

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ В КОНЦЕПЦИИ ПГЗРО С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАЗМЕЩЕНИЕМ УПАКОВОК С РАО В КОНТЕЙНЕРАХ С МЕДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

С. А. Богатов¹, Н. И. Дробышевский¹, В. В. Крупская^{2, 3}, С. В. Закусин^{2, 3}, В. А. Лехов³

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва,

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2022 г.

Рассматривается концепция ПГЗРО с размещением тепловыделяющих радиоактивных отходов в относительно тонких стальных контейнерах с медным покрытием в упаковке из блоков компактированного бентонита в горизонтальных выработках. Предполагается, что данная планировка должна обеспечить безопасное захоронение исторических РАО класса 1, обладающих относительно небольшой активностью и тепловыделением. Предлагаемая концепция предъявляет соответствующие требования к бентонитовому буферу, из которых в работе количественно рассмотрены толщина, определяемая остаточным тепловыделением РАО, минимальная плотность в сухом состоянии, а также содержание и тип монтмориллонита. Для дальнейших оценок предлагается исследовать бентонитовые блоки компактированного бентонита российских месторождений с преобладающим содержанием натриевого монтмориллонита минимально необходимой сухой плотности. Заполнение зазоров между упаковками РАО из компактированного бентонита и выработками рекомендуется заполнять пеллетами с максимально достижимой сухой плотностью из бентонита с преобладающим содержанием кальциевого монтмориллонита.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, глинистые материалы, объекты ядерного наследия, изоляция РАО, инженерные барьеры.

Введение

В настоящее время проводятся научные исследования по возможности сооружения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) и альтернативным концепциям утилизации радиоактивных отходов (РАО) классов 1 и 2 в массиве кристаллических пород на участке «Енисейский» (Красноярский край) [1] в соответствии с принятой стратегией [2]. Допустимые корректировки утвержденных ранее проектных решений [3] рассматриваются в

разных направлениях (см., например, [4]–[7]). Настоящая работа также посвящена рассмотрению возможных решений и требуемых свойств материалов для инженерных барьеров в так называемой «горизонтальной» концепции, когда захоронение контейнеров с РАО класса 1 (РАО-1) осуществляется в горизонтальных выработках в несколько ярусов в буфере из блоков компактированного бентонита (КБ). Наибольшее развитие данная практика получила в Канаде при

захоронении отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реакторов CANDU (рис. 1 [8]), но также обсуждается и в России [6], [7].

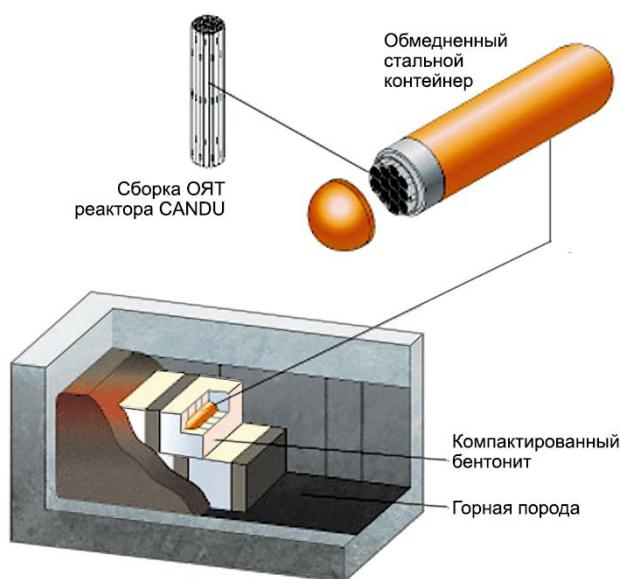


Рис. 1. Концепция размещения ОЯТ реакторов CANDU в горизонтальных выработках [8]

В пользу применения данной концепции для российского ПГЗРО говорят перечисленные дальше обстоятельства. Во-первых, последние оценки активности и тепловыделения «исторических» остеклованных высокоактивных отходов (ОВАО), накопленных на ФГУП «ПО «Маяк» [9], оказались значительно ниже, чем предполагались при проектировании ПГЗРО на участке «Енисейский» Красноярского края [3]. Во-вторых, в настоящее время достигнуты значительные успехи в технологии нанесения защитных медных покрытий на стальные контейнеры для захоронения [10], и она осваивается в России [11]. Данные обстоятельства позволяют рассматривать в качестве альтернативы имеющимся проектным решениям по конструкции упаковки для РАО более легкие контейнеры, существенно упрощающие обращение с ними при транспортировке и размещении в ПГЗРО. Например, относительно легкий контейнер и сравнительно небольшая активность упаковки с РАО могут позволить применение вилочного погрузчика с радиационной защитой оператора или существенно снизить требования к ней, а также массогабаритным и грузоподъемным характеристикам дистанционно управляемых средств перемещения упаковок, укладки буферного материала и обратной засыпки выработок ПГЗРО. Последнее обстоятельство позволяет рассматривать в качестве возможной альтернативы скважинной горизонтальную концепцию,

дающую возможность использовать для размещения РАО в ПГЗРО только горизонтальные выработки. Так, в предполагаемой проектом планировке ПГЗРО на участке «Енисейский» — захоронение проводится в 54 горизонтальных выработках, расположенных в два яруса на площади примерно 300×700 м, — для «исторических» РАО-1, требующих первоочередного захоронения, предусмотрено всего 14.

Цель данной работы — рассмотреть возможность реализации данной концепции применительно к ПГЗРО на участке «Енисейский» и наметить направления дальнейшей оптимизации проектных решений для инженерных барьеров безопасности.

1. Контейнер и конструктивные решения

1.1. Толщина оболочки

Первичной упаковкой ОВАО на ФГУП «ПО «Маяк», подлежащих первоочередному захоронению в ПГЗРО, служат открытые бидоны из углеродистой стали толщиной 4 мм с внешним диаметром 0,575 м и емкостью 0,2 м³. Их габаритная высота составляет 1 м. Бидоны при хранении размещаются по 3 шт. в стальные пеналы [12].

В [13] приведены требования к упаковке с РАО-1 для размещения в ПГЗРО, в соответствии с которыми оболочка контейнера должна обеспечивать механическую прочность при сжатии не менее 10 МПа и сохранение ее изолирующей способности на срок не менее 1000 лет. Подходы к определению толщины оболочки стального контейнера для захоронения рассматриваемых РАО-1 в буфере из КБ приведены в работе [14], из которой следует, что для обеспечения прочности при изостатической нагрузке 10 МПа толщина обечайки контейнера из углеродистой стали (без учета запаса на коррозию) должна составлять не менее 27 мм, толщина плоской крышки — не менее 70 мм.

Разрушение медного покрытия на стальном контейнере обусловлено рядом факторов, среди которых определяющими являются концентрация сульфидов в составе подземных вод, жизнедеятельность сульфатредуцирующих бактерий, параметры бентонитового буфера, мощность дозы на поверхности и т. п. На данном этапе работы полноценный анализ всех факторов, определяющих коррозию медного покрытия в условиях ПГЗРО участка «Енисейский», невозможен, но последние результаты выглядят оптимистично. Так, например, для условий канадского скального массива, при максимально консервативных оценках, коррозия медного покрытия за

миллион лет не превысит 1,2 мм, а при реалистичных значениях параметров составит примерно 270 мкм [15].

Исходя из вышеизложенного, для дальнейших оценок принято, что контейнер для размещения бидонов с ОВАО должен иметь толщину стенок 5 см, из которых верхние 5 мм составляет медное покрытие¹. Получающийся при этом диаметр контейнера — 70 см — в принципе, позволяет использовать существующую инфраструктуру обращения с упаковками непосредственно на площадке ФГУП «ПО «Маяк» [16].

При выборе толщины контейнера надо также учитывать, что он должен выдерживать асимметричные нагрузки набухающего бентонита и иметь достаточную жесткость для сохранения целостности при сдвиговых нагрузках, вызванных смещениями горных пород при сейсмических воздействиях (см. раздел 2.2. «Максимальная плотность в сухом состоянии блоков компактированного бентонита»). Количественные оценки данных процессов — предмет будущих работ.

