

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ СРОКОВ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

И. М. Игин, А. В. Минин, М. Ю. Бамборин, Е. В. Кузьмин, Ю. В. Трофимова

ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», Москва

Статья поступила в редакцию 14 июня 2022 г.

В работе рассматриваются технические решения по обеспечению долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) при использовании системы инженерных барьеров безопасности (ИББ). Целью создания ИББ является снижение распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ из ППЗРО в окружающую среду.

Ключевые слова: радиационная безопасность, радиоактивные отходы (РАО), захоронение РАО, ионизирующее излучение, инженерные барьеры, приповерхностное захоронение РАО, бентониты, глины, изолирующий материал, контейнеры с РАО, долговременная безопасность, бетонные сооружения, гидроизолирующий экран.

Разрушение возводимых барьеров безопасности пунктов захоронения РАО происходит преимущественно из-за проникновения поверхностных либо подземных вод к несущим и изолирующим железобетонным, металлическим сооружениям хранилищ и последующего химического взаимодействия с элементами матриц, узлами конструкций, с их преобразованием, вымыванием/разрушением связующих звеньев их материала. Воздействие воды и растворенных в ней солей в течение значимого периода времени (сотни и тысячи лет) приводит к деградации несущих бетонных конструкций стен, опор, днища и кровли, что вызывает потерю ими изолирующих свойств.

Захоронение радиоактивных отходов в российской и международной практиках осуществляется в специально созданных объектах — пунктах

захоронения. В соответствии с терминологией, принятой в Федеральном законе РФ от 11.07.2011 № 190-ФЗ [1], под пунктом приповерхностного захоронения радиоактивных отходов понимается сооружение, размещенное на одном уровне с поверхностью земли или на глубине до ста метров от ее поверхности.

Приповерхностному захоронению подлежат радиоактивные отходы, отнесенные утвержденной Постановлением Правительства от 19.10.2012 № 1069 [3] классификацией к классам 3, 4 и 6.

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии [4] определяют требования к наличию у ППЗРО системы инженерных и естественных (геологических) барьеров безопасности.

ПЗРО структурно состоит из системы ИББ, препятствующих распространению ионизирующего

излучения, ядерных материалов и радиоактивных веществ в окружающую среду, и включает несколько барьеров безопасности (рис. 1).



Рис. 1. Система инженерных барьеров безопасности ППЗРО: 1 барьер – контейнеры с РАО, 2 барьер – буферный материал заполнения пустот в ячейке захоронения на основе природных глин, 3 барьер – бетонные сооружения стен, днища и перекрытий, 4 барьер – подстилающий экран, 5 барьер – покрывающий гидроизолирующий экран, 6 – дополнительный барьер – дренажная система, 7 – дополнительный противодиффузионный барьер, возводится по мере необходимости

Первый барьер (ИББ 1) – это выпускаемые по принятым государственным стандартам контейнеры для захоронения РАО типа НЗК, КМЗ, КРАД, ЖБУ, ЖЗК, бочки металлические, фильтр-контейнеры и их аналоги.

Срок службы железобетонных контейнеров, при котором сохраняется их работоспособность как инженерного барьера (герметичность, механическая прочность) в ППЗРО, составляет не менее 300 лет в условиях захоронения (в соответствии с п. 4.2 ГОСТ Р 51824-2001 «Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов из конструкционных материалов на основе бетона»).

Назначенный срок службы металлических контейнеров с учетом коррозии составляет не менее 30–50 лет (в соответствии с паспортными характеристиками и в зависимости от типа контейнера).

Второй барьер (ИББ 2) – буферный сыпучий материал на основе природных глин, заполняющий свободное пространство в отсеках сооружений и зазоры между контейнерами. Его назначением является обеспечение стабильности отсека захоронения РАО, снижение скорости миграции радионуклидов и ограничение доступа воды к контейнерам с РАО или снижение времени их контакта с водой [4].

Время сохранения барьером изолирующей противодиффузионной функции устанавливается консервативно в течение не менее 300–500 лет.

Противомиграционные свойства сохраняются значительно более длительное время за счет высоких сорбционных емкостей и низких коэффициентов диффузии глин.

Третий барьер (ИББ 3) – бетонные сооружения стен, днища и перекрытий сооружений, которые составляют основу конструкции ППЗРО и в период эксплуатации являются одним из главных элементов устойчивости системы захоронения. Срок их службы определяется в соответствии с СП 63.13330-2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» и ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» и составляет минимум 100 лет. График изменения прочности бетона во времени представлен на рис. 2.

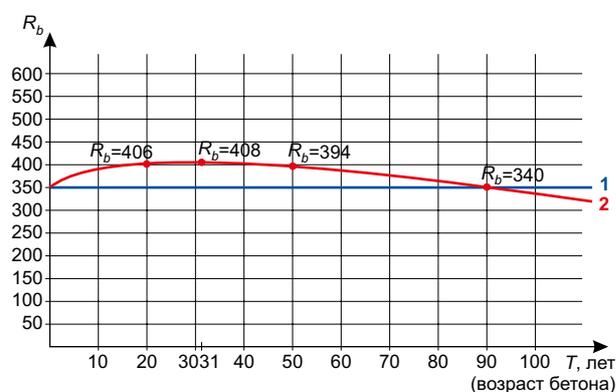


Рис. 2. Прогнозируемая прочность бетона (R_b – прочность на одноосное сжатие): 1 – теоретическая прямая набора прочности бетона в нормальных условиях, 2 – изменение прочности бетона до 100 лет в заданных условиях эксплуатации

Сооружения третьего барьера, изготовленные из бетона, используемого для нужд общегражданского строительства, имеют срок долговременной прочности 100 лет. В системе ИББ он является самым «короткоживущим». Необходимо пересмотреть параметры бетонов для изготовления сооружений третьего барьера, принимая во внимание, что все другие барьеры ППЗРО имеют сроки долговременной безопасности не менее 300 лет.

