дополнительное уравнение баланса массы.

4.2.2. При прогнозировании процесса переноса радионуклидов следует учитывать относительную значимость переноса радионуклидов грунтовыми водами через неоднородности в среде (например, трещины).

4.3. Механизмы переноса радионуклидов в сценариях их возможного выноса с газами

4.3.1. В хранилищах РАО приповерхностного типа генерируется газ различного химического состава при коррозии металлических элементов конструкций и сооружений, бактериальном разложении (биологической деградации) органических веществ и ошелачивании целлюлозы (радиолиз поровой жидкости в таких хранилищах несущественен). При оценке безопасности хранилищ РАО следует хотя бы качественно оценить роль различных механизмов выноса радионуклидов с газами, образующимися и накапливающимися в сооружениях хранилища.

4.3.2. По мере накопления газов в хранилище начинается их миграция через пористые среды барьеров безопасности, которая двояко влияет на радиационную безопасность хранилища. С одной стороны,

миграция газов обеспечивает механизм непрерывного стравливания накапливающихся газов и снижение давления газов на барьеры безопасности хранилища, уменьшая вероятность их механического разрушения, что положительно влияет на уровень безопасности хранилища. С другой стороны, миграция газов может способствовать выносу радионуклидов из хранилища, снижая его безопасность.

4.3.3. К механизмам выноса радионуклидов из хранилища РАО с образующимися и накапливающимися в нем газами относятся, в частности:

- вертикальная миграция радионуклидов с газовыми пузырьками как в двухфазной (газ, жидкость), так и в трехфазной (газ, жидкость, минеральный скелет) средах;
- горизонтальная миграция радионуклидов, растворенных в поровой жидкости, за счет уменьшения вязкости жидкости и соответствующего увеличения скорости ее миграции через пористые среды при увеличении содержания растворенных в ней газов;
- залповый вынос радионуклидов из хранилища РАО при нарушении целостности инженерных барьеров хранилища РАО за счет повышенного давления газов в хранилище (образовании трещин, выдавливании или сдвиге запечатывающих хранилище РАО элементов и т. д.).

4.3.4. Моделирование миграции газов из хранилища РАО должно быть направлено в основном на выяснение возможности выхода газов за пределы сооружений хранилища РАО и прохождения их через ближнюю и дальнюю зоны хранилища, т.е. на решение следующих задач:

- оценку значения избыточного давления в элементах и сооружениях хранилища РАО;
- оценку возможного ускорения миграции жидкой фазы, содержащей радионуклиды, за счет миграции газов;
- определение, не может ли движение газа привести к выносу на дневную поверхность значительного количества радиоактивных веществ, таких, например, как радон.

4.3.5. Следует определить преимущественный механизм выноса газа из геосферы в биосферу. Результаты его моделирования с помощью аналитических или численных методов могут быть приняты за основу количественной оценки влияния генерации газов на безопасность хранилища РАО.

4.3.6. Основные процессы и факторы переноса жидкости и газов через пористые среды и их влияние на различные аспекты безопасности хранилища РАО рассмотрены в приложении 5.

5. Рекомендации по проведению количественных оценок безопасности хранилища РАО

5.1. Использование упрощенных моделей для предварительной оценки безопасности

5.1.1. На начальном этапе проведения количественной оценки безопасности хранилища РАО (далее - этап предварительной оценки) важно правильно определить основные направления, по которым впоследствии должны уточняться концептуальная и математическая модели хранилища, расширяться набор и уточняться значения исходных параметров для моделирования, повышаться точность результатов моделирования. Точность выполненного на этапе предварительной оценки моделирования, как правило, играет второстепенную роль.

5.1.2. Одним из подходов к проведению предварительной оценки является упрощение составных частей концептуальной модели.

5.1.2.1. На этапе предварительной оценки даже при наличии данных, указывающих на пространственную неоднородность соответствующих характеристик водоносного горизонта, достаточно оценить поток грунтовых вод и перенос радионуклидов, приняв средние значения соответствующих характеристик гомогенизированных грунтов.

5.1.2.2. Точное описание функции источника - пространственных и временных характеристик скоростей поступления радионуклидов из области источника в ближнюю зону хранилища РАО - одна из наиболее трудных задач при моделировании. Поэтому рекомендуется для предварительной оценки принятие в концептуальной модели простейших начальных предположений о функции источника. По мере получения дополнительных данных о площадке хранилища РАО, позволяющих уточнить моделирование переноса радионуклидов в ближней и дальней зонах хранилища РАО, следует моделировать более точно и характеристики функции источника.

5.1.3. При проведении предварительной оценки рекомендуется использовать упрощенную математическую модель (см. п.3.7.3) с последующим ее усложнением по мере получения новых данных о площадке размещения хранилища РАО.

При моделировании переноса радионуклидов грунтовыми водами на этапе предварительной оценки обычно:

- ограничивают круг рассматриваемых процессов наиболее значимыми;
- принимают минимальную размерность при описании геометрических характеристик хранилища и вмещающих и (или) несущих грунтов;
- предполагают постоянство условий переноса;
- принимают упрощенные граничные и начальные условия;
- используют упрощенные модели процессов переноса радионуклидов;
- предполагают гомогенность всех сред, в которых происходит перенос радионуклидов.

5.2. Рекомендации по определению периода времени, для которого следует проводить количественную оценку безопасности

5.2.1. В соответствии с требованиями нормативных документов безопасность хранилищ РАО должна быть обоснована для всего периода времени после вывода хранилища из эксплуатации пока полные и удельные активности РАО, элементов хранилищ РАО, несущих и (или) вмещающих их грунтов не снизятся до значений, при которых возможное радиационное воздействие РАО на человека и окружающую среду не может превзойти пределы, установленные нормами и правилами в области использования атомной энергии (пример оценки безопасности реального приповерхностного хранилища низкоактивных РАО приведен в приложении 6). Это время даже для приповерхностных хранилищ РАО может достигать сотен тысяч и миллионов лет из-за того, что в захороненных РАО может содержаться ограниченное количество долгоживущих альфа-излучающих радионуклидов.

Период времени, для которого необходимо выполнять количественную оценку безопасности, может быть существенно меньше, чем различать период времени, для которого должна быть обоснована безопасность хранилища РАО, если удастся доказать достаточность численных результатов, полученных на этом диапазоне, для обоснования безопасности хранилища в течение всего времени его потенциальной опасности.

5.2.2. Период времени, для которого необходимо выполнять количественную оценку безопасности хранилища РАО, можно ограничить моментом времени, начиная с которого уровень радиационной опасности хранилища уже не может возрасти (приложение 7). Для доказательства этого достаточно показать, что результаты оценки одновременно удовлетворяют следующим условиям:

- в количественной оценке учтены все физико-химические процессы, существенно или заметно влияющие на динамику переноса радионуклидов из хранилища РАО в биосферу;
- в пределах диапазона времени проведения количественной оценки равновесное состояние установилось для всех указанных процессов;
- период времени проведения количественной оценки превосходит время установления равновесия как минимум в 2 раза;
- в течение этого периода времени достигнуты максимальные значения концентраций в биосфере всех радиологически значимых радионуклидов, содержащихся в хранилище РАО, после чего значения этих концентраций и соответствующих им индивидуальных доз и (или) радиационных рисков со временем убывают.

В случае получения этих доказательств отпадает необходимость в распространении количественной оценки безопасности на более удаленные в будущем периоды времени.

5.3. Рекомендации по оценке погрешности полученных результатов

5.3.1. Для подтверждения надежности полученных результатов следует провести оценку погрешностей их определения.

5.3.2. Полная погрешность результатов расчетных прогнозов определяется двумя составляющими - методической и константной (параметрической).

Источники методической составляющей погрешности - упрощающие допущения, принятые в концептуальных и математических моделях, определяющих и количественно описывающих физические процессы переноса радионуклидов от источника к объекту воздействия.

Источники константной (параметрической) составляющей погрешности - погрешности значений исходных данных (физических и химических величин или констант) или параметров расчета, связанные с неполнотой или неточностью первичной информации, получаемой либо экспериментальным путем, либо в результате использования других расчетных моделей, характеризующихся, в свою очередь, присущими им методической и константной составляющими погрешности.

5.3.3. Оценку погрешностей рекомендуется проводить, учитывая, что при моделировании последовательного ряда процессов результаты расчетов характеристик предыдущего процесса являются исходными данными для расчета характеристик последующего. В этом случае обе составляющие погрешности расчетных характеристик радиационного воздействия хранилища РАО на человека увеличиваются тем существеннее, чем большее количество процессов вовлечено в моделирование.

5.3.4. При проведении оценки погрешностей рекомендуется принимать во внимание последовательное, по мере удаления рассматриваемого промежутка времени в будущее, возрастание погрешности результата оценки безопасности хранилища РАО. Основная причина этого - невозможность корректно оценить параметры цепочки передачи радиационного воздействия от хранилища РАО к популяции человека через различные элементы окружающей среды из-за изменчивости их свойств в течение значительных интервалов времени.

5.3.5. Для оценки уровня изменения характеристик радиологической опасности хранилища РАО для человека и окружающей среды при небольших отклонениях исходных данных от значений, принятых в проекте, рекомендуется проведение анализа чувствительности результатов оценки безопасности хранилища РАО к изменениям исходных данных.