1.2. Дистанционирование контейнеров по критериям тепловыделения

Первым из критериев, определяющих планировку ПГЗРО в горизонтальной концепции, рассматривалась температура бентонита, контактирующего с контейнером. При этом считалось, что ее максимальное значение не должно превышать² 100 °С. Учитывалось ожидаемое тепловыделение РАО-1 на момент захоронения [9], характерные значения теплопроводности и теплоемкости неводонасыщенного бентонита принимались равными 0,96 Вт/(м·К) и 1150 Дж/(кг·К) соответственно. Планировка размещения контейнеров представлена на рис. 1. Консервативные (не учитывающие динамику размещения упаковок и насыщение бентонита водой) оценки расстояния между осями соседних контейнеров, содержащих по три бидона с ОВАО, составили³ примерно 1,5 м, при

¹ В канадской концепции считается достаточной толщина медного покрытия стального контейнера в 3 мм Cu [8]. Она также выбрана из требования не превышения мощности дозы на его поверхности 1 Гр/ч [14].

² Данный критерий, взятый по аналогии с зарубежными концепциями, весьма консервативен и, возможно, может быть повышен на 10–20 °С без ущерба для безопасности ПГЗРО.

³ Указанные расстояния между осями контейнеров получены в предположении того, что минимальная толщина буфера должна составлять 40 см, а расстояние между осями соседних выработок — примерно 15 м. Пояснения к выбору данных параметров будут приведены ниже, но, как и многие другие, они взяты для предварительных оценок и должны стать предметом дальнейшей оптимизации.

двух — около 1 м. С учетом того, что перед размещением контейнеры с ОВАО упаковываются на площадке ПЗРО в слой блоков различной формы из КБ, при принятых допущениях планируемые габариты и вес получившихся упаковок составят примерно 1,5 × 1,5 × 4,5 м и 22 т при трех бидонах в контейнере и 1,5 × 1,5 × 3,5 м и около 18 т — при двух. Иллюстрация концепции размещения упаковок с ОВАО при двух бидонах в контейнере приведена на рис. 2.

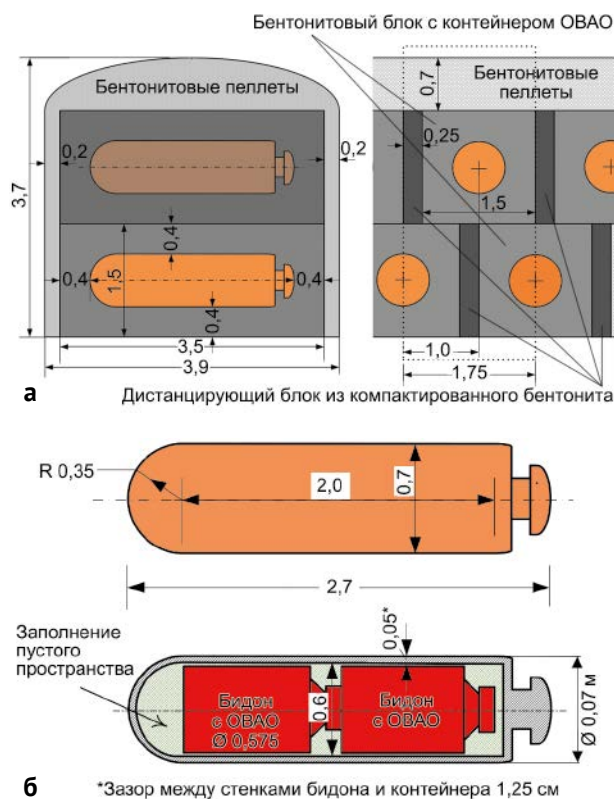


Рис. 2. Иллюстрация предлагаемого размещения упаковок с РАО-1 в горизонтальной концепции: а) поперечное и продольное сечение выработки; б) контейнер с бидонами ОВАО (размеры в метрах)

1.3. Обращение с упаковками РАО в ПГЗРО

В пользу решения о контейнере на два бидона в упаковках свидетельствует возможность их перемещения серийным вилочным погрузчиком, например дизельным погрузчиком TCM FD230-2 грузоподъемностью 23 т и с габаритами Д × Ш × В = 7990 × 3060 × 3580 [17]. Его вместимость позволяет обеспечить монтаж на нем радиационной защиты оператора. По предварительной оценке по программе MicroShield v.9.05, при защите из 15 см «тяжелого» (с высоким содержанием свинца) стекла между упаковкой и оператором погрузчика, мощность дозы на рабочем месте последнего

составит около 13 мкЗв/ч, что примерно соответствует норме ОСПОРБ-99/2010 [18] для помещений временного пребывания персонала группы А (12 мкЗв/ч при работе 850 часов в год).

Оценки радиационных характеристик упаковок носят предварительный характер, не учитывают увеличения мощности дозы для оператора при приближении к штабелю уже размещенных упаковок в выработке и должны быть уточнены на следующих этапах работы. При невозможности обеспечения радиационной безопасности на рабочем месте оператора применяются дистанционные грузоподъемные устройства, и контейнеры перемещаются в БКБ в дополнительных упаковках, как, например, предусмотрено в [8].

2. Буфер из блоков компактированного бентонита для контейнера с РАО-1

В качестве основных функций безопасности (ФБ) буфера⁴ из КБ в кристаллических породах можно рассматривать [19]:

- защиту упаковки РАО от воздействия опасных событий и процессов (в том числе гидравлических, механических, химических и микробиологических), которые могут поставить под угрозу ее ФБ — локализацию (конфайнмент) радиоактивных веществ;
- ограничение и замедление миграции радионуклидов в случае нарушения целостности упаковки с РАО;
- создание и поддержание заданных для упаковки с РАО благоприятных механических, геохимических и гидрогеологических условий.

В свою очередь, базовые ФБ лежат в основе многоуровневой системы требований и количественных индикаторов безопасности, которые должны разрабатываться в проекте ПГЗРО. Создание полной системы — предмет будущих работ, в данной статье рассматриваются лишь некоторые, позволяющие оценить параметры буфера для предварительных оценок безопасности горизонтальной концепции ПГЗРО, а именно — его состав и плотность.

На определение минимальной плотности бентонита и связанных с ней давления набухания и водопроницаемость влияет ряд факторов. Основными из них являются: механическая прочность при обращении с КБ в ПГЗРО, компенсация размыва буфера в процессе насыщения, предотвращение проседания и смещения контейнеров с РАО, недопустимость миграции

радионуклидов в форме коллоидов, подавление жизнедеятельности микроорганизмов и миграции извне химических соединений, способных существенно ускорить коррозию контейнера. Максимальная плотность бентонита определяется компромиссом между его барьерными свойствами, прочностью контейнера к механическим нагрузкам, связанным с давлением набухающего бентонита (P_s), и минимально необходимой пластичностью для предотвращения разгерметизации контейнера при нагрузках, которые могут возникнуть при смещении блоков горных пород (ГП).