В целях увеличения этого срока для сооружений третьего барьера возможно применение бетонов для производства контейнеров с РАО (типа НЗК-150-1,5П). При использовании бетона класса В50 (М700, ГОСТ 26633-91), имеющего прочность на сжатие 70 МПа, плотность от 2,45 до 2,65 т/м³ и марку по морозостойкости и водонепроницаемости – не ниже F200 и W12, срок обеспечения долговременной безопасности сооружений третьего барьера продлится до 300 лет [13].

Четвертый барьер (ИББ 4) — подстилающий экран и бентонитовые маты по периметру сооружений ППЗРО (стены, дно, перекрытие), которые предназначены для гидроизоляции объекта, предотвращения вымывания водой, выхода радионуклидов во вмещающие горные породы. Выбор толщины и свойств подстилающего экрана, создаваемого из мятой природной глины, обосновывается на основе расчетов с учетом свойств и состава вмещающей геологической среды.

В дополнение к «глиняному замку» предлагается использование бентонитовых матов, которые способны выполнять изолирующую функцию в течение неограниченного срока эксплуатации при сохранении ими целостности.

Принцип их работы основан на высокой способности бентонита к набуханию при контакте с водой.

Ввиду потенциально возможных внешних и внутренних событий в период после закрытия ППЗРО, консервативно срок сохранения противодиффузионной функции составляет не менее 300–500 лет. Противомиграционные свойства, как и в случае с ИББ 2, сохраняются значительно более длительное время.

Пятый барьер (ИББ 5) — покрывающий многофункциональный гидроизолирующий экран, предназначенный для защиты сооружений ППЗРО от атмосферных осадков, проникновения животных, корней растений и непреднамеренного вторжения человека.

Он наносится сверху на бетонное перекрытие кровли и, как правило, состоит из ряда слоев (снизу вверх):

- гидроизолирующий — препятствует проникновению атмосферных осадков внутрь сооружений;
- дренажный — из гравийно-песчаной смеси для удаления атмосферной влаги с поверхности;
- защитный — из дробленого камня для предотвращения механического разрушения гидроизоляционного слоя в результате проникновения растений, животных и непреднамеренной деятельности человека;
- защитный — из суглинка с почвенно-растительным покровом для поддержания содержания влаги в нижележащих слоях на уровне, необходимом для предотвращения потери глиняным экраном гидроизолирующих свойств за счет высыхания и появления трещин, а также для предохранения нижележающих слоев покрывающего экрана от эрозии.

Проектные сроки выполнения покрывающим гидроизолирующим экраном изолирующей функции составляют 300–500 лет.

Дополнительные инженерные сооружения, которые могут включаться в проект ППЗРО для

повышения устойчивости и продления срока службы основных ИББ, — это дренажные системы и противодиффузионные завесы.

Шестой барьер (ИББ 6), дополнительный, — дренажная система для отведения от ППЗРО поверхностных и подземных вод, которая создается в соответствии с условиями его расположения на местности. Она наиболее эффективна при наличии уклона. Данная система — резервная, возводимая при увеличении притока вод поверхностной инфильтрации, «верховодки» или грунтовых вод (рис. 3).

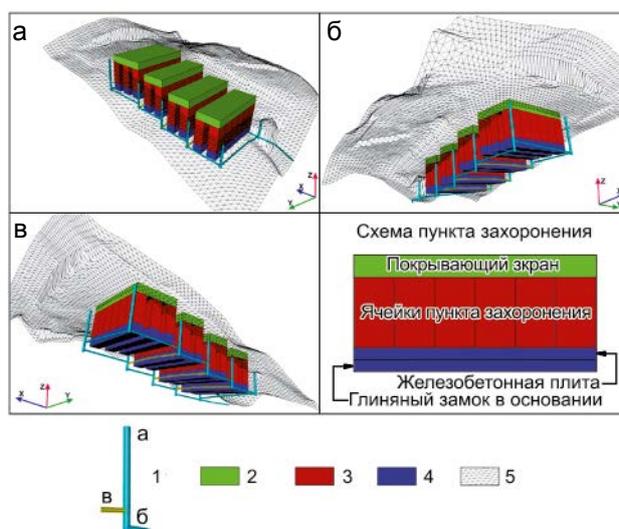


Рис. 3. Пример дренажной системы: 1 — двухконтурный дренаж: колодец (а), дренажные трубы внешнего (б) и внутреннего (в) контуров; 2–4 — пункт захоронения: верхний противодиффузионный экран (2), сооружение (3), железобетонная плита и глиняный замок в основании (4); 5 — поверхность спланированного рельефа

Геологическая среда имеет неоднородности, и в верхней части могут встречаться воды зоны аэрации, прежде всего «верховодки» — локально распространенные и непостоянно существующие скопления гравитационных вод, формирующиеся на пространственно невыдержанных слабопроницаемых грунтах, выше уровня первого водоносного горизонта [5]. Наличие «верховодки» рассматривается как фактор, который может влиять на изолирующие свойства основных барьеров безопасности.