Примерный перечень событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, существенно влияющих на безопасность приповерхностных хранилищ РАО

Разработан с учетом рекомендаций [1]

1.1. Природные события, явления и факторы

- Биологическое вмешательство в хранилище РАО:
животных;
растений.
- Разрывные нарушения (сейсмичность).
- Метеорологические факторы.
- Климатические факторы.
- Факторы, обусловленные водным режимом хранилища:
наводнения;
колебания уровня грунтовых вод;
потоки грунтовых вод;
инфильтрационные воды.
- Эрозия.

1.2. Процессы, происходящие в хранилище РАО

- Образование химических соединений (например, комплексообразующих агентов), способных снизить изолирующие (задерживающие) свойства барьеров безопасности.
- Газовыделение за счет процессов коррозии металлических отходов и конструкционных материалов, микробиологического разложения органических отходов, химической деструкции отходов, включая ощелачивание целлюлозы, радиоактивного распада.
- Дегградация защитных и прочностных свойств инженерных барьеров безопасности за счет длительных воздействий радиационно-физических факторов.
- Механическое воздействие вышележащих (покрывающих хранилище РАО) грунтов на барьеры безопасности.
- Физико-химические (геохимические) взаимодействия РАО со средами ближней зоны хранилища, обуславливающие изменения физико-химических характеристик как отходов, так и грунтов ближней зоны.

1.3. Процессы и события, обусловленные деятельностью человека

- Ошибки проектирования, повлекшие за собой нарушение функционирования дренажных систем.
- Ошибки проектирования, повлекшие за собой нарушения в расположении упаковок РАО.
- Ошибки проектирования, повлекшие за собой нарушение покрывающего слоя.
- Строительные работы.
- Сельскохозяйственные работы.
- Использование грунтовых вод.
- Размещение населенных пунктов.
- Непреднамеренное использование радиоактивно загрязненных сред из хранилища РАО в качестве сырья для производства стройматериалов.
- Археологические изыскания.
- Различные виды промышленной деятельности.

**Рекомендации по проведению анализа сценариев облучения населения от хранилища РАО и определению критических групп лиц из населения
Разработаны с учетом рекомендаций [2,3]**

2.1. Общие особенности количественной оценки доз вероятностного облучения лиц из населения, относящейся к будущему времени

Индивидуумов, которые будут жить в будущем, следует рассматривать как подвергающихся радиационному риску одновременно более чем от одного из возможных сценариев облучения.

В условиях нормальной эксплуатации радиационно опасных объектов, когда облучение происходит с высокой вероятностью P (практически равной единице), в качестве показателя радиационной опасности (безопасности) населения может быть использовано оцененное значение эффективной дозы облучения критической группы лиц из населения, которое необходимо сравнить с установленным критерием безопасности - дозовым пределом.

Такой же, но обобщенный подход должен использоваться при оценке безопасности радиационно опасного объекта, облучение человека от которого может произойти только с некоторой существенно отличной от единицы вероятностью, или же если это облучение будет связано с реализацией нескольких альтернативных сценариев, характеризующихся различными значениями вероятности. Количественная оценка уровня радиационной опасности возможной реализации для одного и того же индивидуума нескольких сценариев* облучения проводится в соответствии с изложенным ниже.

Пусть $\{P_i(E_i)\}$ - значения вероятностей реализации этих сценариев, $\{E_i\}$ - связанные с ними значения возможных эффективных эквивалентных доз облучения индивидуума, $i = 1, 2, \dots, M$, M - число сценариев. Можно показать, что если все значения доз облучения $\{E_i\}$ не превышают порога возникновения детерминированных последствий $E_{пор}$, то значение эффективной эквивалентной дозы облучения индивидуума, соответствующее значению полного радиационного риска, определяется как**:

$$E_{полная} = \sum_i P_i(E_i) E_i. \quad (2.1)$$

2.2. Некоторые особенности определения критических групп населения по отношению к облучению от хранилища РАО в будущем времени

2.2.1. При оценке безопасности хранилища РАО, относящейся к будущему времени, необходимо использовать понятия критических групп населения, подвергающегося радиационному риску в результате воздействия хранилища.

2.2.2. Следует учитывать, что в рассматриваемом случае разные однородные группы населения могут одновременно находиться под радиационным риском нескольких возможных сценариев облучения, т. е. какая-то из упомянутых групп, не являясь критической ни по одному из рассмотренных сценариев облучения, в итоге по сумме всех сценариев может оказаться наиболее облучаемой (подвергающейся максимальному радиационному риску) от данного хранилища РАО. Поэтому необходимо одновременно анализировать значения уровней облучения различных групп при реализации каждого из сценариев эволюции хранилища РАО.

2.2.3. Для решения этой задачи рекомендуется провести ее математическую формализацию.

Пусть упомянутые сценарии облучения характеризуются вероятностями их реализации P_{ij} ($0 < P_{ij} < 1$) и значениями E_{ij} доз облучения различных однородных групп населения (не только критических) при реализации этих сценариев (очевидно, что каждому из сценариев соответствует только одна критическая группа лиц из населения). Здесь индексы j ($j = 1, 2, \dots, N$) и i ($i = 1, 2, \dots, M_i$) относятся к данной группе лиц из населения и сценарию их облучения соответственно.

Тогда для одной и той же (j -й) однородной группы лиц из населения полная эффективная доза

* Термин "сценарий" применительно к моделированию возможного будущего впервые был введен в работе Кана (Kahn, H., et al. The Year 2000, a Framework for Speculation. US, New York, Macmillan, 1967).

В рекомендациях МАГАТЭ отмечается, что одним из наиболее существенных аспектов использования различных сценариев при оценке безопасности хранилища РАО является то, что "индивидуумов, которые будут жить в будущем, следует рассматривать, как подвергающихся радиационному риску одновременно более чем в результате реализации одного из возможных сценариев облучения. Сумма вероятностей реализации этих сценариев должна равняться единице, в предположении, что все существенные сценарии учтены и что они взаимоисключающие, и что риски, связанные с различными сценариями, должны суммироваться только в том случае, если этим рискам одновременно подвергается одна и та же группа индивидуумов".

** Ввиду того, что в настоящем Руководстве все формулы, таблицы и рисунки включены в приложения, принят следующий порядок их нумерации: первый номер соответствует номеру приложения, второй - текущему номеру формулы в приложении. Например, формула (2.1) означает первую формулу в приложении 2.

облучения $E_{\text{полная } j}$, соответствующая полному риску ущерба здоровью за счет радиационного воздействия хранилища РАО, суммирующему все возможные сценарии облучения, определяется согласно выражению (2.1), в рассматриваемом случае принимающему вид

$$E_{\text{полная } j} = \sum_i P_{ij} E_{ij}. \quad (2.2)$$

В выражении (2.2) должны быть учтены все сценарии* облучения данной группы лиц, т. е. должно выполняться нормировочное соотношение

$$\sum_i P_{ij} = 1. \quad (2.3)$$

2.2.4. На основании сравнения полных эффективных доз облучения различных однородных групп лиц из населения, определенных в соответствии с выражением (2.2), следует находить критическую группу лиц по отношению к полному радиационному воздействию хранилища РАО.

2.3. Рекомендуемая формализация анализа сценариев облучения человека от хранилища РАО

2.3.1. Пусть полный набор сценариев эволюции хранилища РАО определен для каждого выбранного при оценке промежутка времени и определен соответствующий набор вероятностей реализации указанных сценариев $\{P_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, M$). Примем, что данный набор сценариев уже учитывает все возможные антропогенные воздействия на хранилище РАО, могущие в принципе повлиять на его эволюцию.

Во избежание серьезных ошибок при оценке безопасности хранилища РАО рекомендуется убедиться в том, что полный набор дискретных вероятностей P_i для всех возможных сценариев эволюции хранилища РАО подчиняется нормировочному соотношению типа (2.3) - на каждом выбранном для расчетной оценки промежутке времени и с учетом того, что по мере удаления в будущее значения времени, к которому относится оценка, сценарии эволюции хранилища будут с неизбежностью "расщепляться" или "ветвиться":

$$\sum_i P_i = 1 \quad (\text{для всех } i = 1, 2, \dots, M). \quad (2.4)$$

2.3.2. Как следует из изложенного в предыдущих подразделах, для каждого i -го сценария следует определить в общем случае несколько различных однородных групп лиц из популяции человека, подвергающихся как максимальному (по отношению только к данному сценарию эволюции хранилища РАО), так и повышенному (по сравнению со сценарием нормальной эволюции) облучению. Пусть для i -го сценария определено N_i таких групп и индекс j относится к одной из групп ($j = 1, 2, \dots, N_i$).

Если какие-то из таких групп, в свою очередь, могут подвергнуться (при данном сценарии эволюции хранилища РАО) повышенному облучению только с некоторой, меньшей единицы вероятностью, то для этих групп населения следует определить и полный набор значений условных вероятностей всех возможных (при данном сценарии эволюции) сценариев их облучения $\{\omega_{kji}\}$ ($k = 1, 2, \dots, K_{ij}$). Этот набор значений также должен удовлетворять нормировочному соотношению $\sum_k \omega_{kji} = 1$ (суммирование проводится по k), поскольку он определен при условии реализации i -го сценария эволюции хранилища РАО. Следовательно, нельзя исключать, что некоторые сценарии эволюции хранилища РАО даже для одной и той же группы лиц могут "расщепляться" на несколько сценариев облучения.

Каждому из значений условных вероятностей ω_{kji} должно быть "приписано" значение соответствующей эффективной индивидуальной дозы облучения, т. е. должен быть определен полный набор значений доз $\{E_{kji}\}$.