Для дальнейших иллюстративных оценок примем, что барьерные свойства бентонитов определяются сухой плотностью (плотностью скелета) содержащегося в них монтмориллонита, который по характеру преобладающих обменных катионов (Са или Na) будем называть Са-монтмориллонитом и Na-монтмориллонитом (Са-ММ и Na-ММ). Давление набухания КБ может быть определено посредством измерения в ячейках фиксированного объема, как это приведено в работе [22]. В качестве кандидатов в барьерные материалы ПГЗРО рассмотрим бентонит месторождений 10-й Хутор, республика Хакасия (10Х), и Таганское, республика Казахстан (Т). Оба бентонита содержат примерно 70 % монтмориллонита (ММ), причем в 10Х преобладает Са-ММ, а в Т — Na-ММ. В первом приближении можно считать, что плотность в сухом состоянии ММ и иных компонентов бентонита совпадают. На рис. 3 приведены результаты

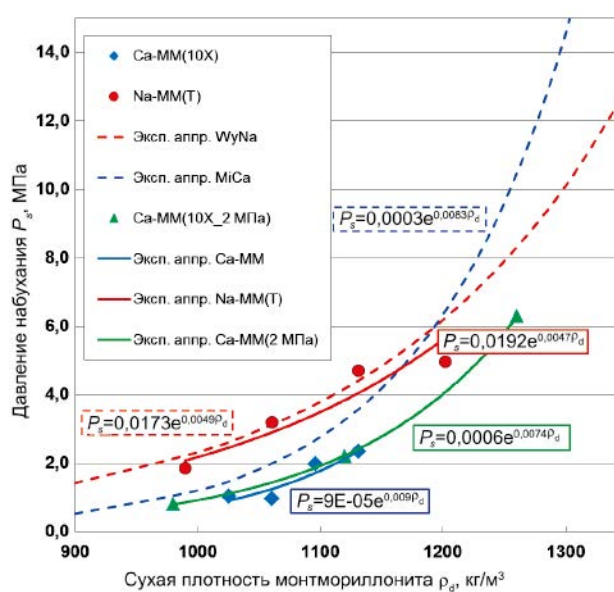


Рис. 3. Экспериментальные результаты определения давления набухания и их аппроксимация в зависимости от сухой плотности монтмориллонита (содержание воды близко к ожидаемому для участка «Енисейский»)

⁴ Буфер — инженерный барьер, окружающий контейнер с РАО и заполняющий пустое пространство между контейнером и горной породой.

измерений давления набухания и их экспоненциальная аппроксимация от сухой плотности ММ, полученная для бентонитов 10X и Т и модельной подземной воды для участка «Енисейский», а также для солесодержания воды 0,1 М по NaCl — из работ [20] и [21].

По графикам можно судить о точности принятых допущений. Следует отметить, что аппроксимации из [21] получены по большему числу точек, в более широком диапазоне плотностей и имеют большую достоверность.

Смысл использования сухой плотности ММ состоит в том, чтобы попытаться экстраполировать результаты аналогичных исследований на неизвестные параметры российских бентонитов. Далее будут рассмотрены бентониты 10X, Т и смесь 10X с каолиновой глиной КК в соотношении по весу 30 : 70 (вес.) — Б30КК70.

2.1. Минимальная плотность в сухом состоянии для блоков компактированного бентонита и пеллет заполнения зазоров

2.1.1. Давление набухания

Выбор минимального давления набухания бентонита достаточно прост: в первую очередь оно и связанные с ним иные характеристики бентонита должны обеспечивать преобладание диффузионного механизма переноса загрязнителя над адвективным, компенсировать размыв буфера на стадии его насыщения, препятствовать жизнедеятельности микробов и переносу через буфер коллоидов.

Последние два требования (с запасом на консерватизм) обеспечиваются при давлении набухания более 2 МПа (см., например, [23]–[25]), что соответствует плотностям ММ в сухом состоянии 1...1,1 г/см³ (рис. 3). Однако необходимо учитывать заполнение зазоров между КБ и стенками выработки пеллетами, имеющими существенно более низкую объемную насыпную плотность слоя по сравнению с КБ. Какая максимальная (насыпная) плотность в сухом состоянии пеллет будет достигнута, определится пока отсутствующей технологией заполнения ими пустотного пространства. На данной стадии иллюстративных оценок примем насыпную плотность слоя пеллет, равной 1,2 г/см³ (или $\rho_{\text{ММ-П}} = 1,2 \cdot 0,7 = 0,84$ г/см³ по ММ для бентонитов типа 10X и Т). С учетом того, что соотношение объемов, заполненных блоками/сегментами, КБ (без учета объема контейнеров) и пеллет равно примерно 0,71 : 0,29, плотность в сухом состоянии ММ в блоках ($\rho_{\text{ММ-Б}}$, г/см³) может быть определена из соотношения

$$0,71 \rho_{\text{ММ-Б}} + 0,29 \cdot 0,84 = 1 \dots 1,1 \text{ [г/см}^3\text{]}. \quad (1)$$

Отсюда следует, что для достижения эффективной сухой плотности по Ca-ММ 1,1 г/см³ $\rho_{\text{ММ-Б}}$ должна быть равна 1,21 г/см³ (плотность бентонита $1,21/0,7 = 1,73$ г/см³ для 10X), а по Na-ММ 1 г/см³ — 1,07 г/см³ (плотность бентонита — $1,07/0,7 = 1,53$ г/см³ для Т). Для барьера из смеси бентонитов 10X и Т минимальная плотность в сухом состоянии будет находиться в интервале 1,53–1,73 г/см³.

Для смеси бентонита (Б) и каолиновой глины (КК) Б30КК70, в которой содержание ММ составляет от 0,3-70% (10X) + 0,7-15% (КК) $\approx 32\%$ (пересчет по концентрациям ММ) до 36% (прямое измерение в [26]), плотность блоков по Ca-ММ, равная 1,21 г/см³, должна соответствовать плотности смеси $1,21/(0,36 \dots 0,32) = 3,36 \dots 3,78$ г/см³. Однако данное значение превышает плотность твердой фазы входящих в глину минералов и технические возможности изготовления компактированных блоков. В настоящее время освоено производство бентонитовых блоков с характерными размерами порядка метра до значений плотности в сухом состоянии 1,7...1,8 г/см³, а также цилиндрических образцов с размерами до ~ 10 см — до 2,0...2,1 г/см³. Большие значения плотности в сухом состоянии требуют давления прессования свыше 150 Мпа [27], [28].

С учетом ожидаемых трудностей обеспечения необходимой плотности смесей каолин-бентонит они в настоящей работе далее не рассматриваются.

Диффузионный механизм переноса загрязнителя через бентонитовый буфер определяется условием (см., например, [29]):

$$Pe = \frac{KiL}{D_e} < 1, \quad (2)$$

где Pe — число Пекле; K — коэффициент фильтрации бентонита; i — градиент гидравлического напора; L — толщина буфера; D_e — эффективный коэффициент диффузии. Даже для засыпки пеллет из 10X, имеющих плотность в сухом состоянии около 1 г/см³, при толщине буферного слоя $L = 0,2$ м, коэффициенте фильтрации $K \approx 10^{-11}$ м/с [30], эффективном коэффициенте диффузии $D_e \approx 10^{-10} \dots 10^{-11}$ м²/с и $i \approx 0,05$, $Pe \approx 10^{-2} \dots 10^{-3} \ll 1$, т. е. условие диффузионного переноса обеспечивается с большим запасом.

2.1.2. Механическая эрозия буфера в процессе насыщения

В процессе насыщения буферного материала водой, особенно на ранней стадии, после закрытия выработки возможны процессы эрозии и канализирования, сопровождающиеся вымыванием



Рис. 4. Характерные каналы и полости, образующиеся в бентоните на ранней стадии его насыщения водой [32]

макрочастиц материала и уменьшением плотности буфера (рис. 4).

В кристаллических породах насыщение выработок происходит в основном через несколько крупных пересекающих выработку трещин. В зависимости от интенсивности поступления вода из трещины будет либо успевать поглощаться буфером, либо протекать дальше, прокладывая в нем своеобразные каналы. Частичное поглощение воды и набухание буфера будут сопровождаться образованием у стенок каналов бентонитового геля, облегчающего вынос частиц материала. Со временем, по мере насыщения и набухания бентонита, интенсивность выноса материала буфера замедляется [31]–[33]. Данный процесс зависит от множества факторов, полный учет которых в настоящее время затруднен, поэтому используется эмпирический подход. Например, в [34] предлагается оценка массы эродированного бентонита для области пересечения выработки трещиной, m_s , по объему прошедшей воды, V_w , и средней концентрации в ней бентонита, c_s :

$$m_s = c_s V_w^n, \quad (3)$$

где $n=0,65...1$ — эмпирический коэффициент. V_w в первом приближении определяется объемом пустот, имеющихся в буферной закладке (порový объем в блоках и пеллетах не учитывается), и который связан с заполнением пеллетами пространства между блоками бентонита с контейнерами и стенами выработок. Предполагая, что насыпная плотность пеллет в сухом состоянии — $1,2 \text{ г/см}^3$ и то, что они состоят из компактированного бентонита плотностью $1,7 \text{ г/см}^3$, легко оценить, что объем пустого пространства составляет около 30 % объема, заполненного пеллетами.

