DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55 УДК 549.02, 54.03, 54.08

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕНТОНИТОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ

В. В. Крупская[1,2], С. В. Закусин[1,3], В. А. Лехов[3], О. В. Доржиева[1], П. Е. Белоусов[1], Е. А. Тюпина[4]

[1]**Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва**

[2]**Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва**

[3]**Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва**

[4]**Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва**

Статья поступила в редакцию 14 января 2020 г.

В работе рассмотрены основные эксплуатационные свойства бентонитовых глин как компонента барьеров безопасности при изоляции радиоактивных отходов в пунктах глубинного захоронения (ПГЗРО). Показано, что на основе проведенных экспериментальных и аналитических работ может быть выбран материал для создания инженерных барьеров безопасности ПГЗРО. Дано описание основных полномасштабных и лабораторных экспериментов, которые необходимо выполнить при проведении исследований в ПИЛ, создаваемой в Нижнеканском массиве (Красноярский край). В основу предложенных экспериментов легли существующие в международной практике технические требования и показатели ключевых свойств бентонита как материала для создания изоляционного барьера при захоронении РАО.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, бентонит, инженерные барьеры, захоронение в геологических формациях, свойства бентонитов, лабораторные и полномасштабные эксперименты, Нижнеканский массив.*

Для безопасной изоляции высокоактивных отходов (ВАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ) в большинстве стран мира рассматривается вариант их захоронения в глубинных геологических формациях (глинах, солях, кристаллических породах). Важным компонентом пунктов глубинных захоронений радиоактивных отходов (ПГЗРО) являются пассивные многобарьерные системы, которые должны обеспечивать изоляцию отходов от биосферы. Такие системы обычно включают в себя природный геологический барьер, создаваемый геологической средой, и комплекс искусственных барьеров (инженерных барьеров безопасности — ИББ). Одним из элементов ИББ является буферный материал, предназначенный для герметизации упаковок с РАО и выработок подземного хранилища. В подавляющем большинстве развиваемых на настоящий момент концепций используют бентонит или смеси бентонита с другими материалами [1—4]. Материал обратного заполнения туннелей (в европейских концепциях ПГЗРО рассматриваются смеси бентонит/песок и бентонит/измельченная горная порода [5]), к которому предъявляются менее строгие требования, в данной работе не рассматривается. Для

размещения буферных материалов из компактированного (уплотненного) бентонита могут быть изготовлены пеллеты, как в проекте Швейцарии, или блоки различной формы, как в проектах ПГЗРО Швеции, Финляндии и др. [1, 6, 7].

Основными требованиями к буферному материалу при захоронении ВАО являются: низкая водопроницаемость; способность к самогерметизации; высокие сорбционные показатели по отношению к целому ряду радионуклидов; способность сохранять свои свойства в течение длительного времени [1, 7—9]. Полным набором требуемых свойств среди природных материалов обладают только бентонитовые и бентонитоподобные глины. В национальных программах Швеции и Финляндии, рассматривающих вариант захоронения ВАО в кристаллических горных породах (гранитных массивах), в качестве буферного материала выбран бентонит.

Основной защитной функцией материалов ИББ является удержание радионуклидов в объеме ПЗРО и замедление их выхода в окружающую среду. Защитные функции могут быть определены исходя из понимания свойств материалов ИББ и процессов их изменения в долгосрочной перспективе. Исследования, выполняемые в условиях подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) и максимально приближенные к реальным условиям ПГЗРО, позволяют получить наиболее достоверную информацию о свойствах материалов ИББ. В данной работе рассмотрены основные свойства бентонитового буфера в системе ИББ при изоляции ВАО и дано описание планируемых полномасштабных и лабораторных экспериментов.

Изоляционные свойства бентонитов и критерии их использования в качестве компонента ИББ

В контексте захоронения РАО бентонит и продукты на его основе выступают в новом качестве и рассматриваются уже как «специальный строительный материал», что требует разработки новых подходов и стандартизации оценки его характеристик. Научные группы разных стран работают над собственными оригинальными концепциями и стандартами, которые, несмотря на значительную схожесть, обладают индивидуальной спецификой в силу ряда экономических, геолого-географических, технологических и прочих особенностей.

Основными породообразующими компонентами бентонитовых глин являются минералы группы смектита, преимущественно монтмориллониты (более 60—70%). В качестве примесей в их составе встречаются кварц, полевые шпаты, кальцит, редко — пирит и органическое вещество, а также другие глинистые минералы — каолинит, иллит, смешанослойные минералы, реже — хлорит и вермикулит.