Во избежание чрезмерного усложнения схемы оценки в этом случае всегда возможно свести указанный набор нескольких сценариев облучения одной группы лиц в рамках одного сценария эволюции

* Следует иметь в виду некоторую неоднозначность использования в научной литературе термина "сценарий", который в разных работах упоминается то как "сценарий эволюции хранилища РАО", то как "сценарий облучения человека". При этом иногда подразумевается полная тождественность этих двух понятий, а иногда - некоторое различие между ними.

Принятие этих двух понятий тождественными условно можно считать правильным, но только в том смысле, что для одной и той же однородной группы лиц из населения в конечном счете каждому из сценариев эволюции хранилища РАО может быть поставлен в соответствие только один (в ряде случаев "обобщенный") сценарий облучения этой группы лиц.

Тем не менее рекомендуется различать понятия "сценарий эволюции хранилища РАО" и "сценарий облучения человека", поскольку:

- для каждого из сценариев эволюции хранилища РАО необходимо рассмотреть несколько однородных групп лиц из населения, подвергающихся повышенному облучению (каждая в соответствии со своим сценарием облучения), соответственно принять несколько различных сценариев облучения;
- в ряде случаев для одной и той же группы лиц из населения в рамках одного сценария эволюции хранилища может быть обоснованно выделено несколько возможных сценариев облучения (вероятность облучения данной группы лиц в соответствии с данным сценарием облучения должна быть меньше единицы, а сумма этих вероятностей равна единице).

хранилища РАО к одному “обобщенному” сценарию облучения. Для этого нужно “приписать” такому сценарию значение эффективной дозы облучения рассматриваемой группы лиц из населения, определенное согласно выражению (2.1).

Значение вероятности реализации данного “обобщенного” сценария облучения будет равно значению вероятности реализации соответствующего сценария эволюции хранилища РАО.

2.3.3. На заключительном этапе формализованной процедуры анализа сценариев облучения человека следует объединить (в математическом смысле “объединения множеств”) по всем сценариям эволюции хранилища РАО все группы лиц из населения (не только критические группы лиц по отношению к данному сценарию эволюции хранилища РАО), которые могут подвергнуться повышенному облучению хотя бы при одном из сценариев. Затем необходимо для каждой группы из объединенного множества групп определить значения доз облучения при реализации всех тех сценариев эволюции хранилища РАО, в которых повышенное облучение группы первоначально не было предположено. Если проверка покажет, что при данном конкретном сценарии эволюции хранилища РАО для данной однородной группы лиц повышенного облучения не было, то значение дозы ее облучения при данном сценарии может быть принято равным нулю, за исключением сценария нормальной эволюции хранилища РАО: в этом сценарии доза нормального облучения населения должна из консервативных соображений быть принята равной дозе облучения соответствующей критической группы лиц, которая в данном случае определяется однозначно и вне зависимости от других маловероятных сценариев эволюции хранилища.

Затем следует для каждой группы из полученного объединенного множества найти критическую группу по отношению к сумме всех сценариев эволюции хранилища РАО, характеризующихся ускоренным поступлением радионуклидов из хранилища в биосферу, путем определения полных эффективных доз облучения каждой группы в соответствии с выражением (2.1) (суммирование по всем сценариям эволюции хранилища) с последующим сравнением полученных значений доз. При таком формальном подходе обеспечена правильность нормирования парциальных вероятностей облучения групп в каждом сценарии эволюции.

2.4. Методический пример анализа сценариев облучения человека от хранилища РАО

Приведем упрощенный методический пример анализа сценариев облучения человека от хранилища РАО, который иллюстрирует изложенное в пп. 2.1 - 2.3 и в котором используются некоторые рекомендации МАГАТЭ.

Рассмотрим основные возможные для всех периодов времени сценарии эволюции хранилища РАО:

1. Сценарий, связанный с непреднамеренным проникновением человека в хранилище РАО.
2. Сценарий реализации маловероятных событий максимальной возможной интенсивности.
3. Сценарий нормальной эволюции хранилища РАО.

Соответственно P_1, P_2, P_3 - вероятности реализации этих сценариев.

Вероятности P_1, P_2, P_3 относятся к возможной эволюции самого хранилища РАО. Для простоты будем считать, что эти сценарии различны и представляют полный набор возможных сценариев. Очевидно, что они не могут реализоваться одновременно. Поэтому сумма вероятностей их реализации P_1, P_2, P_3 должна быть равна единице.

В сценарии “проникновения” в данном примере рассмотрим группу № 1 - команду бурильщиков, которые вероятно подвергнутся значительному облучению в процессе непреднамеренного вскрытия хранилища. Полный набор сценариев облучения этой группы в данном сценарии эволюции в соответствии с принятым предположением состоит из двух сценариев.

1. Проникновение совершила именно эта команда (из всех команд бурильщиков, работающих в районе расположения хранилища РАО) - условная вероятность ω_{111} , доза облучения E_{111} .
2. Проникновение совершила не эта команда - условная вероятность $\omega_{112} = 1 - \omega_{111}$, доза облучения $E_{112} = 0$.

В соответствии с приведенными выше рекомендациями определим дозу облучения бурильщиков в “обобщенном” сценарии их облучения в случае, если проникновение будет иметь место:

$$E_{11} = \omega_{111}E_{111} + \omega_{112}E_{112} = \omega_{111}E_{111}.$$

Предположим, что команда бурильщиков состоит не из фермеров, проживающих в данной местности, следовательно, для сценариев эволюции хранилища 2 и 3 дозы облучения бурильщиков равны нулю.

Рассмотрим другую группу № 2 - фермеров, постоянно проживающих в данной местности и потребляющих часть продуктов собственного производства.

Примем несколько возможных вариантов повышенного облучения фермеров при определенном выше наборе сценариев эволюции хранилища.

Разрушение целостности системы захоронения РАО в результате проникновения человека в дальнейшем приведет к изменению режима выхода радионуклидов из хранилища, а следовательно, к изменению уровня облучения фермеров. Примем, что по своим последствиям для фермеров сценарий 1 качественно подобен сценарию 2 и что значение получаемой фермерами дозы равно E_{12} .

Примем также, что в случае реализации сценария эволюции хранилища 2 для фермеров возможно “расщепление” сценариев облучения:

- некоторая часть ω_{221} ($0 < \omega_{221} < 1$) природных разрушительных событий из сценария эволюции хранилища 2 не вызовет, кроме снижения уровня безопасности хранилища, дополни-

тельно других неблагоприятных последствий, вынуждающих фермеров покинуть данную местность (или отказаться от ведения на ней хозяйственной деятельности), поэтому они получают повышенную дозу облучения E_{221} ;

- некоторая часть ($\omega_{222} = 1 - \omega_{221}$) событий из сценария эволюции хранилища 2 вызовет, кроме снижения уровня безопасности хранилища, дополнительно другие неблагоприятные последствия, вынуждающие фермеров покинуть данную местность (или отказаться от ведения на ней хозяйственной деятельности), поэтому доза их облучения E_{222} будет равна нулю.

Так же, как и для бурильщиков в сценарии эволюции хранилища 1, определим дозу облучения фермеров в "обобщенном" сценарии облучения в сценарии эволюции хранилища 2:

$$E_{22} = \omega_{221}E_{221} + \omega_{222}E_{222} = \omega_{221}E_{221}.$$

Находим полные эффективные дозы облучения каждой из рассмотренных групп лиц из населения:

для бурильщиков - $E_1 = P_1\omega_{111}E_{111}$;

для фермеров - $E_2 = P_1E_{12} + P_2\omega_{221}E_{221}$.

В зависимости от численных значений принятых параметров возможна ситуация, при которой фермеры, получая в каждом из двух рассмотренных сценариев дозы облучения, меньшие, чем бурильщики, по сумме двух сценариев могут оказаться критической группой лиц из населения.

Возможно также (в зависимости от численных значений принятых параметров), что даже в случае, если критической группой по сумме сценариев реализации событий максимальной возможной интенсивности в хранилище будут бурильщики, радиационный риск для фермеров может оказаться большим, чем для бурильщиков. Это связано с тем, что фермеры подвергаются облучению еще и при основном сценарии нормальной эволюции хранилища РАО (поскольку проживают в непосредственной близости от хранилища РАО) с дозой, равной E_3 , т. е. их полный радиационный риск соответствует значению дозы $E_3 = P_1E_{12} + P_2\omega_{221}E_{221} + (1 - P_1 - P_2)E_3$.

Приложение 3

Некоторые подходы для разработки концептуальных моделей хранилища РАО Разработаны с учетом рекомендаций [4, 5]

Первый этап разработки концептуальных моделей - определение сред выхода и переноса радионуклидов, а также путей облучения человека. Для каждого сценария рекомендуется получить ответы на следующие вопросы:

- Какие величины или характеристики принимаются в качестве конечных оцениваемых величин и соответственно в качестве критериев? (например, доза облучения населения и (или) радиационный риск, концентрация радионуклидов в различных средах и т. д.).
- Какая среда является средой выхода радионуклидов? (газообразная, твердая, жидкая).
- Какая среда является средой переноса радионуклидов? (газообразная, твердая, жидкая).
- Какие цепочки определяют облучение человека? (например, подземные воды и речные воды, используемые как источник питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения, продукты животного происхождения, продукты растительного происхождения и т. д.).
- Каковы эффекты воздействия радионуклидов на человека и окружающую среду? (например, ущерб здоровью, потеря природных ресурсов за счет их загрязнения радионуклидами и т. д.).