Наибольшая эрозия буфера будет происходить в случае вертикального пересечения выработки

водопроницающей трещиной. Объем материала выработки, который может размываться потоком воды из нее, можно грубо оценить по результатам [35]. Показано, что для условий ПГЗРО поток в проницаемом объекте сосредоточен в прилегающем к трещине объеме объекта шириной ~ 10% от его максимального характерного размера. В нашем случае под проницаемым «объектом» можно понимать характерную длину выработки между пересекающими ее крупными водопроницающими трещинами. Для иллюстративной оценки допустим, например, что водопиток в выработку длиной 300 м определяется четырьмя крупными водопроницающими трещинами, размер «объекта» составляет $300/4 = 75 \text{ м}$, а протяженность размываемого объема выработки (где сосредоточен поток из трещины) составляет 7,5 м. В соответствии с принятой геометрией выработки (рис. 2) объем пустого пространства в подкровельном зазоре между блоками и выработкой на длине 75 м составит примерно 80 м^3 . С учетом зазоров в укладке КБ и контейнеров увеличим этот объем еще на 10 м^3 и будем считать, что $V_w = 90 \text{ м}^3$.

По результатам среднемасштабных лабораторных экспериментов [31], пиковые значения c_s в начале размыва закладки составляли около 20 г/л , спадая затем до относительно постоянного значения 2 г/л . Среднее значение c_s должно определяться сверткой зависимостей от времени размывающего потока и концентраций, но для предварительных оценок примем среднее значение⁵ $c_s = 3 \text{ г/л}$. Масса вымытого бентонита $m_s = 3 \cdot 90000 = 270 \text{ кг}$. Общая масса бентонита в составе закладки на размываемом участке вы-

⁵ К экстраполяции результатов скандинавских экспериментов на российский массив надо относиться с осторожностью, так как значение c_s сильно зависит от содержания подземных вод, которое в российском массиве будет, скорее всего, значительно меньше.

работки 7,5 м, в предположении его сухой плотности $1,7 \text{ г/см}^3$, равна примерно 141,2 т, а доля вымытого бентонита (до его полного насыщения) — около 0,2%, т. е. будет пренебрежимо мала.

2.1.3. Микро-эрозия бентонита

На ранней стадии насыщения буфера эрозия происходит за счет отрыва относительно крупных частиц (агрегатов) бентонита протекающим под большим напором потоком подземных вод (ПВ) – данный механизм можно условно назвать макро-эрозией. Если насыщенный бентонит имеет свободную границу, например, в области контакта с водопрводящей трещиной, то при его набухании образуется гель (область связанных между собой частиц), который при определенных условиях может расширяться дальше и превращаться в золь коллоидных частиц, они могут уноситься потоком ПВ. Данный механизм можно условно назвать микро-эрозией.

В идеальных условиях набухание КБ в выработке ограничивается ее стенами, что, собственно, и приводит к появлению давления набухания. Однако при наличии пересекающих выработку трещин, расширение и проникновение бентонита в них может приводить к снижению его плотности в выработке и ухудшению барьерных свойств. Степень этого процесса зависит от многих параметров, но в случае низкого содержания ПВ и преобладания в монтмориллоните одновалентных ионов натрия свободное набухание бентонита может продолжаться очень долго. Пограничный слой бентонита в области контакта с ПВ сначала трансформируется в вязкий гель, по мере дальнейшего расширения и уменьшения плотности превращающийся в золь коллоидных частиц, которые могут уноситься ПВ далеко за пределы выработки. В случае значительного (свыше ~20% (масс.)) содержания в ММ Са-ММ или содержания ПВ свыше⁶ 4 мМ этого не происходит — образующийся на границе «бентонит — ПВ» гель остается достаточно стойким для дальнейшего размывания [47].

Одним из определяющих параметров микро-эрозии является скорость ПВ, контактирующих с поверхностью бентонита. Оценим их скорость в зоне структурных повреждений для рассматриваемой концепции.

Зона структурных повреждений ПП при проходке (ЗСП) в основном определяется тремя процессами: перераспределением существующих напряжений, их смещениями в выработках

(ЗСП_{ндс}) и давлением ударных волн при буровзрывных работах (ЗСП_{бвр}). Выделить повреждения, относящиеся к каждому механизму, не всегда возможно. Согласно [42], характерный размер зоны повреждений, в которой коэффициент проницаемости увеличивается на 2–3 порядка по оси выработки (но снижается примерно в 5 раз в радиальном направлении), может достигать 1,5 м при стандартных проходках методом БВР. В [43] приведен обзор характерных параметров ЗСП в европейских, канадских и японских исследованиях. Глубина распространения ЗСП_{бвр} при проходках методом БВР составляет несколько десятков сантиметров: обычно около 30 см по бокам и в кровле и приблизительно 80 см в подошве выработки. Коэффициент проницаемости уменьшается с глубиной, составляя в среднем около 10^{-10} м/с. Однако в породах с большими тектоническими или вызванными нагревом около контейнеров с ВАО напряжениями коэффициент фильтрации ЗСП_{ндс} может увеличиваться до порядка 10^{-6} м/с на глубину около 20 см за счет расслоения (spalling) пород по стенам. В значительной степени это зависит от ориентации выработок относительно осей главных напряжений (наиболее благоприятная — вдоль оси наибольшего напряжения). При «перекосах» направлений выработок ЗСП_{ндс} может значительно увеличиться.

Таким образом, транспортные свойства ЗСП будут существенно зависеть от того, произойдет ли расслаивание пород на стенках выработки. В [44] принято базовое значение проницаемости⁷ ЗСП 10^{-8} м²/с при пористости 2%, в вариантных расчетах предполагалось ее увеличение до 10^{-6} м²/с.

Для дальнейших иллюстративных оценок принимается, что глубина ЗСП составляет 0,5 м; пористость — 3%; коэффициент фильтрации — $2 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Грубую оценку фактора увеличения скорости фильтрации потока ПВ, f , в ЗСП, по сравнению с невозмущенной породой, можно получить по материалам [45], где приведено решение для двумерной задачи. Если характерный размер зоны с повышенной проницаемостью (ЗПП), имеющей коэффициент фильтрации K_{in} , равен b , а продольный (вдоль потока подземных вод) — a и коэффициент фильтрации невозмущенной породы K_{out} , то:

$$f = \frac{\alpha(\beta + 1)}{\beta + \alpha}, \text{ где } \alpha = \frac{K_{in}}{K_{out}} \text{ и } \beta = \frac{a}{b}. \quad (4)$$

⁶ Содержание ПВ участка «Енисейский», по результатам [48], соответствует примерно 3,2 мМ по NaCl.

⁷ Проницаемость T связана с коэффициентом фильтрации K соотношением $T=K \cdot d$, где d — мощность слоя породы с коэффициентом проницаемости K .

Принимается, что длина выработки $a=300$ м, глубина ЗПП $b=0,5$ м, получим $\beta=600$. Характерный коэффициент фильтрации невозмущенных горных пород на участке «Енисейский» (K_{out}) при умеренных требованиях к критериям приемлемости составляет $10^{-10}...10^{-9}$ м/с [46] и при $K_{in}=2\cdot 10^{-8}$ м/с, $\alpha=20...200$. Отсюда значение f может меняться в пределах 19...150. Данную оценку можно рассматривать лишь как приближительную, но ясно, что при реалистичных значениях проницаемостей ЗПП и породы и геометрии выработки скорость движения потока в ней может увеличиться на 1—2 порядка величины при показателях скорости потока в невозмущенной породе ~ 10 м/год [46].