Седьмой барьер (ИББ 7), дополнительный, который может возводиться как при строительстве и эксплуатации, так и вокруг закрытого ППЗРО; рассматривается при изменении климатических условий, увеличении нагрузки на основные барьеры безопасности от «верховодки», подземных вод и предполагает создание шпунтовой и грунтоцементной завес вокруг модульных сооружений (МС) ППЗРО.

В практике их создания распространенными считаются шпунты: срок службы металлических составляет 11–30 лет, композитные имеют значительно больший период эффективной изоляции [11] (рис. 4).

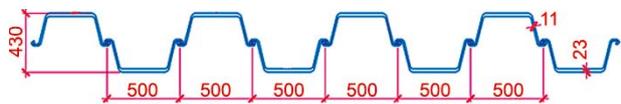


Рис. 4. Конструкция ограждения из шпунтовой завесы

Примеры применяемых шпунтовых завес: полимерный шпунт (ПВХ) типа «Монблан» с закреплением грунта (рис. 4, 5); композитный шпунт по технологии пултрузии (ПКМ) в 2 ряда и укрепления грунта, а также комбинированная: стальной шпунт типа «Ларсен» и закрепление между рядами по технологии высоконапорной струйной цементации Jet-3.



Рис. 5. Шпунтовая завеса из ПВХ (строительство объекта в Сколково)

В соответствии с ГОСТ Р 57365-2016/EN 12063:1999 «Стены шпунтовые» герметизированный замок шпунта описывается величиной, обратной значению сопротивления просачиванию, — коэффициентом фильтрации, равным $5 \cdot 10^{-10}$ м/с.

Перспективным противofильтрационным барьером, обеспечивающим долговременную изоляцию ППЗРО от влияния поверхностных и грунтовых вод, является шпунт на основе полимерных материалов — углеродных композиционных (УКМ) и стеклопластиков. Они практически не подвержены коррозии, разрушению в

агрессивных средах, обладают высокими физико-механическими характеристиками.

Грунтоцементная завеса создается при строительстве по технологии высоконапорной струйной цементации в донной части сооружения бурением до уровня грунтовых вод (рис. 6).

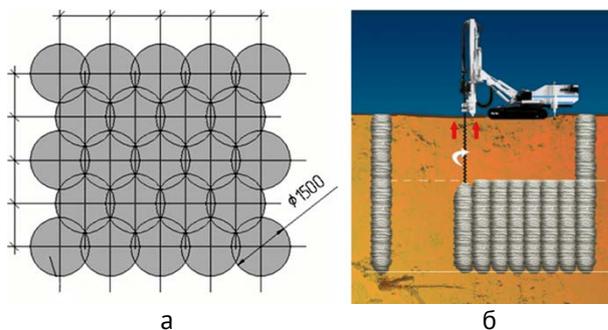


Рис. 6. Грунтоцементная завеса донной части МС: а – вид в плане, б – возведение грунтоцементной завесы

Грунтоцементные завесы:

- сплошная противofильтрационная завеса из грунтоцемента, выполненная по технологии высоконапорной струйной цементации Jet-1;
- стена в грунте траншейного типа из бетона В25, W12, F150.

Предварительная грунтоцементная завеса с шпунтовой завесой УКМ отсрочит время воздействия грунтовых вод на глиняный экран, стены, днище и покрытие сооружений ППЗРО на срок 300–500 лет.

Сценарии взаимодействия системы инженерных барьеров безопасности рассматриваются для выявления опасных сочетаний событий в различных комбинациях.

Первым принимается «упрощенный» сценарий: в контейнерах не имеется материалов, содержащих влагу, биологических веществ, бактерий; бетонные сооружения стен не смачиваются, т. е. нет процессов, потенциально разрушающих ИББ изнутри. Вступление инженерных барьеров «в работу» происходит только от внешних воздействий в последовательности, представленной на рис. 7.

Рассматривается сценарий последовательного выхода из строя ИББ без учета влияния разрушения предыдущих на последующие и внутренних процессов в них. При внешнем воздействии (инфильтрация поверхностных, грунтовых вод) первыми «в работу» вступают покрывающий экран (ИББ 5), дренажные сооружения (ИББ 6) и цемента-грунтовая завеса (ИББ 7). После их разрушения (через 300–500 лет) воды воздействуют на подстилающий глиняный экран вдоль стен и под днищем хранилища (ИББ 4). Затем