По завершении первого этапа для каждого сценария следует рассмотреть механизмы, посредством которых может происходить соответствующее высвобождение радионуклидов, их перенос и облучение человека.

3.1. Индуктивно-дедуктивный метод построения концептуальных моделей

Индуктивно-дедуктивный метод предполагает изучение нескольких механизмов, которым, если потребуется, следует приписать соответствующие вероятности.

Для этого могут быть использованы следующие стратегии:

- дедуктивная стратегия, которая начинается с рассмотрения того, каким образом может произойти выход радионуклидов, изучения возможных механизмов переноса и облучения и заканчивается расчетом связанных с этим уровней облучения;
- индуктивная стратегия, которая начинается с рассмотрения значимых уровней радиационных воздействий и изучения механизмов облучения и переноса, которые могут создать данные уровни воздействий, и завершается рассмотрением соответствующих механизмов выхода.

Обе стратегии могут использоваться совместно.

3.2. Метод "Матрицы Взаимодействия"

3.2.1. Применение метода "Матрицы Взаимодействия" рекомендуется в случае неочевидности пути реализации индуктивно-дедуктивного метода построения концептуальной модели. Этот метод по сравнению с индуктивно-дедуктивным методом позволяет построить эту модель более формализованным об-

разом, и результат его применения меньше зависит от способности экспертов интуитивно верно оценить иерархию и взаимосвязь процессов переноса радионуклидов из хранилища РАО в ближнюю среду обитания человека.

Реализация метода “Матрицы Взаимодействия” начинается с разделения системы на составные части. Определяются главные особенности конструкции и размещения хранилища РАО, другие факторы, а также происходящие в хранилище РАО и вне его события, явления и процессы, влияющие, по мнению экспертов, на перенос радионуклидов от хранилища РАО к человеку.

Составляется (например, методом экспертных оценок) перечень событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, элементы которого представляют основные диагональные элементы “Матрицы Взаимодействия”. Взаимозависимость (или взаимодействие) компонентов этого перечня между собой может быть отражена ее недиагональными элементами, позволяющими на качественном уровне учесть любые причинно-следственные связи между компонентами: аналитические зависимости, статистически установленные корреляции и т.д. Рис. 3.1 иллюстрирует методику на примере матрицы размерностью 2x2 и демонстрирует принятое правило записи направления взаимодействия (воздействия).

Компонент А 1,1	Зависимость В от А или Воздействие А на В 1,2
Зависимость А от В или Воздействие В на А 2,1	Компонент В 2,2

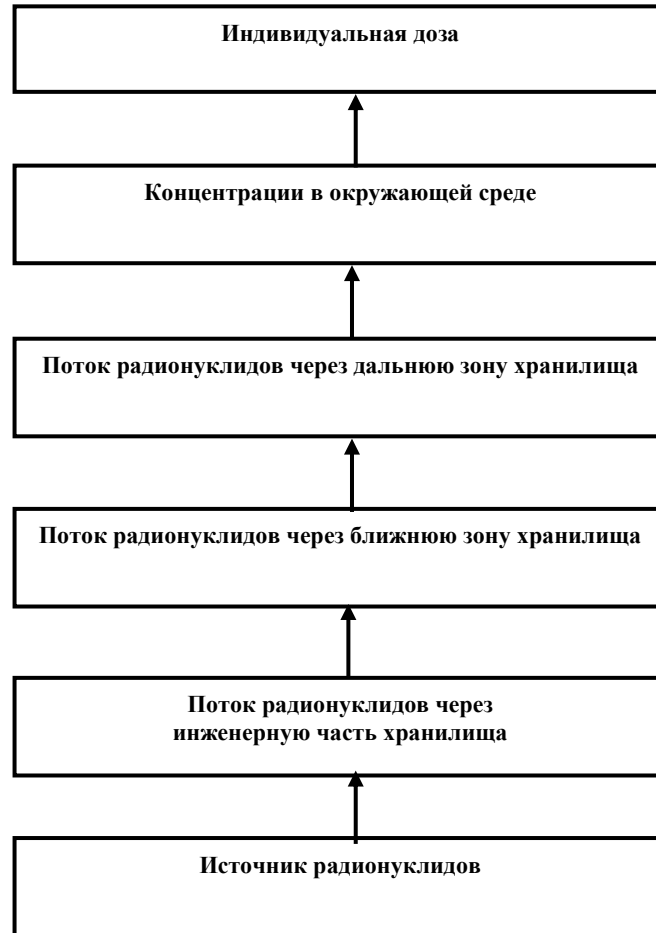
Рис. 3.1. Пример “Матрицы Взаимодействия” размерностью 2x2

3.2.2. При использовании метода “Матрицы Взаимодействия” принято располагать недиагональные элементы матрицы в последовательности миграции радионуклидов. Все возможные пути миграции радионуклидов и связанные с ним пути облучения и облучаемые группы населения должны быть прослежены и отражены в концептуальной модели. Каждый переход радионуклидов от одного компонента матрицы к другому посредством взаимодействия может затем быть представлен с помощью соответствующего математического выражения и включен в математическую модель.

3.2.3. В процессе рассмотрения взаимодействий важно убедиться, что они являются прямыми взаимодействиями, и определить, какой элемент служит причиной и каким будет эффект. При описании одного процесса может быть использовано более двух диагональных элементов. Связанная цепочка взаимодействий внутри матрицы называется путем. Также возможно наличие петель типа А-В-А. Наличие их - важное указание на необходимость организации итерационного процесса математических вычислений.

3.2.4. Если экспертных суждений оказалось недостаточно для точного определения всех недиагональных элементов “Матрицы Взаимодействия” или есть вероятность, что эксперты ошиблись, то корректно примененный метод “Матрицы Взаимодействия” “не позволит” ошибиться даже и в этом случае. Нужно выполнить две итерации или более для формализованного уточнения значений элементов “Матрицы Взаимодействия”, включая в первую итерацию все возможные взаимодействия между диагональными элементами матрицы. На последующих итерациях взаимодействия между недиагональными элементами матрицы следует уточнять таким образом, чтобы в результате остались только значимые элементы для включения их в концептуальную модель.

Схема проведения расчетной оценки формирования индивидуальных доз облучения населения, живущего в зоне потенциального влияния хранилища РАО



Основные процессы и факторы переноса жидкости и газов через пористые среды и их влияние на различные аспекты безопасности хранилища РАО

Процесс или фактор переноса	Предположительное влияние на безопасность хранилища РАО	
	Снижение избыточного давления внутри хранилища	Ускорение выноса радионуклидов из хранилища
Однофазный поток жидкости с растворенными газами	Незначительное	Требует изучения
Диффузии и химические реакции растворенных в поровой воде газов с учетом адвекции	Требует изучения	То же
Сорбция газовой фазы средой	То же	»»
Двухфазный поток жидкости и газа	Определяющее	Определяющее
Всплывание пузырьков в направлении, перпендикулярном потоку жидкости, влияние эффекта на поперечную дисперсию потока	Требует изучения	То же
Эффекты относительной (различной для жидкой и газообразной фаз) проницаемости пористой среды и капиллярного давления	Определяющее	»»
Смешивание или диффузия паров в газовую фазу	Требует изучения	Требует изучения
Пространственная нестабильность процесса переноса, связанная с флуктуациями вязкости	То же	То же
Динамическая реакция среды на создаваемое флюидами (жидкостью и газом) давление	Требует изучения (представляется важным для хранилищ РАО, размещаемых в многолетнемерзлых грунтах)	»»

**Пример оценки безопасности реального приповерхностного хранилища низкоактивных РАО, проведенной с использованием специализированного пакета программных средств AMBER-3.1
Разработано с учетом рекомендаций [6, 7]**

6.1. Описание объекта

В 1969 г. в районе одного из северо-восточных нефтяных месторождений России на глубине около 1200 м были взорваны два ядерных заряда незначительной мощности. Предполагалось, что проведение этих подземных ядерных взрывов поможет интенсифицировать добычу нефти.

Механическое воздействие подземных взрывов в сочетании с естественной трещиноватостью и падением пластового давления, явившимся результатом эксплуатации, привели к поступлению загрязненной воды из полостей взрывов в продуктивный пласт. В результате через 15 лет после взрывов начался вынос радионуклидов вместе с добываемой нефтью. Содержание радионуклидов в нефти было весьма низким, активность в основном сорбировалась на поверхностях оборудования, при этом значение удельной активности в сорбированном осадке увеличивалось на несколько порядков по сравнению со значением удельной активности в нефти, оставаясь тем не менее незначительным. Радиоактивный осадок периодически удалялся с поверхностей оборудования и накапливался в поверхностных хранилищах. Поскольку

объемы нефтедобычи были достаточно велики, за 20 лет накопилось около 5000 м³ радиоактивно загрязненных материалов низкой активности. Физико-химическая форма материалов - нефтяной шлам, осадки в оборудовании, глинисто-песчаный загрязненный грунт, содержащаяся в грунте поровая влага. Радионуклидный состав и удельные активности твердой фазы и поровой влаги приведены в табл. 6.1.

В табл. 6.1 включены значения следующих нормируемых величин:

- уровней вмешательства при поступлении с водой отдельных радионуклидов для населения УВ^{вода}, минимально значимых удельных активностей МЗУА и активностей радионуклидов МЗА в помещении или на рабочем месте (установлены Нормами радиационной безопасности (НРБ-99));
- удельных активностей А_β жидких и твердых РАО (содержащих бета-излучающие радионуклиды), рассматриваемые как низкоактивные (установлены Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99)).