Количественные расчеты скорости размывания Na-бентонита достаточно сложны, возможны лишь численными методами и до сих пор являются предметом исследования (см., например, [49]). Однако имеющиеся консервативные оценки размывания Na-ММ в трещине, где скорость ПВ соответствует ожидаемой в ЗСП для участка «Енисейский» — порядка 100 м/год и выше, дают величину для выработки с размерами, близкими к рассматриваемым, — около 200 г/год [50]. Несмотря на то, что не учитываются силы трения на поверхности трещин, наличие инертных примесей в бентоните, формирующих при его частичном размыве защитный слой, и т. п., использование на периферии выработки размываемого бентонита в данной концепции остается проблематичным. Так, например, в предположениях, сделанных ранее, в оценках размыва бентонита при насыщении (около 140 т на размываемом участке), при такой скорости потерь за 100 000 лет будет вымыто около 20 т бентонита, и его плотность станет недостаточной с точки зрения выполнения барьерных функций по давлению набухания (см. раздел 2.1.1. «Давление набухания»).

2.2. Максимальная плотность в сухом состоянии блоков компактированного бентонита

Максимальная плотность бентонита определяется главным образом поддержанием баланса между прочностью контейнера и пластической деформацией буфера, который позволяет сохранить целостность контейнера при сдвиговом смещении ГП по плоскостям пересекающей выработку трещины вследствие сейсмических воздействий. Нагрузки на систему буфер — контейнер при этом тесно связаны с критериями приемлемости горных пород, являющимися компромиссом между желанием разместить выработку ПГЗРО в наиболее прочных и целых породах и максимальным использованием объема

горного отвода для захоронения. Выбор данной концепции для участка «Енисейский», по всей видимости, станет возможным лишь после натурного изучения ГП на целевом горизонте вслед за проходкой шахтных стволов. В первом приближении можно ориентироваться на решение, принятое финской компанией Posiva Oy, — контейнер в окружении бентонитового буфера должен сохранять целостность при сдвиговом смещении горных пород на 5 см со скоростью 1 м/с [36], [37].

Количественные требования к системе буфер — контейнер возможны только для конкретных решений как по контейнеру, так и по буферу. Прочность и жесткость упаковки с РАО в рассматриваемой концепции сильно уступают скандинавскому контейнеру в виде литой чугуновой обоймы $\varnothing 949$ для сборок ОЯТ в медной оболочке толщиной 5 см [38]. Для компенсации меньшей прочности и жесткости контейнера в рассматриваемой концепции толщина буфера и/или его пластичность должны быть значительно выше, чем в финской (350 мм из бентонита с содержанием Na-ММ (75—90)% и сухой плотностью блоков около $1,7$ г/см³ [39]). В какой-то степени данное требование удовлетворяется интегральной толщиной бентонитовых блоков и слоя пеллет (см. рис. 2).

При желании снизить плотность КБ (сделать блоки достаточно «рыхлыми») необходимо учитывать критерий по минимальному давлению набухания (см. 2.1.1. «Давление набухания») и механической прочности насыщенного бентонита для поддержания контейнеров в заданном положении.

В связи с этим использование КБ из 10Х (Са-ММ с относительно низким содержанием смектита) в данной концепции может оказаться проблематичным из-за существенно худшей пластичности по сравнению с Na-бентонитами.

Выводы

Для одной из альтернативных концепций расположения РАО-1 на участке «Енисейский» — горизонтальное размещение в контейнерах с медным покрытием в блоках из КБ — проведено рассмотрение конструктивных решений по толщине контейнера и упаковок в выработках. Установка в контейнере двух бидонов с ОВАО позволит использовать при этих работах вилочный погрузчик. Возможна дальнейшая оптимизация конструкторских решений, например уменьшение толщины КБ при увеличении толщины контейнера, снижение размеров КБ и ДБ за счет смягчения требований по нагреву

буфера, однако для этого должен использоваться комплексный подход и, в частности, необходимо учитывать долговременную радиационную безопасность ПГЗРО. Применение дистанционных технологий обращения с упаковками позволит сделать толщину буфера и контейнера больше (ее массогабаритные характеристики не ограничиваются грузоподъемными параметрами вилочного погрузчика), размещать в них по три бидона с ОВАО, но существенно усложнит технологию обращения с упаковками и повысит стоимость ПГЗРО.

Относительно тонкий контейнер и небольшая толщина медного покрытия предъявляют повышенные требования к обеспечению целостности упаковки с РАО-1. В данной работе рассмотрены параметры буфера по давлению набухания, возможной эрозии, а также к стойкости при сдвиговой нагрузке, которые сводятся к содержанию и виду монтмориллонита и сухой плотности бентонита. Несмотря на предварительный и оценочный характер проведенного анализа, можно сделать несколько достаточно важных, по мнению авторов, выводов.

Так, например, при использовании в качестве буфера бентонита 10X на основе Са-ММ минимальная необходимая плотность в сухом состоянии КБ для рассматриваемой концепции должна быть достаточно велика ($> 1,7 \text{ г/см}^3$) и может оказаться на грани технической достижимой. Использование буфера высокой плотности и низкой пластичности проблематично с точки зрения обеспечения стойкости контейнера к сдвиговым нагрузкам ГП при сейсмических воздействиях.

Применение в рассматриваемой концепции исключительно Na-ММ маловероятно из-за его склонности к механической эрозии и трансформации в Са-ММ, вызванных большой интенсивностью потока ПВ в зоне структурных повреждений вокруг выработок.

Оптимизация состава бентонитового буфера требует дополнительных исследований с учетом факторов, не рассмотренных в данной работе (температурная и химическая стойкость, возможное негативное влияние на соседние защитные барьеры, фильтрационные характеристики для обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО и т. п.). На данном этапе оценок наиболее подходящим для рассматриваемой концепции представляется использование в качестве основного буфера (блоков КБ, окружающих контейнер) бентонита с преобладающим содержанием Na-ММ с минимально необходимой сухой плотностью (около $1,6 \text{ г/см}^3$), а для заполнения зазоров между стенами выработки

и блоками — бентонитовых пеллет на основе Са-ММ максимально достижимой сухой плотности. Предполагается, что данное решение обеспечит достаточно высокую плотность и пластичность буфера при его долговременной химической стойкости.

Литература

1. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33—42.
2. Крюков О. В. Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.
3. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду). Тома I—IV, ФГУП «НО РАО», Москва, 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения: 01.10.2018).
4. Богатов С. А. Захоронение остеклованных ВАО в вертикальных скважинах с цементной закладкой — плюсы и минусы с точки зрения обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 21—33.
5. Богатов С. А., Крючков Д. В., Павлов Д. И., Сыченко Д. В. Анализ различных концепций захоронения РАО класса 1 в кристаллических породах // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 66—77. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-66-77.
6. Бейгул В. П. Концепция горизонтального захоронения радиоактивных отходов 1 класса в ПГЗРО. — URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2022/03/23/123033> (дата обращения: 12.08.2022).
7. Мартынов К. В., Захарова Е. В., Кулюхин С. А. Альтернативная концепция устройства защитных барьеров при глубинном захоронении РАО класса 1 на Енисейском участке Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 68—84.
8. Noronha J. Deep Geological Repository Conceptual Design Report. Crystalline / Sedimentary Rock Environment. Nuclear Waste Management Organization, APM-REP-00440-0015 R001, May 2016. 191 p. — URL: <https://www.nwmo.ca/~media/Site/Reports/2016/06/08/10/03/>