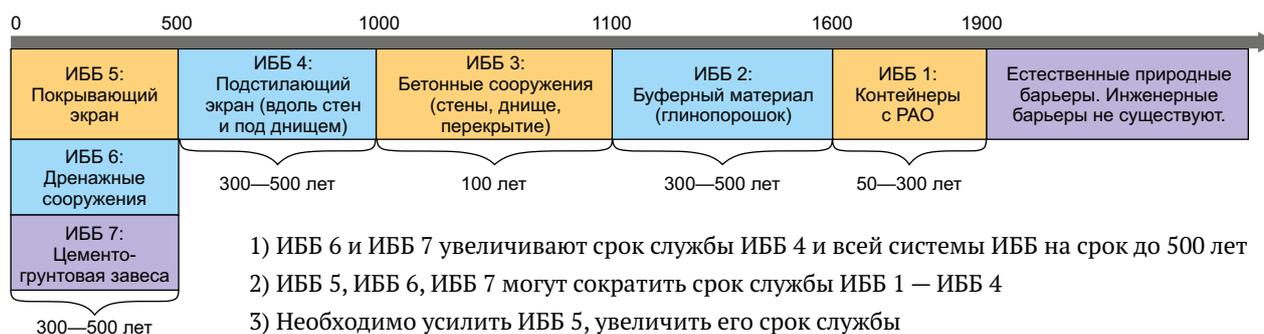


Рис. 7. Диаграмма последовательного «вступления в работу» инженерных барьеров безопасности во времени (разрушение барьеров от воздействий поверхностных и грунтовых вод)

(через 300–500 лет) воды воздействуют на бетонные сооружения — стены, днище, перекрытие кровли (ИББ 3), изготовленные из бетонов общегражданского строительства (консервативный вариант). После их разрушения (через 100 лет) воды воздействуют на сыпучий буферный материал в пространстве между стенками МС и контейнерами, а также в зазорах между контейнерами (ИББ 2). Процессы деградации контейнеров (ИББ 1) вследствие нахождения в них РАО могут происходить из-за внутренних процессов в период до 300 лет после размещения их на захоронение, но перенос радионуклидов из этих контейнеров возможен только после диффузии к ним воды от ИББ 2.

На диаграмме (рис. 7) обозначены последовательно сроки «вступления в работу» ИББ. В данном «упрощенном» сценарии срок эффективной эксплуатации инженерных барьеров ППЗРО по изоляции РАО составляет 1050–1900 лет.

Однако разрушение ИББ 5 в первые 300–500 лет (при интенсивных внешних воздействиях) может вызвать приток инфильтрационных вод к бетонным сооружениям ИББ 3, которые начнут деформироваться на 300–500 лет раньше. Это вызывает сдвиг начала разрушения всех последующих ИББ, а также всего ППЗРО. Бетонные сооружения ИББ 3 выйдут из строя раньше (через 100 лет), чем защищающий их от грунтовых вод подстилающий экран ИББ 4 (через 300–500 лет). Комбинаций может быть несколько. Ниже рассмотрены сценарии (все сочетания совместной «работы» различных ИББ) и выделение из них реальных.

1. Сценарии выхода из строя от внешнего воздействия одного ИББ сразу после закрытия ППЗРО (по диаграмме, рис. 7) и влияние этого события на состояние других барьеров (табл. 1).

В комбинаторике — это число формальных сочетаний из 7 элементов по 2. В соответствии с

Таблица 1. Сценарии выхода из строя одного ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других барьеров

Влияние на ИББ	ИББ 7	ИББ 6	ИББ 5	ИББ 4	ИББ 3	ИББ 2	ИББ 1
ИББ 7	—	Увеличение объема подз. вод. Риски ускор. заиливания	—	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	—	—	—
ИББ 6	Увеличение инфильтрации	—	—	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	—	—	—
ИББ 5	—	Уменьшение объема воды	—	—	Ускоренная деградация	—	—
ИББ 4	—	—	—	—	Ускоренная деградация	—	—
ИББ 3	—	—	Нарушение целостности, просадки	Нарушение целостности вдоль стен	—	Ускоренная деградация	—
ИББ 2	—	—	—	—	—	—	Ускоренная деградация
ИББ 1	—	—	—	—	—	Влияние продуктов корр. (н/р, ЖЗК)	—

формулой $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$ — их всего 21; в табл. 1

вносятся комментарии только реальных сочетаний (12), соответствующих диаграмме (рис. 7), а также ожидаемый результат.

Рассматривается только прямое внешнее влияние, последующая цепочка воздействий на другие ИББ и внутренние процессы в них не анализируются, хотя имеют место. По вертикали — ИББ, вышедшие из строя, по горизонтали — те, на которые это событие оказало влияние, на их пересечении — ожидаемый результат.

В соответствии с табл. 1 при выходе из строя сразу после закрытия ППЗРО:

- цемента-грунтовой завесы (ИББ 7): увеличится приток подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание. Подстилающий глинистый экран будет в зоне «верховодки» (при ее наличии) и инфильтрации поверхностных вод;
- дренажных сооружений (ИББ 6): увеличится инфильтрация вод в цемента-грунтовую завесу, подстилающий глинистый экран будет в зоне «верховодки» (при ее наличии) и инфильтрации поверхностных вод;
- покрывающего экрана (ИББ 5): приток инфильтрационных вод в дренажную систему уменьшится, бетонные сооружения стен, днища и покрытий получают воды инфильтрации, будут в ускоренной деградации и разрушении;

- подстилающего экрана из глины (ИББ 4): повлечет за собой раннее смачивание водой и деградацию всех бетонных сооружений;
- бетонных сооружений стен, днища и перекрытий (ИББ 3): потеряет опору покрывающий экран, нарушится целостность вдоль стен, наступит деградация буферного материала;
- буферного материала (ИББ 2): наступит ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО.