Таблица 6.1

Значения удельных активностей твердой фазы и поровой влаги, УВ^{вода}, МЗУА и МЗА, А_β

Радионуклид	Удельная активность, Бк/кг	УВ ^{вода} , Бк/кг	МЗУА, Бк/г	МЗА, Бк	А _β , Бк/кг
Cs-137	От 1,15·10 ² до 1,63·10 ⁵	11	1,0·10 ¹	1,0·10 ⁴	< 10 ⁶
Sr-90	От 9,6 до 5,2·10 ²	5	1,0·10 ²	1,0·10 ⁴	
H-3 *	От 1,2·10 ² до 2,15·10 ⁴	7,7·10 ³	1,0·10 ⁶	1,0·10 ⁹	

* В поровой влаге загрязненной почвы.

6.2. Постановка задачи

Из табл. 6.1 видно, что удельные активности материалов очень низки, однако рассматриваемые материалы представляют собой низкоактивные РАО и подлежат захоронению согласно требованиям, предъявляемым к отходам указанной категории.

Для каждой категории РАО в Российской Федерации установлены требования к хранилищу РАО, основанные на консервативном (т. е. избыточно обеспечивающем безопасность захоронения) подходе. В частности, согласно этим требованиям, хранилище низкоактивных РАО должно быть:

- размещено на расстоянии не менее 500 м от поверхностных водоемов (СПОРО-85, п.2.1);
- перекрыто сверху железобетонной плитой, обеспечивающей дополнительную защиту от проникновения человека в хранилище.

По гидрогеологическим условиям для размещения хранилища РАО в данном случае наиболее подходит площадка, расположенная на территории самого объекта. Такое расположение также даст возможность транспортировать РАО в хранилище только по территории объекта, что исключает возможность радиационного воздействия на население и окружающую среду за его пределами как при нормальном режиме транспортирования, так и при возможных аварийных ситуациях. Подобный выбор площадки для размещения хранилища также позволит ограничить доступ населения к хранилищу (не ближе 50 м) на все время эксплуатации объекта (не менее 40-50 лет) и последующего вывода из эксплуатации (около 10 лет).

Площадка предполагаемого размещения хранилища РАО находится на расстоянии 300 м (по прямой) от ручья, который впадает в реку на расстоянии несколько более 1 км от хранилища РАО. Геологические изыскания подтверждают несовпадение направления движения подземных вод по водоносному горизонту от хранилища РАО к области разгрузки в ручей с направлением по кратчайшему пути. Длина полного действительного пути подземных вод от хранилища РАО до области разгрузки больше 500 м. Однако несмотря на это, в соответствии с существующими в Российской Федерации требованиями, строительство хранилища РАО на этой площадке формально не может быть разрешено.

Также основанием для отказа в выдаче разрешения на строительство (если бы была подана соответствующая заявка) являлось бы то обстоятельство, что в предложенном проекте хранилища РАО не предусмотрено сооружение железобетонного перекрытия.

Однако незахороненные РАО потенциально опасны для персонала, населения и окружающей среды, а средняя активность РАО очень низка и представлена коротко- и среднеживущими не альфа-активными изотопами.

С учетом изложенного выше представляется целесообразным сравнить результаты количественной оценки безопасности данной системы хранилища РАО с требованиями, изложенными в нормативных документах. Если оценка продемонстрирует безопасность захоронения, возможно разрешить размещение указанных РАО на выбранной площадке при соблюдении следующих дополнительных условий:

- хранилище РАО должно быть перекрыто сверху дополнительным барьером безопасности (железобетонной плитой);

- в процессе размещения должна быть определена полная активность РАО, захороненных в каждую траншею. Данные о значениях полных активностей следует оформить документально.

6.3. Основные элементы конструкции хранилища РАО. Концепция обеспечения его безопасности

Характеристики предусмотренных проектом хранилища РАО основных элементов конструкции одиночной траншеи (рис.6.1) и описание их защитных функций кратко приведены в табл.6.2.

Предварительная оценка предлагаемого проекта хранилища низкоактивных РАО показала следующее:

- принятая в проекте концепция обеспечения безопасности хранилища РАО – это полная изоляция РАО от человека и окружающей среды;
- разработанная конструкция в целом соответствует принятой концепции обеспечения безопасности;
- конструкция соответствует также современным представлениям о безопасности, принципам и требованиям МАГАТЭ об обязательном наличии нескольких барьеров (инженерных и естественных) на пути возможной миграции радионуклидов в направлении подземных вод и к поверхностному слою почвы;
- проектом предусмотрены конструктивные решения по предотвращению потери основными барьерами безопасности хранилища РАО защитных (изолирующих) функций.

6.4. Упрощающие и консервативные допущения, принятые в оценке безопасности хранилища РАО

Из консервативных соображений принимаем следующие допущения:

- средние значения удельных активностей радионуклидов в размещаемых РАО равны максимальным значениям этих радионуклидов в рассматриваемых радиоактивных материалах;
- значения всех физических параметров, влияющих на перенос радионуклидов в различных барьерах безопасности, равны значениям, при которых эти барьеры обладают наихудшими изолирующими свойствами (в случае сомнений в правильности данных о рассматриваемых параметрах, представленных предприятием, ответственным за РАО, диапазон изменения их возможных значений принимаем в соответствии с данными, приведенными в научной литературе).

6.4.1. Расчетная модель “хранилище РАО – биосфера”

Для моделирования выхода радионуклидов из хранилища РАО и возможного облучения населения принимаем следующие общие характеристики хранилища:

хранилище РАО занимает площадь 30 000 м², общий объем размещаемых в нем РАО составляет 5 100 м³;

всего в хранилище насчитывается 17 траншей, каждая из которых занимает площадь 1760 м² и содержит 300 м³ РАО;

площадь единичной траншеи 640 м², площадь слоя РАО 200 м², толщина слоя 1,5 м.

Моделирование проводим для одной траншеи.

Принятая для оценки безопасности расчетная модель компартментов “хранилище РАО – биосфера” приведена на рис. 6.2. Характеристики РАО и различных компартментов приведены в табл. 6.3 - 6.5.

Таблица 6.2

**Проектные характеристики и защитные функции основных конструктивных элементов
одиночной траншеи РАО**

№ п/п	Элемент хранилища	Защитная функция элемента
1	Нижний противofильтрационный экран из глины толщиной не менее 0,5 м со значением коэффициента фильтрации K_f не более $1 \cdot 10^{-5}$ м/сут	Препятствует выносу радионуклидов в основание траншеи.
2	Верхний гидроизолирующий экран из глины толщиной 0,5 м со значением коэффициента фильтрации K_f , равным $1 \cdot 10^{-5}$ м/сут	Препятствует проникновению атмосферных осадков внутрь траншеи.
3	Дренажный слой (сверху глины) из гравийно-песчаной смеси толщиной 0,3 м	Предназначен облегчить удаление атмосферной влаги с поверхности траншеи.
4	Защитный слой толщиной 0,5 м из дробленого камня крупностью 15-20 см	Функция этого элемента - защита от механического разрушения в результате проникновения растений, животных и человека через один из основных барьеров безопасности - верхнего слоя глины. Дополнительно он несет информационную функцию - его наличие в будущем должно предупреждать человека о существовании какой-то старой инженерной системы и, следовательно, снижать вероятность неумышленного проникновения или тяжесть радиационных последствий этого.
5	Верхний защитный слой из суглинка мощностью 0,9 м с почвенно-растительным покровом	Он должен обеспечить защиту человека от внешнего гамма-излучения так, чтобы величина эффективной эквивалентной дозы составила бы не более 0,1 мЗв/год дополнительно к естественному радиационному фону облучения человека. Дополнительная функция этого элемента хранилища РАО - поддержание содержания влаги в нижележащих слоях на уровне, необходимом для того, чтобы предотвратить высыхание верхнего слоя глины, т. е. предотвратить появление в нем трещин, и как следствие, утрату им гидроизолирующих свойств.
6	Дренаж вокруг траншеи	Предназначен для отвода на рельеф площадки за пределы хранилища РАО атмосферных осадков, попадающих на поверхность траншеи.
7	Водоненасыщенный слой суглинка между нижним глиняным изолирующим экраном и первым водоносным горизонтом мощностью около 10 м со значением коэффициента фильтрации K_f не более $1 \cdot 10^{-3}$ м/сут	Проектом определен как дополнительный геологический барьер безопасности, предназначенный для замедления выхода радионуклидов из траншеи в случае незапланированного разрушения нижнего слоя глины.