- APM_REP_00440_0015_R001.ashx?la=en (дата обращения: 12.08.2022).
9. Богатов С. А., Блохин П. А., Козлов П. В., Лукин С. А., Киселев А. И., Ремизов М. Б., Семенов М. А., Уткин С. С. Остеклованные высокоактивные отходы ФГУП «ПО «Маяк» — усредненные оценки удельной активности и тепловыделения и их неопределенности // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 3 (103). С. 3—12.
 10. Keech P. G., Vo P., Ramamurthy S., Chen J., Jacklin R., Shoesmith D. W. Design and development of copper coatings for long term storage of used nuclear fuel // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2014. Vol. 49. No. 6. Pp. 425—430.
 11. Dzhurinskiy D., Dautov S., Shornikov P., Akhatov I. S. Strain gradient plasticity modeling to evaluate material plastic deformation behavior in Cold Gas Dynamic Spray Process. // Conference: ITSC 2021. DOI:10.31399/asm.cp.itsc2021p0256. — URL: https://www.researchgate.net/publication/352484950_Strain_Gradient_Plasticity_Modeling_to_Evaluate_Material_Plastic_Deformation_Behavior_During_Cold_Gas_Dynamic_Spray_Process (дата обращения: 09.08.2022).
 12. Ремизов М. Б., Козлов П. В., Логунов М. В., Колтышев В. К., Корченкин К. К. Концептуальные и технические решения по созданию на «ПО «Маяк» установок остекловывания текущих и накопленных жидких ВАО // Вопросы радиационной безопасности. 2014. № 3. С. 17—25.
 13. НП-093-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. — М. : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2014. 25 с.
 14. Богатов С. А., Крючков Д. В. Оценка минимальной толщины оболочки стального контейнера для захоронения РАО класса 1 в кристаллических породах с бентонитовым буфером : Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2020-04. — М. : ИБРАЭ РАН, 2020. 29 с.
 15. Hall D. S., Behazin M., Binns W. J., Keech P. G. An evaluation of corrosion processes affecting copper-coated nuclear waste containers in a deep geological repository // Progress in Materials Science. 2021. Vol. 118. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642520301304> (дата обращения: 21.08.2022).
 16. Решение секции № 1 «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» «Экология и радиационная безопасность» по вопросу «Подготовка исходных технических требований и программы работ по созданию линейки упаковок РАО 1 класса». 13 мая 2022 г.
 17. Дизельный погрузчик TCM FD230-2. — URL: <https://centr-teh.ru/category-vilochnye-pogruzchiki-avtopogruzchiki-dizelnye/gruzopodemnost/23-tonni> (дата обращения: 12.08.2022).
 18. ОСПОРБ-99/2010. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности.
 19. Juvankoski M. Buffer Design. 2012. Posiva Working Report 2012–14. August 2013. 259 p.
 20. Meleshyn A. Y., Zakusin S. V., Krupskaya V. V. Swelling Pressure and Permeability of Compacted Bentonite from 10th Khutor Deposit (Russia) // Minerals. 2021. Vol. 11. No. 7. P. 742. — URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/7/742> (дата обращения: 07.12.2022).
 21. Karnland O., Olsson S., Nilsson U. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. SKB TR-06-30. December 2006. 112 p.
 22. Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А., Доржиева О. В., Белоусов П. Е., Тюпина Е. А. Изоляционные свойства бентонитовых барьерных систем для захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 35—55.
 23. Kurosawa S., Yui M., Yoshikawa H. Experimental Study of Colloid Filtration by Compacted Bentonite // MRS Proc. 1996. Vol. 465. Pp. 963—970.
 24. Stroes-Gascoyne S., Hamon C. J., Dixon D. A., Kohle C. L., Maak P. The Effects of Dry Density and Porewater Salinity on the Physical and Microbiological Characteristics of Compacted 100% Bentonite // MRS Online Proc. Libr. 2007. Vol. 985. No. 1. P. 1302.
 25. Pedersen K., Motamedi M., Karnland O., Sandén T. Cultivability of microorganisms introduced into a compacted bentonite clay buffer under high-level radioactive waste repository conditions // Eng. Geol. 2000. Vol. 58. No. 2. Pp. 149—161. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00056-9.
 26. Мартынов К. В., Жаркова В. О., Захарова Е. В. Деформация и фильтрация в глинистых материалах для защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2021. № 4 (17). С. 78—88. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-78-88.
 27. Johnsson A., Sandén T. System design of backfill Pellet optimization. R-13-47. Stockholm, 2013. 25 p.
 28. Kim C-S., Man A., Dixon D., Holt E., Fritzell A. Clay-Based Pellets for Use in Tunnel Backfill and as Gap Fill in a Deep Geological Repository: Characterisation of Thermal-Mechanical Properties. NWMO Report TR-2012-05. December 2012. 121 p.
 29. Fried J. J., Combarous M. A. Dispersion in Porous Media. In: Advances in Hydroscience. Edited by V. T. Show. 1971. Vol. 7. Pp. 170—282.

30. *Börgesson L., Karland O., Johannesson L. E., Gunnarsson D.* Current Status of SKB's Research, Development and Demonstration Programme on Buffer, Backfill and Seals. A Report Prepared by SKB for United Kingdom Nirex Ltd. SKB IC. 122. 2006.
31. *Pintado X., Adesola F., Turtiainen M.* Down-scaled Buffer Tests. Posiva Working Report 2012-100. Eurajoki, Finland, Posiva Oy, 2013.
32. *Sandén T., Börgesson L.* Early effects of water inflow into a deposition hole. Report R-10-70. Laboratory tests results. Stockholm, Sweden, SKB. 2010. 74 p.
33. *Sane P., Laurila T., Olin M., Koskinen K.* Current status of mechanical erosion studies of bentonite buffer. Posiva 2012-45. Eurajoki, Finland, Posiva Oy, 2013.
34. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. Performance Assessment 2012, Posiva 2012-04. February, 2012. 528 p.
35. *Neretnieks I.* Flow and transport through a damaged buffer – exploration of the impact of a cemented and an eroded buffer. SKB TR-06-33. December 2006. 36 p.
36. *Raiko H., Sandström R., Rydén H., Johansson M.* Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010. 80 p.
37. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Models and Data for the Repository System 2012. Posiva 2013-01, Part 1, 2. September 2013.
38. *Raiko H. (ed.), Pastina B., Jalonen T., Nolvi L., Pitkänen J., Salonen T.* Canister Production Line 2012. Design, Production and Initial State of the Canister. Posiva 2012-16. December 2012. 182 p.
39. *Juvankoski M., Ikonen K., Jalonen T.* Buffer Production Line Design, Production and Initial State of the Buffer. Posiva 2012-17. 2012. 166 p.
40. *Börgesson L., Pusch R.* Rheological properties of a calcium smectite. // SKB Technical Report 87-31. December 1987. 130 p.
41. *Dueck A., Börgesson L., Johannesson L. E.* Stress-strain relation of bentonite at undrained shear. Laboratory tests to investigate the influence of material composition and test technique. SKB Technical Report TR-10-32. December 2010. 54 p.
42. Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. Edt. by C. Davies, F. Bernier. Publications Office, 2005.
43. *Bäckblom G.* Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses. SKB Technical Report TR-08-08. November 2008. 77 p.
44. Data report for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-10-52, December 2010. 458 p.
45. *Zhao C., Hobbs B., Ord A., Hornby P., Peng S., Liu L.* Theoretical and Numerical Analyses of Pore-fluid Flow Patterns Around and Within Large Cracks and Faults // *Geophys. J. Int.* 2006. Vol. 166. Pp. 970–988.
46. *Богатов С. А., Крючков Д. В.* Упрощенная модель переноса радионуклидов в трещиноватых кристаллических породах для предварительных оценок безопасности захоронения РАО класса 1 на участке Енисейский // Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях : Сборник материалов XI Российской научной конференции, Москва, 26–29 октября 2021 года. Т. 3. — Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2022. С. 314–322.
47. *Birgersson M., Börgesson L., Hedström M., Karland O., Nilsson U.* Bentonite erosion. Final report. SKB Technical Report TR-09-34. December. 2009. 164 p.
48. *Озерский А. Ю., Караулов В. А.* Гидрогеологические исследования при изысканиях массива кристаллических пород для подземного строительства в южной части Енисейского кряжа // Инженерные изыскания. 2012. № 11. С. 52–59.
49. *Pont A., Coene E., Idiart A.* Bentonite erosion project. Preliminary study for the numerical simulation of bentonite erosion. SKB Report P-20-16. August 2020. 55 p.
50. *Moreno L., Neretnieks I., Liu L.* Modelling of erosion of bentonite gel by gel/sol flow. SKB Technical Report TR-10-64. November 2010. 48 p.

Информация об авторах

Богатов Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: sbg@ibrae.ac.ru.

Дробышевский Николай Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: dni@ibrae.ac.ru.

Крупская Виктория Валерьевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

(119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35); старший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Закусин Сергей Вячеславович, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35); Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: zakusinsergey@gmail.com.

Лехов Владимир Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: v.lekhov@gmail.com.