2. Далее последовательно рассматриваются сценарии одновременного выхода из строя двух ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние, которое это событие оказывает на остальные барьеры (табл. 2).

Проводится определение 1-й группы числа сочетаний из 7 двойных элементов по 3 (всего 35) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой, рис. 7).

- В соответствии с табл. 2 при выходе из строя:
- ИББ 7 и ИББ 1: увеличится приток подземных вод в дренажную систему, что может вызвать раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне «верховодки» (при ее наличии) и инфильтрации поверхностных вод;
 - ИББ 6 и ИББ 2: увеличится инфильтрация вод в цемента-грунтовую завесу и через подстилающий глиняный экран, начнутся ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО;
 - ИББ 5 и ИББ 3: произойдет уменьшение притока воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений и буферного материала.

Таблица 2. Сценарии выхода из строя двух ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других барьеров (1-я группа)

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ 7	ИББ 6	ИББ 5	ИББ 4	ИББ 3	ИББ 2	ИББ 1	Выход из строя
ИББ 7	—	Увеличение объема подз. вод. Риски ускор. заиливания	—	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	—	—	—	ИББ 1
ИББ 6	Увеличение инфильтрации	—	—	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	—	—	—	ИББ 2
ИББ 5	—	Уменьшение объема воды	—	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	—	ИББ 3
ИББ 4	—	—	—	—	Ускоренная деградация	—	—	ИББ 4
ИББ 3	—	Уменьшение объема воды	—	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	Ускоренная деградация	—	ИББ 5
ИББ 2	Увеличение инфильтрации	—	—	Ускоренное насыщение водой	—	—	Ускоренная деградация	ИББ 6
ИББ 1	—	—	—	—	—	Влияние продуктов корр. (н/р, ЖЗК)	—	ИББ 7

Таблица 3. Сценарии выхода из строя двух ИББ сразу после закрытия ППЗРО и влияние этого события на состояние других барьеров (2-я группа)

Влияние на ИББ Выход из строя	ИББ 7	ИББ 6	ИББ 5	ИББ 4	ИББ 3	ИББ 2	ИББ 1	Выход из строя
ИББ 7	–	Увеличение объема подз. вод. Риски ускор. заиливания	–	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	–	–	–	ИББ 2
ИББ 6	Увеличение инфильтрации	–	–	Влияние инфильтрационных вод и «верховодки»	–	–	–	ИББ 3
ИББ 5	–	Уменьшение объема воды	–	Нарушение целостности вдоль стен	Ускоренная деградация	–	–	ИББ 4
ИББ 4	–	–	–	–	Ускоренная деградация	–	–	ИББ 5
ИББ 3	–	–	–	Нарушение целостности вдоль стен	–	–	–	ИББ 6
ИББ 2	–	–	–	Ускоренное насыщение водой	Ускоренная деградация	–	–	ИББ 7
ИББ 1	–	–	–	–	–	Влияние продуктов корр. (н/р, ЖЗК)	–	ИББ 1

Далее сочетания ИББ подобны предыдущим.

Проводится определение 2-й группы числа сочетаний из 7 двойных элементов по 3 (всего 35) и выделение реальных (в соответствии с диаграммой на рис. 7 и табл. 3, которая строится путем перестановки правой колонки табл. 2 вверх на один элемент).

В соответствии с табл. 3 при выходе из строя:

- ИББ 7 и ИББ 2 — увеличится объем подземных вод в дренажную систему, что вызовет раннее заиливание, подстилающий глинистый экран будет в зоне «верховодки» и инфильтрации поверхностных вод, произойдут ускоренная деградация и разрушение контейнеров с РАО,
- ИББ 6 и ИББ 3 — увеличится инфильтрация вод в цементно-грунтовую завесу и подстилающий глиняный экран, потеряет опору покрывающий экран, нарушится целостность вдоль стен,
- ИББ 5 и ИББ 4 — произойдут уменьшение поступления воды в дренажные сооружения, нарушение целостности стен, ускоренная деградация бетонных сооружений.

Далее сочетания ИББ подобны предыдущим.

Аналогично табл. 2 и 3 строятся следующие таблицы с перестановкой событий в правой колонке вверх на один элемент. Общее число групп сочетаний из 7 двойных элементов по 3 равно 7 (7 таблиц), из них соответствующих диаграмме на рис. 7 — 21 сочетание.

Следующий этап — анализ числа групп сочетаний из 7 тройных элементов по 4. При этом в табл. 2 добавляется правая колонка со сдвигом на одно событие вверх (например, ИББ 7, ИББ 1

и ИББ 2 — 1-я группа). Рассмотрение вариантов сочетаний продолжается с перебором групп.

Анализ сценариев выхода из строя ИББ в различных комбинациях и сочетаниях показал, что наиболее опасным, при котором в разрушение вовлекается наибольшее число барьеров (ИББ 5 и ИББ 3), является выход из строя покрывающего экрана и бетонных сооружений (стены, днище, перекрытия кровли), поэтому при решении вопроса об увеличении сроков долговременной безопасности ППЗРО необходимо решать проблемы увеличения сроков их эксплуатации.