Таблица 6.3

Геометрические характеристики компартов

Характеристика компартамента	Компартмент						
	Поровая вода	Матрица отходов	Глина	Ненасыщенный слой	Водоносный слой (часть до колодца)	Водоносный слой (часть после колодца)	Река
Длина, м	0,4	1,5	0,5	10	50	250	180
Объем, м ³	60	300	100	2000	100000	500000	450

Таблица 6.4

Изотопный состав и общие характеристики отходов, размещаемых в одну траншею

Характеристика отходов	Матрица (твердая фракция) отходов, 300 м ³ , 540 000 кг		Вода в залитых водой отходах (20% по объему), 60 м ³	
	Полные активности, Ки	Количество, моль	Полные активности, Ки	Количество, моль
Плотность фракции, г/см ³	1,8		1,0	
Удельные активности, Ки/кг, Ки/л, периоды полураспада изотопов T _{1/2} , лет				
Цезий, 4,4·10 ⁻⁶ , 30,17	2,376	0,0002006	-	-
Стронций, 1,4·10 ⁻⁸ , 28,6	0,00756	0,000000605	0,00756	0,000000605
Тритий 5,8·10 ⁻⁷ , 12,28	-	-	0,0087	0,00000029897

Таблица 6.5

Характеристики задерживающих и сорбционных свойств барьеров безопасности (компартиментов системы)

Характеристика барьера безопасности	Барьер безопасности			
	Матрица отходов	Глина	Ненасыщенный слой	Водоносный слой
Плотность, г/см ³	1,8	1,8	2,0	2,0
Коэффициент пористости	0,01	0,837	0,125	0,25
Коэффициент фильтрации, м/сут	10 ⁻⁵ ·2·10 ⁻²	10 ⁻⁵	10 ⁻³	10 ⁻²
Коэффициент межфазного распределения K _r для цезия, л/кг	0,3	0,3	0,1	0,1
K _r для стронция, л/кг	0	0,1	0,05	0,05

6.4.2. Сценарии эволюции хранилища РАО и сценарии облучения населения

Для оценки безопасности разработано шесть сценариев эволюции хранилища РАО: один сценарий нормальной эволюции (см. пп. 3.3.2.4) и пять вероятностных сценариев (см. пп. 3.3.2.5).

Для сценария нормальной эволюции хранилища РАО приняты наихудшие начальные условия, а именно:

- предположено, что при операции закрытия траншеи пошел дождь и слой отходов, верхние гидроизолирующие (глина) и дренажные слои полностью насытились водой. Тритий и стронций полностью перешли из поровой влаги материала отходов (пористость 0,02) в объем воды между упаковками (пустотность заполнения 0,18);
- принято консервативное предположение о том, что внутри полностью насыщенного водой слоя отходов равновесие концентраций радионуклидов между твердой и жидкой фазами устанавливается достаточно быстро (но не мгновенно), с постоянной времени, равной 1 мес¹.

Принятые упрощающие консервативные предположения определяют максимально неблагоприятный (с точки зрения безопасности) набор начальных условий выхода радионуклидов в ближнюю зону хранилища РАО через барьеры безопасности. При этих условиях миграция радионуклидов через барьеры начинается сразу же после приведения хранилища РАО в окончательную конфигурацию. Поскольку рассматривается нормальный сценарий выхода радионуклидов, все барьеры безопасности считаются неповрежденными.

В вероятностных сценариях эволюции хранилища РАО приняты те же наихудшие начальные условия, что и в нормальном сценарии, но включены дополнительные события максимальной возможной интенсивности (разрушительные события), которые предполагаются произошедшими сразу после приведения хранилища РАО в окончательную конфигурацию и оставшимися незамеченными. Кроме того, предполагается, что возможны серьезные ошибки в геологических исследованиях площадки, на которой будет размещено хранилище РАО.

Пять вероятностных сценариев эволюции (ВСЭ) хранилища РАО описаны ниже.

ВСЭ-I - аварийное повреждение нижнего глиняного экрана и, как следствие, выполнение всех задерживающих противотранспортных функций только суглинками основания (ненасыщенным слоем). Поступление воды в емкость траншей ограничивается верхним глиняным экраном, так как нарушена герметичность нижнего изолирующего глиняного барьера, часть атмосферных осадков, просачивающаяся через верхний барьер, проходит через пористую матрицу отходов и сразу попадает в природный барьер (ненасыщенный слой грунта).

ВСЭ-II - аварийное повреждение верхнего глиняного экрана и, как следствие, постоянное поступление в емкость траншей воды со скоростью, равной среднегодовому количеству осадков 0,666 м/год. Нижний противодиффузионный глиняный экран перестает выполнять функции барьера безопасности, поскольку предполагается, что вода заполняет траншеи полностью, переливается через край и по дренажной системе поступает в суглинки основания (ненасыщенный слой).

Этот сценарий эквивалентен сценарию нормальной эволюции для гипотетического случая размещения рассматриваемых РАО непосредственно в грунте (без сооружения глиняных изолирующих экранов) или оставления РАО на поверхности земли.

ВСЭ-III - предположена ошибка в геологических исследованиях по определению сорбционных свойств водоносного горизонта (300 м), по которому происходит разгрузка радионуклидов в биосферу при нормальном и вероятностных сценариях облучения человека. Принято, что ни цезий, ни стронций не сорбируется (так же, как и тритий при нормальном сценарии эволюции хранилища РАО).

ВСЭ-IV - сочетание неблагоприятных событий (сценарий ВСЭ-II) и ошибки в геологических исследованиях места размещения РАО (сценарий ВСЭ-III). Принято, что нарушена герметичность верхнего изолирующего глиняного барьера и коэффициент сорбции цезия и стронция в материале водоносного слоя равен нулю.

ВСЭ-V - наихудшее сочетание нескольких неблагоприятных обстоятельств (воздействия максимальной возможной интенсивности и ошибок в выборе места размещения хранилища РАО). Оно определено по результатам расчетов сценариев ВСЭ-I и ВСЭ-II как сочетание воздействия максимальной возможной интенсивности в сценарии ВСЭ-II и ошибки в геологических исследованиях по определению сорбционных свойств как ненасыщенного слоя грунта (10 м), так и водоносного горизонта (300 м), т. е. всего пути, по которому происходит поступление радионуклидов в биосферу.

Принято, что нарушена герметичность верхнего изолирующего глиняного слоя (основного инженерного барьера) и также полагается равным нулю коэффициент сорбции цезия и стронция в материале ненасыщенного и водоносного слоев.

Рассмотрены следующие сценарии облучения населения:

- нормальный сценарий облучения населения (НСО) - для краткости рассмотрен только один путь облучения - использование в пищу радиоактивно загрязненной рыбы из реки;
- сценарий интрузии в водоносный горизонт (СИБГ) - на расстоянии 50 м от хранилища РАО (т. е. непосредственно за пределами нефтедобывающего предприятия) строительство колодца и употребление воды для питья;
- сценарий интрузии непосредственно в хранилище РАО при строительстве дома (СИСД) - внешнее облучение от радиоактивно загрязненных материалов из РАО (матрицы РАО и глиняного сорбирующего подстилающего экрана) и вдыхание радиоактивно загрязненной пыли.

Расчеты доз облучения населения СИБГ и СИСД проведены для значений времени, начиная с 70 лет после захоронения РАО. До этого времени реализация указанных сценариев невозможна, так как хранилище РАО находится на территории действующего предприятия. После вывода предприятия из эксплуатации предполагается, что его территория будет как минимум 100 лет находиться под пассивным административным контролем (сохранение информации о существовании хранилища РАО). Реализация указанных сценариев возможна только с незначительной вероятностью, монотонно возрастающей до значения 0,1 к концу периода административного контроля.

Все значения параметров облучения по всем трем путям облучения приняты такими же, как и в тестовом примере МАГАТЭ [8].

6.5. Определение приемлемых расчетных приближений для оценки безопасности хранилища РАО

Упрощенная камерная модель, описывающая хранилище РАО, приведена на рис. 6.2.

При расчетах использовалась более точная модель, отличающаяся от приведенной на рис. 6.2 детализированным разбиением протяженных компартментов с высокими задерживающими свойствами на системы из нескольких одинаковых частей. Так, нижний изолирующий слой глины и первый участок водоносного горизонта (от траншеи до колодца) разбивались на 10 частей. Это обеспечило более точное описание пространственного распределения радиоактивных загрязнителей по длине компартментов и времен задержки.

Зависимость корректности описания основных характеристик временной зависимости полученных результатов расчета дозы (при нормальном сценарии эволюции хранилища РАО и при всех сценариях облучения) от принятых расчетных приближений (от детальности пространственного разбиения протяженных компартментов) приведена в табл. 6.6. Видно, что абсолютные значения дозы облучения населения во всех случаях пренебрежимо малы.

Использование более точной модели дает результаты, на много порядков меньшие, чем модель, приведенная на рис. 6.2. Результаты расчета с использованием модели, приведенной на рис. 6.2, верно отражают только значение "пиковой" дозы за счет несорбируемого трития. В этой модели абсолютно неверно рассчитаны все остальные характеристики облучения: время достижения "пиковых" значений мощности дозы от трития и от цезия, само "пиковое" значение дозы за счет сорбируемого цезия (ошибка составляет 20 десятичных порядков).