Библиографическое описание статьи

Богатов С. А., Дробышевский Н. И., Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А. Предварительные оценки параметров инженерных барьеров в концепции ПГЗРО с горизонтальным размещением упаковок РАО в контейнерах с медным покрытием // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 77–91. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-77-91.

PRELIMINARY ASSESSMENT OF ENGINEERED BARRIER PARAMETERS UNDER DGR CONCEPT WITH HORIZONTAL ORIENTATION OF RW PACKAGES IN COPPER COATED CONTAINERS

Bogatov S. A.¹, Drobysheskiy N. I.¹, Krupskaya V. V.^{2,3}, Zakusin S. V.^{2,3}, Lekhov V. A.³

¹Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Article received on December 22, 2022

The paper discusses a DGR concept providing for heat-generating radioactive waste (RW) disposal in relatively thin-walled steel containers with a copper coating in packages of compacted bentonite blocks installed into horizontal drifts. The study assumes that this DGR layout should provide safe disposal of historical RW Class 1 with relatively low activity and heat generation levels. The proposed concept imposes appropriate restrictions on the bentonite buffer, among which the paper quantitatively considers the thickness varying depending on the residual RW heat release, the minimum bulk density, as well as the content and type of montmorillonite. For further assessment purposes, the paper proposes to consider bentonite blocks made of compacted bentonite from Russian deposits with a predominant content of sodium montmorillonite characterized with minimum required bulk density. The authors also proposed to fill the gaps between RW packages made of compacted bentonite and drifts with pellets. Such bentonite pellets should have maximum achievable bulk density and a predominant content of calcium montmorillonite.

Keywords: radioactive waste, clay materials, nuclear legacy facilities, RW disposal, engineered barriers.

References

1. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategicheskii master-plan issledovaniy v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, ehkspluatatsii i zakrytiya punkta

glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 32–41.

2. Kryukov O. V. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhroneniya RAO [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 114–120.
3. Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshchenie i sooruzhenie ne otnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta khraneniya RAO, sozdaemogo v sootvetstvii s proektnoi dokumentatsiei na stroitel'stvo ob'ektov okonchatel'noi izolyatsii RAO (Krasnoyarskii krai, Nizhne-Kanskii massiv) v sostave podzemnoi issledovatel'skoi laboratorii (vkluchaya materialy otsenki vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu) [Materials supporting siting and construction license application for a radioactive waste disposal facility not being considered as a nuclear facility established in accordance with the design documentation for the construction of facilities intended for the final disposal of radioactive waste (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy rock mass) as part of an underground research facility (including environmental impact assessment materials)]. Volumes I–IV. Moscow, FSUE NO RAO Publ., 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (accessed on: 01.10.2018).
4. Bogatov S. A. Zakhronenie osteklovannykh VAO v vertikal'nykh skvazhinakh s tsementnoi zakladkoi — plyusy i minusy s tochki zreniya obespecheniya dolgovremennoi bezopasnosti PGZRO [HLW Disposal of in Verticale Deposition Holes with Cement Backfill — Pro and Contra with Regard to Long Term Safety of Geological Disposal Facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 1 (2), pp. 21–33.
5. Bogatov S. A., Kryuchkov D. V., Pavlov D. I., Sychenko D. V. Analiz razlichnykh kontseptsii zakhroneniya RAO klassa 1 v kristallicheskikh porodakh [Analysis of Various Concepts for RW Class 1 Disposal in Crystalline Rocks]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 66–77. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-66-77.
6. Beygul V. P. Kontseptsiya gorizontalnogo zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov 1 klassa v PGZRO [The concept of horizontal radioactive waste Class 1 disposal in DGR]. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2022/03/23/123033> (accessed on: 12.08.2022).
7. Martynov K. V., Zakharova E. V., Kulyukhin S. A. Alternative Conceptual Designs of Safety Barriers Proposed for Deep RW Class 1 Disposal at the Yenisiskiy Site in the Nizhnekanskiy Rock Mass. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 68–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.
8. Noronha J. Deep Geological Repository Conceptual Design Report. Crystalline / Sedimentary Rock Environment. Nuclear Waste Management Organization, APM-REP-00440-0015 R001, May 2016. 191 p. URL: https://www.nwmo.ca/~media/Site/Reports/2016/06/08/10/03/APM_REP_00440_0015_R001.ashx?la=en (accessed on: 12.08.2022).
9. Bogatov S. A., Blokhin P. A., Kozlov P. V., Lukin S. A., Kiselev A. I., Remizov M. B., Semenov M. A., Utkin S. S. Osteklovannyye vysokoaktivnyye otkhody FGUP “PO “Mayak” — usrednennyye otsenki udel'noy aktivnosti i teplovydeleniya i ikh neopredelennosti [Vitrified high-level waste from FSUE PA Mayak — average estimated specific activity and heat release and relevant uncertainties]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2021, no. 3 (103), pp. 3–12.
10. Keech P. G., Vo P., Ramamurthy S., Chen J., Jacklin R., Shoosmith D. W. Design and development of copper coatings for long term storage of used nuclear fuel. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 425–430.
11. Dzhurinskiy D., Dautov S., Shornikov P., Akhatov I. S. Strain gradient plasticity modeling to evaluate material plastic deformation behavior in Cold Gas Dynamic Spray Process. Conference: ITSC 2021. DOI: 10.31399/asm.cp.itsc2021p0256. URL: https://www.researchgate.net/publication/352484950_Strain_Gradient_Plasticity_Modeling_to_Evaluate_Material_Plastic_Deformation_Behavior_During_Cold_Gas_Dynamic_Spray_Process (accessed on: 09.08.2022).
12. Remizov M. B., Kozlov P. V., Logunov M. V., Koltyshchev V. K., Korchenkin K. K. Kontseptual'nyye i tekhnicheskiye resheniya po sozdaniyu na “PO “Mayak” ustanovok osteklovyvaniya tekushchikh i nakoplennykh zhidkikh VAO [Conceptual and technical solutions for the development of installations designed for the vitrification of current and accumulated liquid HLW inventory at PA Mayak]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2014, no. 3, pp. 17–25.
13. NP-093-14. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Kriterii priyemlosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhroneniya* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Acceptance Criteria for Radioactive Waste Disposal]. Moscow, Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision Publ., 2014. 25 p.
14. Bogatov S. A., Kryuchkov D. V. *Otsenka minimal'noy tolshchiny obolochki stal'nogo konteynera dlya zakhroneniya RAO klassa 1 v kristallicheskikh porodakh s bentonitovym buferom* [Estimated minimum thickness of a steel container shell for Class 1 radioactive waste disposal in crystalline rocks with a bentonite buffer]. Preprint IBRAE № IBRAE-2020-04. Moscow, Nuclear Safety Institute of RAS Publ., 2020. 29 p.
15. Hall D. S., Behazin M., Binns W. J., Keech P. G. An evaluation of corrosion processes affecting copper-coated nuclear waste containers in a deep geological repository. *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 118. URL: <https://www.sciencedirect.com/>