3. Рассматривается сценарий с учетом внутренних процессов разрушения в контейнерах с РАО (ИББ 1), вызванных наличием влаги, биологических веществ и бактерий (рис. 8).

Ранний выход из строя ИББ 1 (через 50 лет) является внутренним процессом и влияет на последовательность этапов разрушения изнутри ИББ 2, буферный материал которого (глиняная или бентонитовая засыпка) будет поврежден через 300–500 лет. Влияние внешних факторов на ИББ 5 и ИББ 3 начнется через 400–600 лет. В принятой схеме последовательности выхода из строя барьеров безопасности разрушение внутри контейнеров ИББ 1 и буферного материала ИББ 2 создают условия для раннего доступа процесса внешнего воздействия к радионуклидам и начала их выноса за пределы ППЗРО на 300–500 лет раньше.

Аналогично рассматриваются во временной последовательности сценарии с ранним выходом

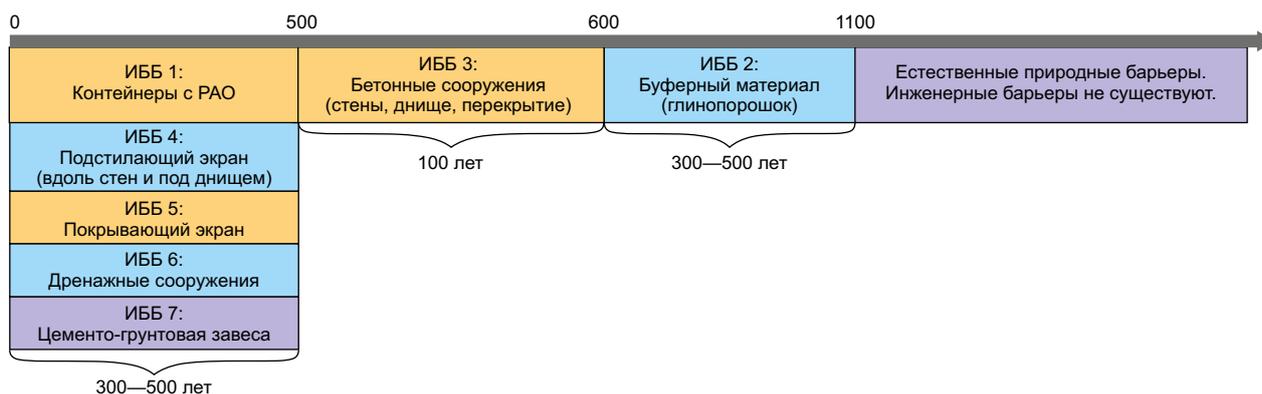


Рис. 8. Сценарий с учетом внутренних процессов разрушения, вызванных наличием влаги, биологических веществ и бактерий в контейнерах с РАО (ИББ 1)

из строя других ИББ из-за различных воздействий: влияния поровых, поверхностных и грунтовых вод и др. в получаемых комбинациях барьеров.

4. Наиболее консервативный сценарий: «в работу» вступают все ИББ сразу после заполнения ППЗРО контейнерами с РАО (закрытия ППЗРО) (рис. 9).

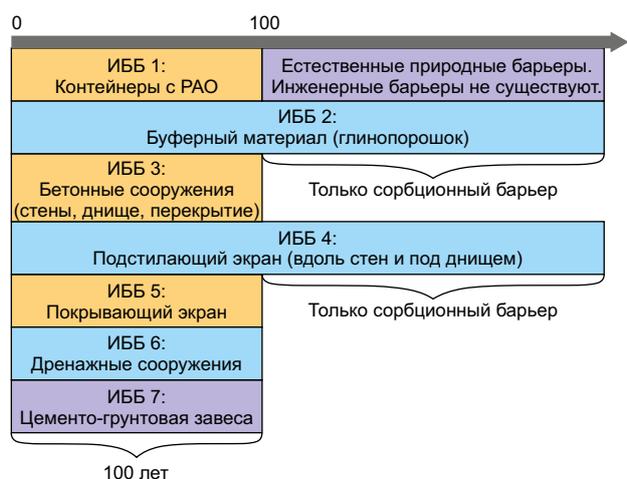


Рис. 9. Диаграмма одновременного «вступления в работу» инженерных барьеров безопасности во времени. Наиболее консервативный сценарий

Инженерные барьеры ИББ 3, состоящие из бетона и металлических конструкций, эффективно противостоят деградации в течение 100 лет, затем начинают разрушаться. Стены и перекрытия являлись опорой для ИББ 5 — покрывающего экрана, который из-за этого начнет утрачивать целостность ранее проектного срока.

Наибольшей устойчивостью к воздействию грунтовых вод обладают инженерные барьеры ИББ 4 и ИББ 2, обеспечивающие изоляцию ППЗРО за счет противодиффузионных и противомиграционных свойств глины и бентонита. Благодаря им в данном сценарии срок

эффективной изоляции контейнеров с РАО составляет 300—500 лет.