Таблица 6.6

Зависимость результатов расчетов от детальности пространственного разбиения протяженных компарментов в нормальном сценарии эволюции хранилища РАО

Радионуклид, поступающий в биосферу	“Задержка выхода”, лет	Максимальное значение годовой дозы, Зв/год	Время достижения максимального значения, лет
Доза облучения за счет потребления рыбы из реки в пищу (сценарий облучения в результате нормальной деятельности человека), Зв/год			
Cs-137	20/150/150/400*	5e-14**/6e-33/1,5e-22/2,3e-41	200/550/550/1000
Sr-90	20/150/120/300	2e-14/2e-29/8e-21/1,2e-35	140/550/470/800
H-3	0,5/1/2,5/4	2e-14/1,9e-14/1,5e-14/1,5e-14	10/14/17/18
Доза облучения за счет потребления питьевой воды из колодца (сценарий облучения в результате проникновения человека в геосферу в районе расположения хранилища РАО), Зв/год			
Cs-137	5/70/100/300	0,9e-10/1e-29/2,6e-19/4e-38	125/550/450/800
Sr-90	5/50/100/130	2e-11/2e-26/7,5e-18/1e-32	125/500/370/800
H-3	0/1/1,5/3	3e-9/3e-9/2,5e-9/2,5e-9	2/4/8/8
Доза облучения за счет вдыхания пыли при строительстве дома, Зв/год ***			
Радионуклид, поступающий в биосферу	Значение годовой дозы для “Грубого” разбиения, Зв/год		Значение годовой дозы для “Точного” разбиения, Зв/год
Пыль состоит из глины нижнего слоя			
Cs-137	7,1e-8(47-max) / 6,3e-8(70) / 2,6e-8(140)		7e-7(45-max) / 6e-7(70) / 3,5e-7(140)
Sr-90	4,1e-9 (40) / 3,3e-9 (70) / 1,3e-9 (140)		4e-8 (37) / 3e-8 (70) / 7e-9 (140)
Пыль состоит из материала матрицы отходов (не зависит от приближения)			
Cs-137	2e-6(0-max) / 3,5e-7(70) / 7e-8(140)		
Доза внешнего облучения от загрязненного грунта при строительстве дома, Зв/год			
От материала верхней части нижнего глиняного экрана			
Cs-137	1,3e-4 (47) / 1,15e-4 (70) / 4,7e-5(140)		1,2e-3 (45) / 1,1e-3 (70) / 4,5e-4 (140)
От материала матрицы отходов (не зависит от приближения)			
Cs-137	4e-3**** (0) / 6e-4 (70) / 1e-4(140)		

6.6. Результаты оценки безопасности хранилища РАО

Согласно данным табл.6.6, в нормальном сценарии эволюции хранилища РАО абсолютные значения доз облучения населения для всех рассмотренных сценариев облучения очень малы и не превышают допустимый предел облучения от отдельного техногенного источника, равный, с учетом квоты 0,1 для отдельного источника, 0,0001 Зв/год. Таким образом, в этом сценарии хранилище РАО удовлетворяет установленным критериям безопасности. Исключения составляют значения доз внешнего облучения от материала матрицы отходов и верхней части нижнего глиняного экрана, загрязненных Cs-137 ($1,7 \cdot 10^{-3}$

* Результаты приведены в последовательности: “Грубое” разбиение / “Полуточное” разбиение 1/ “Полуточное” разбиение 2/ “Точное” разбиение, где:

“Грубое” разбиение: согласно модели, представленной на рис. 6.2.

“Полуточное” разбиение 1: только слой глины представлен 10 частями.

“Полуточное” разбиение 2: только первый водоносный участок (перед колодцем) представлен 10 частями.

“Точное” разбиение: и слой глины и первый водоносный участок представлены 10 частями каждый.

** Читать как $5 \cdot 10^{-14}$.

*** Ниже приведены значения доз облучения для заданных значений времени (приведенных в скобках, лет) после приведения хранилища РАО в окончательную конфигурацию.

**** Жирным шрифтом выделены значения годовых доз облучения населения, превышающие допустимый предел облучения от отдельного техногенного источника, равный, с учетом квоты 0,1 для отдельного источника, 0,0001 Зв/год.

Зв/год через 70 лет после захоронения РАО в хранилище и $5,5 \cdot 10^{-4}$ Зв/год через 140 лет). Однако при оценке безопасности хранилища эти значения должны быть умножены на значения вероятности реализации этих сценариев облучения (меньшие, чем 0,1).

Полученные результаты оценки безопасности хранилища РАО для всех вероятностных воздействий максимальной возможной интенсивности представлены в табл. 6.7. Значение доз облучения при строительстве дома на месте расположения хранилища для всех ВСЭ существенно ниже, чем для сценария нормальной эволюции. Во всех случаях хранилище РАО остается безопасным для населения и окружающей среды. Исключение составляет только сценарий ВСЭ-V, при реализации которого дозы облучения населения за счет потребления питьевой воды из колодца могут незначительно (до 5 раз) в течение ограниченного времени (меньшего, чем период административного контроля места расположения хранилища РАО) превосходить допустимый предел облучения населения. Но этот сценарий может реализоваться только при предельно маловероятном стечении всех возможных неблагоприятных обстоятельств.

Как демонстрируют результаты расчетов, через 200-300 лет доза облучения за счет вдыхания пыли, образованной из материала барьера, на порядок выше, чем от пыли, образованной собственно из матрицы отходов. Поскольку обычно сорбционные свойства изолирующих барьеров выше, чем у матрицы РАО, этот эффект подчеркивает важность корректного учета перераспределения активности со временем между различными частями хранилища РАО.

Таблица 6.7

Максимальные значения годовых доз облучения населения и время после закрытия хранилища, лет, при которых достигаются эти значения, для сценариев эволюции хранилища РАО, рассматривающих воздействия максимальной возможной интенсивности для всех типовых сценариев облучения населения*

Радионуклид	Сценарий эволюции хранилища РАО				
	ВСЭ-I	ВСЭ-II	ВСЭ-III	ВСЭ-IV	ВСЭ-V
Доза облучения за счет потребления рыбы из реки в пищу, Зв/год					
Cs-137	7,5e-20** (460***)	2,0e-18(460)	1,1e-29(460)	2,2e-6 (68)	6,4e-5 (38)
Sr-90	4,5e-18(380)	4,7e-17(380)	1,3e-26(460)	1,7e-7 (26)	5,8e-6 (10)
H-3	1,6e-14(18)	7,4e-13 (8)	1,5e-14 (18)	7,4e-13 (8)	7,4e-13 (8)
Доза облучения за счет потребления питьевой воды из колодца, Зв/год					
Cs-137	1,4e-16(460)	3,4e-15(460)	7,8e-29(460)	1,6e-5 (56)	5,2e-4 **** (26) 1,9e-4 ***** (70)
Sr-90	4,4e-15(380)	4,4e-14(314)	8,7e-26(460)	1,7e-6 (10)	1,5e-4 (5,5) 6,2e-7 ***** (70)
H-3	2,7e-9 (7)	2,2e-7(5.5)	2,5e-9 (8)	2,2e-7 (5.5)	2,2e-7 (5,5) 1,8e-15 ***** (70)

* Все расчеты проведены при "Точном" разбиении компарментов, входящих в основные пути миграции радионуклидов из хранилища РАО в биосферу.

** Читать как $7,5 \cdot 10^{-20}$.

*** В скобках приведены значения времени (годы) после закрытия хранилища.

**** Жирным шрифтом выделены значения годовых доз облучения населения, превышающие допустимый предел облучения от отдельного техногенного источника, равный, с учетом квоты 0,1 для отдельного источника, 0,0001 Зв/год.

***** Значения дозы приведены для времени после закрытия хранилища 70 лет, после которого вероятность облучения населения, согласно этому сценарию, не равна нулю.