- science/article/pii/S0079642520301304. (accessed on 21.08.2022).
16. Reshenie sektsii No. 1 “Ehkologicheskaya i radiatsionnaya bezopasnost’ punktov dolgovremennogo khraneniya, konservatsii i zakhroneniya RAO” NTS No. 10 Goskorporatsii “Rosatom” “Ehkologiya i radiatsionnaya bezopasnost’” po voprosu “Podgotovka iskhodnykh tekhnicheskikh trebovaniy i programmy rabot po sozdaniyu lineiki upakovok RAO 1 klassa” [Decision of section No. 1 Environmental and Radiation Safety of Long-term Storage, Isolation and Disposal of Radioactive Waste STC No. 10 of the State Corporation Rosatom Ecology and Radiation Safety on the Development of Initial Engineering Requirements and Work Program for the Serial Production of RW Class 1 Packages]. May 13, 2022.
 17. Dizel'nyi pogruzchik TCM FD230-2 [Diesel loader TCM FD230-2]. URL: <https://centr-teh.ru/category-vilochnye-pogruzchiki-avtopogruzchiki-dizelnye/gruzopodemnost/23-tonni> (accessed on: 12.08.2022).
 18. OSPORB-99/2010. Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiatsionnoi bezopasnosti [Basic Sanitary Rules for Radiation Safety (OSPORB-99/2010)].
 19. Juvankoski M. Buffer Design. 2012. Posiva Working Report 2012–14. August 2013. 259 p.
 20. Meleshyn A. Y., Zakusin S. V., Krupskaya V. V. Swelling Pressure and Permeability of Compacted Bentonite from 10th Khutor Deposit (Russia). *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 7, pp. 742. URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/7/742> (accessed on: 07.12.2022).
 21. Karnland O., Olsson S., Nilsson U. *Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials*. SKB TR-06-30. December 2006. 112 p.
 22. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. Izo-lyatsionnye svoystva bentonitovykh bar'ernykh sistem dlya zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov v Nizhnekanskom massive [Buffer Properties of Bentonite Barrier Systems for Radioactive Waste Isolation in Geological Repository in the Nizhnekanskiy Massif]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 35–55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.
 23. Kurosawa S., Yui M., Yoshikawa H. Experimental Study of Colloid Filtration by Compacted Bentonite. *MRS Proc.*, 1996, vol. 465, pp. 963–970.
 24. Stroes-Gascoyne S., Hamon C. J., Dixon D. A., Kohle C. L., Maak P. The Effects of Dry Density and Porewater Salinity on the Physical and Microbiological Characteristics of Compacted 100% Bentonite. *MRS Online Proc. Libr.*, 2007, vol. 985, no. 1, p. 1302.
 25. Pedersen K., Motamedi M., Karnland O., Sandén T. Cultivability of microorganisms introduced into a compacted bentonite clay buffer under high-level radioactive waste repository conditions. *Eng. Geol.*, 2000, vol. 58, no. 2, pp. 149–161. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00056-9.
 26. Martynov K. V., Zharkova V. O., Zakharova E. V. Deformatsiya i fil'tratsiya v glinistykh materialakh dlya zashchitnykh bar'erov radiatsionno opasnykh ob'ektov [Deformation and Filtration in Clay Materials Constituting to the Safety Barriers of Radiation Hazardous Facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 4 (17), pp. 78–88. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-78-88.
 27. Johnsson A., Sandén T. System design of backfill Pellet optimization. R-13-47. Stockholm, 2013. 25 p.
 28. Kim C.-S., Man A., Dixon D., Holt E., Fritzell A. *Clay-Based Pellets for Use in Tunnel Backfill and as Gap Fill in a Deep Geological Repository: Characterisation of Thermal-Mechanical Properties*. NWMO Report TR-2012-05. December 2012. 121 p.
 29. Fried J. J., Combarous M. A. Dispersion in Porous Media. In: *Advances in Hydroscience*. Edited by V. T. Show. 1971. Vol. 7. Pp. 170–282.
 30. Börgesson L., Karnland O., Johannesson L. E., Gunnarsson D. *Current Status of SKB's Research, Development and Demonstration Programme on Buffer, Backfill and Seals*. A Report Prepared by SKB for United Kingdom Nirex Ltd. SKB IC. 122. 2006.
 31. Pintado X., Adesola F., Turtiainen M. *Downscaled Buffer Tests*. Posiva Working Report 2012-100. Eurajoki, Finland, Posiva Oy, 2013.
 32. Sandén T., Börgesson L. Early effects of water inflow into a deposition hole. Report R-10-70. Laboratory tests results. Stockholm, Sweden, SKB. 2010. 74 p.
 33. Sane P., Laurila T., Olin M., Koskinen K. *Current status of mechanical erosion studies of bentonite buffer*. Posiva 2012-45. Eurajoki, Finland, Posiva Oy, 2013.
 34. *Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto*. Performance Assessment 2012, Posiva 2012-04. February, 2012. 528 p.
 35. Neretnieks I. *Flow and transport through a damaged buffer — exploration of the impact of a cemented and an eroded buffer*. SKB TR-06-33. December 2006. 36 p.
 36. Raiko H., Sandström R., Rydén H., Johansson M. *Design analysis report for the canister*. SKB TR-10-28. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010. 80 p.
 37. *Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto — Models and Data for the Repository System 2012*. Posiva 2013-01, Part 1, 2. September 2013.
 38. Raiko H. (ed.), Pastina B., Jalonen T., Nolvi L., Pitkänen J., Salonen T. *Canister Production Line 2012. Design, Production and Initial State of the Canister*. Posiva 2012-16. December 2012. 182 p.
 39. Juvankoski M., Ikonen K., Jalonen T. *Buffer Production Line Design, Production and Initial State of the Buffer*. Posiva 2012-17. 2012. 166 p.

40. Börgesson L., Pusch R. *Rheological properties of a calcium smectite*. SKB Technical Report 87-31. December 1987. 130 p.
41. Dueck A., Börgesson L., Johannesson L. E. *Stress-strain relation of bentonite at undrained shear. Laboratory tests to investigate the influence of material composition and test technique*. SKB Technical Report TR-10-32. December 2010. 54 p.
42. *Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories*. Edt. by C. Davies, F. Bernier. Publications Office, 2005.
43. Bäckblom G. *Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses*. SKB Technical Report TR-08-08. November 2008. 77 p.
44. *Data report for the safety assessment SR-Site*. Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-10-52, December 2010. 458 p.
45. Zhao C., Hobbs B., Ord A., Hornby P., Peng S., Liu L. Theoretical and Numerical Analyses of Pore-fluid Flow Patterns Around and Within Large Cracks and Faults. *Geophys. J. Int.*, 2006, vol. 166, pp. 970–988.
46. Bogatov S. A., Kryuchkov D. V. *Uproshchennaya model' perenosa radionuklidov v treshchinovatykh kristallicheskikh porodakh dlya predvaritel'nykh otsenok bezopasnosti zakhoroneniya RAO klassa 1 na uchastke Yeniseyskiy* [Simplified model of radionuclide transport in fractured crystalline rocks considered under the preliminary safety assessments of RW Class 1 Disposal at the Yeniseyskiy site]. Proceedings of the 10th Russian Scientific Conference Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies. Moscow, October 26–29, 2021. Vol. 3. Moscow, NSI RAS Publ., 2022. Pp. 314–322.
47. Birgersson M., Börgesson L., Hedström M., Karnland O., Nilsson U. *Bentonite erosion*. Final report. SKB Technical Report TR-09-34. December 2009. 164 p.
48. Ozerskiy A. Yu., Karaulov V. A. *Gidrogeologicheskiye issledovaniya pri izyskaniyakh massiva kristallicheskikh porod dlya podzemnogo stroitel'stva v yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha* [Hydrogeological studies during the exploration of a crystalline rock mass proposed for underground construction in the southern part of the Yeniseyskiy Ridge]. *Inzhenernyye izyskaniya – Engineering survey*, 2012, no. 11, pp. 52–59.
49. Pont A., Coene E., Idiart A. *Bentonite erosion project. Preliminary study for the numerical simulation of bentonite erosion*. SKB Report P-20-16. August 2020. 55 p.
50. Moreno L., Neretnieks I., Liu L. *Modelling of erosion of bentonite gel by gel/sol flow*. SKB Technical Report TR-10-64. November 2010. 48 p.

Information about the authors

Bogatov Sergey Aleksandrovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sbg@ibrae.ac.ru.

Drobyshevsky Nikolay Ivanovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: dni@ibrae.ac.ru.

Krupskaya Victoria Valerievna, Ph.D. in Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia); Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Zakusin Sergey Vyacheslavovich, Junior researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia); Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia), e-mail: zakusinsergey@gmail.com.

Lekhov Vladimir Alekseyevich, PhD, Senior researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia), e-mail: v.lekhov@gmail.com.

Bibliographic description

Bogatov S. A., Drobyshevskiy N. I., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A. Preliminary Assessment of Engineered Barrier Parameters under DGR Concept with Horizontal Orientation of RW Packages in Copper Coated Containers. *Radioactive Waste*, 2023, no. 3 (24), pp. 77–91. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-77-91. (In Russian).