Из рис. 9 видно, что даже при консервативном сценарии переход на высокопрочные бетонные сооружения ИББ 3, дренаж ИББ 6 и грунтоцементная завеса ИББ 7 гарантируют долгосрочную изоляцию РАО минимум на 300 лет, барьеры на основе природных глин способны обеспечить безопасность ППЗРО на срок до 500 лет.

Это важно учитывать при расчете уровней активности радионуклидов, вышедших из ППЗРО во внешнюю среду. За дополнительные 500 лет уровень их опасности снизится благодаря процессу радиоактивного распада.

Заключение

В работе рассмотрена система инженерных барьеров безопасности и ее функционирование в структуре пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов. В настоящее время изоляция РАО в ППЗРО, в соответствии с требованиями НП-055-14, обеспечивается ИББ, которые состоят из:

- 1) металлических или железобетонных контейнеров, обеспечивающих удержание РАО на период сроком не менее 30—50 лет и до 300 лет соответственно;
- 2) буферного материала на основе природных глин, заполняющего пространство в отсеках сооружений и между контейнерами; время сохранения изолирующих функций — в течение не менее 300—500 лет;
- 3) бетонных сооружений стен, нижнего и верхнего перекрытий ППЗРО, возведенных в соответствии с принятыми ГОСТами; срок службы бетонных конструкций — 100 лет;
- 4) глиняного экрана и бентонитовых матов по периметру (стены, дно) сооружений ППЗРО; срок службы барьера — в течение не менее 300—500 лет;

5) покрывающего гидроизолирующего экрана, состоящего из (снизу вверх): глинистого гидроизолирующего экрана, дренажного слоя из гравийно-песчаной смеси, защитного слоя из дробленого камня, защитного слоя из суглинка и почвенно-растительного слоя. Покрывающий гидроизолирующий экран ППЗРО сохраняет назначенные свойства в течение как минимум 300—500 лет.

Для увеличения срока долговременной безопасности ППЗРО могут быть включены дополнительные инженерные барьеры:

б) дренажная система — инженерное сооружение для отведения от ППЗРО поверхностных и подземных вод, создается в соответствии с условиями расположения ППЗРО на местности, с учетом инфильтрации атмосферных осадков, и уровнем «верховодки»;

7) шпунтовая и цементно-грунтовая завесы вокруг модульных сооружений ППЗРО, возводимые как при строительстве, эксплуатации, так и вокруг закрытого ППЗРО (резервная).

Для увеличения срока долговременной безопасности сооружений третьего барьера следует перейти на применение бетонов, используемых для производства контейнеров с РАО (типа НЗК-150-1,5П). При использовании бетона класса В50 (М700, ГОСТ 26633-91), имеющего прочность на сжатие 70 МПа, плотность от 2,45 до 2,65 т/м³ и марку по морозостойкости и водонепроницаемости — не ниже F200 и W12, срок службы сооружений ИББ 3 продлится до 300 лет. Все другие барьеры безопасности ППЗРО имеют сроки долговременной безопасности не менее 300 лет.

С использованием метода комбинаторики выявлены наиболее опасные прогнозные сценарии разрушения максимального числа инженерных барьеров безопасности: это ИББ 3 и ИББ 5, т. е. выход из строя бетонных сооружений (стены, днище, перекрытия кровли) и покрывающего экрана. Для увеличения сроков долговременной безопасности ППЗРО требуется решать вопросы повышения периода эксплуатации ИББ 3 и ИББ 5; этот вывод подтверждает необходимость перехода ИББ 3 на высокопрочные бетоны. В принятой схеме последовательности выхода из строя барьеров безопасности разрушение внутри контейнеров ИББ 1 и буферного материала ИББ 2 создают условия для преждевременного доступа процесса внешнего воздействия к радионуклидам и начала их выноса за пределы ППЗРО раньше на 300—500 лет.

Система инженерных барьеров безопасности обеспечивает надежную долговременную изоляцию, предотвращение распространения

ионизирующего излучения и радиоактивных веществ из ППЗРО в окружающую среду.

Литература

1. Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

2. НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности».

3. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».

4. НП-069-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности».

5. *Всеволожский В. А.* Основы гидрогеологии: Учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГУ, 2007. 448 с.

6. *Brownsword M., Buchan, A., Ewart, F. et al.* The Solubility and Sorption of Uranium (VI) in a Cementitious Repository // MRS Proceedings. 1989. Vol. 176. P. 577. DOI: 10.1557/PROC-176-577. Published online by Cambridge University Press: 21 February 2011.

7. *McKinley I. G., Scholtis A.* Compilation and Comparison of Radionuclide Sorption Databases Used in Recent Performance Assessments. In Proc. of NEA Workshop on Radionuclides from the Safety Evaluation Perspective, 16—18 October 1991. Interlaken, Switzerland, 1991.

8. Bentizol. — URL: www.geotex.ru (дата обращения 19.05.2022).

9. *Шестаков В. М.* Гидрогеодинамика. — М.: КДУ, 2009. 334 с.

10. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В. и др.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. — М.: Комтехпринт, 2015. 208 с.

11. *Чертес К. Л., Тупицына О. В., Пыстин В. Н. и др.* Геоинженерная защита территорий, нарушенных объектами накопленного экологического вреда // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 4. С. 10—15.

12. *Гатауллин Р. М., Давиденко Н. Н., Свиридов Н. В. и др.* Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. — М.: Логос, 2012. 256 с.