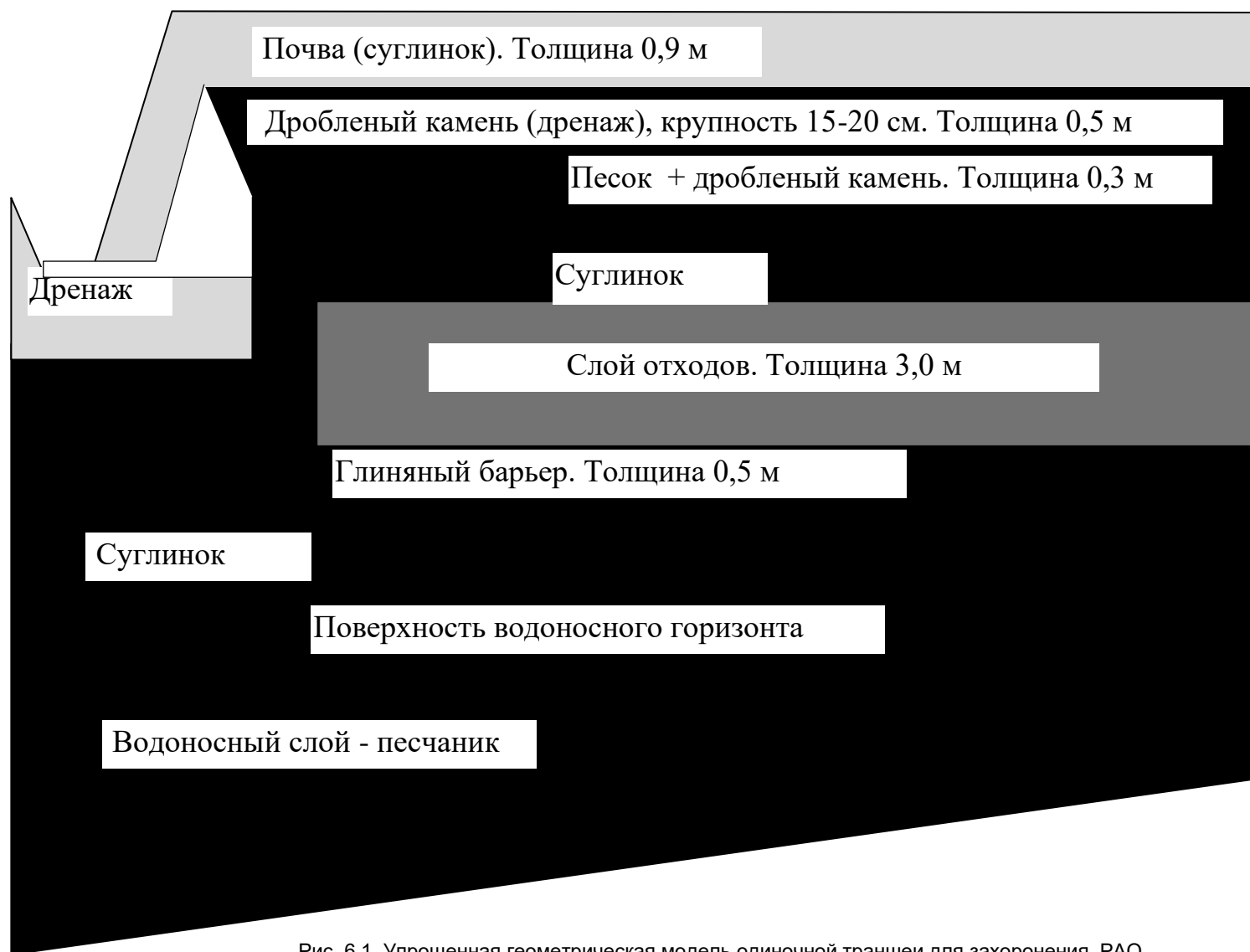


Рис. 6.1. Упрощенная геометрическая модель одиночной траншеи для захоронения РАО

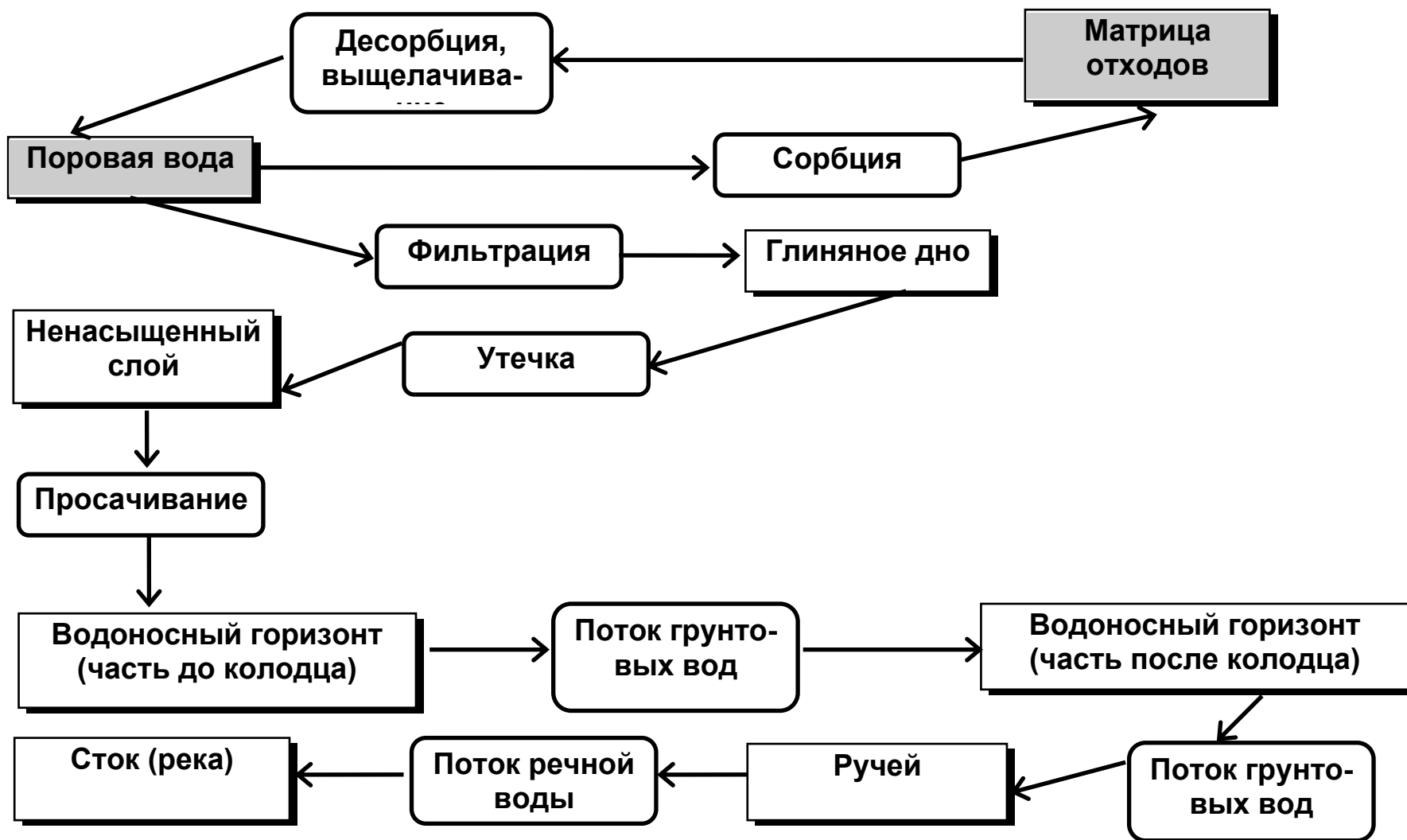


Рис.6.2. Упрощенная камерная модель, описывающая хранилище PAO

Оценка периода времени, для которого необходимо проводить количественное моделирование

Количественная оценка безопасности хранилища РАО является полной, если в нее включены все значимые физико-химические процессы, влияющие на безопасность. Полнота выполненной оценки может быть подтверждена результатами детального анализа соответствующих расчетных данных. Диапазон времени, для которого выполнена количественная оценка безопасности, должен быть достаточен для установления равновесия всех значимых процессов. Эта достаточность должна быть подтверждена демонстрацией равновесия между потоками долгоживущих радионуклидов из хранилища РАО в биосферу и потоками радионуклидов из биосферы в геосферу, а также в глубокие донные отложения больших водоемов, откуда радионуклиды уже не могут “вернуться” в биосферу.

Как правило, для приповерхностных хранилищ РАО установление равновесия всех процессов и реализация всех событий, которые могут повлиять на результаты оценки безопасности хранилищ, происходит за время, заведомо меньшее, чем время, в течение которого полные и удельные активности РАО, элементов хранилищ РАО, несущих и (или) вмещающих их грунтов уменьшатся до значений, при которых возможное радиационное воздействие РАО на человека и окружающую среду не может превзойти установленные нормами и правилами в области использования атомной энергии пределы.

В этот период времени концентрации большинства радионуклидов в биосфере достигают своих максимальных, “пиковых” значений, обусловленных суперпозицией трех физических процессов:

- радиоактивного распада радионуклидов;
- “истощения” источника радионуклидов за счет миграции их из хранилища РАО к биосфере и через нее (или минуя ее) в глубокие донные отложения больших водоемов;
- увеличивающейся за счет деградации инженерных барьеров хранилища РАО скорости выхода радионуклидов из хранилища.

Однако существуют некоторые долгоживущие радионуклиды, такие, как Np-237, являющиеся продуктами распада более короткоживущих радионуклидов (для Np-237 такими короткоживущими радионуклидами являются плутоний-241 и америций-241), полные содержания которых в хранилище РАО медленно возрастают со временем, достигая своих максимальных значений через время порядка тысяч лет. Для таких радионуклидов и радиоактивных продуктов их распада упомянутые выше “пиковые” значения их концентраций в биосфере могут достигаться через время, сравнимое с несколькими тысячами лет, а иногда превышающее 10 тыс. лет. Но поскольку допустимое содержание таких радионуклидов в приповерхностных хранилищах РАО ограничено, эти ожидаемые “пиковые” значения, как правило, будут на несколько порядков меньше, чем те, которые еще подлежат регламентации нормами радиационной безопасности. Поэтому диапазон времени, для которого должна быть выполнена оценка безопасности по отношению к данному конкретному радионуклиду, может быть ограничен значением, при котором концентрации радионуклида в хранилище РАО, в ближней и дальней зонах уменьшаются до незначимых уровней (в соответствии с требованиями нормативных документов).

Список использованной литературы

1. Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste.- Safety Standarts Series № WS-G-1.1.- Vienna, IAEA, 1999.- 31 p.
2. Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories. – IAEA-Techdoc-767, ISSN 1011-4289 October 1994, IAEA, Vienna, 1994.
3. Строганов А.А., Шарафутдинов Р.Б. Отчет “Модели распространения радионуклидов через барьеры”, инв.№ 700-07-14/33-97 и № 700-07-15/32-97 НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 1997.
4. Материалы рабочей группы МАГАТЭ по проекту ISAM “Улучшение методологий оценки безопасности приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов”, Австрия, Вена, 1-5 февраля 1999 г.
5. Savage, D. (editor). The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste, John Wiley & Sons, Chichester, 1995.
6. Строганов А.А., Шарафутдинов Р.Б., Цветков С.В., Лёвин А.Г. Сводный отчет по результатам рассмотрения рабочего проекта пункта захоронения твердых нефтепромысловых отходов, загрязненных радионуклидами на Осинском нефтяном месторождении. ДНП-5-04-98 НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 1997.
7. Avila Moreno R., Jensen M., Sitnikov S.A., Sorlie A., Stroganov A.A., Charafoutdinov R.B., Neretina V.A. Safety Analysis of a Repository for Radioactive Waste from the Oil Industry in the Russian Federation. In Proc. of the Int. Conference “HLW, LLW, Mixed Wastes and Environmental Restoration-Working Towards A Cleaner Environment”, 1-5 March, 1998, Tucson, Arizona, USA.
8. Preparation of Safety Analysis Reports (SARs) for Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities”. - IAEA-TECDOC-789, IAEA, Vienna, 1995.