Информация об авторах

Игин Игорь Михайлович, генеральный директор, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: IMIgin@noraо.ru.

Минин Андрей Васильевич, заместитель генерального директора по лицензированию и разрешительной деятельности, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: AVMinin@noraо.ru.

Бамборин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, директор департамента лицензирования и разрешительной деятельности ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: MYBamborin@noraо.ru.

Кузьмин Евгений Викторович, профессор, доктор технических наук, главный специалист, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: EVKuzmin@noraо.ru.

Трофимова Юлия Васильевна, эксперт, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр. 2), e-mail: YVTrofimova@noraо.ru.

Библиографическое описание статьи

Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Кузьмин Е. В., Трофимова Ю. В. Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 50–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.

FORECASTED TIMEFRAMES FOR THE LONG-TERM SAFETY OF NEAR-SURFACE DISPOSAL FACILITIES FOR RADIOACTIVE WASTE CALCULATED CONSIDERING VARIOUS SCENARIOS OF THEIR OPERATION

Igin I. M., Minin A. V., Bamborin M. Yu., Kuzmin E. V., Trofimova Iu. V.

National Operator for Radioactive Waste management FSUE, Moscow, Russia

Article received on June 14, 2022

The paper considers technical solutions providing the long-term safety of near-surface disposal facilities for radioactive waste (NSDF) based on a engineered barrier system s (EBS). The system of isolating engineered barriers provides the long-term safety and reduces the spread of ionizing radiation and radioactive material from NSDF into the environment.

Keywords: *radiation safety, radioactive waste disposal, radioactive waste, ionizing radiation, engineered barriers, near-surface radioactive waste disposal, bentonite mats, clays, insulating material, radioactive waste containers, long-term safety, concrete structures, waterproofing screen.*

References

1. Federal Law of July 11, 2011 No. 190-FZ *Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami i o vnesenii izmenenii v drugie zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii* [On Radioactive Waste Management and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation].

2. NP-055-14. *Zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov, printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Disposal of Radioactive Waste. Principles, Criteria and Basic Safety Requirements].

3. Decree of the Government of the Russian Federation No. 1069 of October 19, 2012 *O kriteriyakh ot-neseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov*

k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyaemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyaemykh radioaktivnykh otkhodov. [On Criteria Used to Categorize Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, Criteria Used to Categorize Radioactive Waste as Non-removable Radioactive Waste and Removable Radioactive Waste and Classification Criteria for Removable Radioactive Waste].

4. NP-069-14. *Pripoverkhnostnoe zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov, trebovaniya bezopasnosti* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Near-surface disposal of radioactive waste. Safety requirements].

5. Vsevolozhskiy V. A. *Osnovy gidrogeologii* [Fundamentals of hydrogeology]. Moscow, MSU Publ., 2007. 448 p.

6. Brownsword M., Buchan, A., Ewart, F. et al. The Solubility and Sorption of Uranium (VI) in a Cementitious Repository. *MRS Proceedings*, 1989, vol. 176, p. 577. DOI: 10.1557/PROC-176-577. Published online by Cambridge University Press: 21 February 2011.

7. McKinley I. G., Scholtis A. Compilation and Comparison of Radionuclide Sorption Databases Used in

Recent Performance Assessments. *In Proc. of NEA Workshop on Radionuclides from the Safety Evaluation Perspective*, 16–18 October 1991. Interlaken, Switzerland, 1991.

8. Bentizol. — URL: www.geotex.ru (accessed on 19.05.2022).

9. Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2009, 334 p.

10. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kaprin I. V. et al. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [Overview of International Spent Fuel and RW Disposal Practices]. Moscow, Komtekhpriint Publ., 2015. 208 p.

11. Chertes K. L., Tupitsyna O. V., Pystin V. N. et al. Geoinzhenernaya zashchita territoriy, narushennykh obyektami nakoplennoy ekologicheskoy vreda [Geoengineering protection of territories disturbed by objects with accumulated environmental damage]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii — Ecology and Industry in Russia*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 10–15.

12. Gataullin R. M., Davidenko N. N., Sviridov N. V. et al. *Konteynery dlya radioaktivnykh otkhodov nizkogo i srednego urovnya aktivnosti* [Containers for Low- and Intermediate-level Waste]. Moscow, Logos Publ., 2012. 256 p.

Information about the authors

Igin Igor Mikhailovich, General Director, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: IMigin@norao.ru.

Minin Andrey Vasilievich, Deputy General Director for Licensing and Permitting Activities, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: AVMinin@norao.ru.

Bamborin Mikhail Yurievich, PhD, Director of the Licensing and Permitting Activities Department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: MYBamborin@norao.ru.

Kuzmin Evgeny Viktorovich, Doctor of Science, professor, Chief Specialist, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: EVKuzmin@norao.ru.

Trofimova Iuliya Vasilievna, expert, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: YVTrofimova@norao.ru.

Bibliographic description

Igin I. M., Minin A. V., Bamborin M. Yu., Kuzmin E. V., Trofimova Iu. V. Forecasted timeframes for the long-term safety of near-surface disposal facilities for radioactive waste calculated considering various scenarios of their operation. *Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), pp. 50–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60. (In Russian).