Благодаря изоморфным замещениям катионов в составе октаэдрических и тетраэдрических сеток глинистых минералов формируется отрицательный заряд слоя, который компенсируется межслоевыми катионами и обеспечивает высокие сорбционные и гидроизоляционные свойства бентонитовых глин (рис. 1). Преобладание изоморфных замещений в октаэдрических сетках и достаточная величина слоевого заряда обеспечивают наилучшие сорбционные

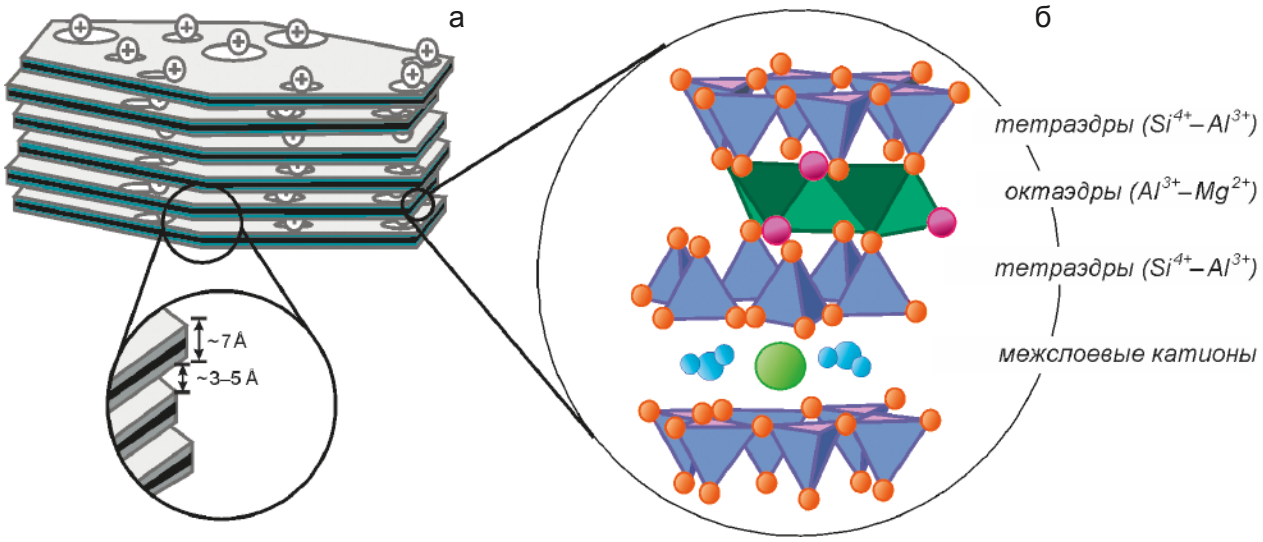

Рис. 1. Схематическое изображение частицы монтмориллонита с локализацией отрицательного заряда на поверхности слоя (а) и строение слоя смектита (б)

и коллоидальные свойства грунтам и породам с высоким содержанием монтмориллонита.

По составу обменных катионов в межслоевом комплексе монтмориллонита бентонитовые глины подразделяются на щелочные (натриевые) и щелочноземельные (кальций-магниевые) типы. Щелочные бентониты обладают лучшими технологическими свойствами для применения в целом ряде промышленных отраслей по сравнению с щелочноземельными в связи с тем, что ионы щелочных металлов, в первую очередь натрий, имеют более высокий потенциал гидратации. Таким образом, свободное набухание Na-монтмориллонитов значительно выше, чем Ca-монтмориллонитов. Однако исследования уплотненных бентонитов показали, что это влияние наблюдается только при низких плотностях компактированного бентонита (ниже 1,3—1,5 г/см^3) и отсутствует при высоких (более 1,7 г/см^3) [7, 10].

Содержание монтмориллонита в составе глин является одним из ключевых факторов приемлемости их использования в качестве буферного материала (табл. 1). Предположительно, большинство второстепенных минералов в бентонитах (кварц, полевые шпаты, другие глинистые минералы и т. д.) не будут оказывать какого-либо вредного воздействия на свойства барьерного материала. Однако исследования показали, что присутствие гипса, ангидрита, пирита и органического вещества может способствовать коррозии металла контейнеров с ВАО, создавать агрессивную для бетона среду и способствовать газогенерации [11, 12]. По результатам длительных экспериментов в научном сообществе были приняты критерии по минеральному составу бентонитовых глин, пригодных для использования в составе ИББ, но они не являются универсальными, и каждый критерий должен уточняться для условий конкретного ПГЗРО [7].

Таблица 1. Лимитированные содержания некоторых компонентов согласно требованиям шведской концепции захоронения KBS-3 (SKB) [13]

Содержание по проекту, вес. %	Допустимые содержания, вес. %
монтмориллонита	
80—85	75—90
сульфидов	
ограничено	<0,5
серы, включая сульфидную серу	
ограничено	<1
органического углерода	
ограничено	<1

Так, в концепции ПГЗРО Швеции в качестве буферного материала рассматривают бентонит с содержанием монтмориллонита 80—85 % (с допустимой вариацией в пределах 75—90 %). Содержание органического углерода должно составлять не более 1 %, сульфидов — не более 0,5 %, а общее содержание серы — не более 1 % от общей массы [13]. Бентонит используется в виде блоков и дисков с плотностью в диапазоне от 1,65 до 2,05 г/см^3, что будет обеспечивать давление набухания не менее 2 МПа и коэффициент фильтрации порядка 10^{-11}—10^{-12} м/с (табл. 1).

В финской концепции [14] изучаются как щелочной, так и щелочноземельный типы бентонитов (табл. 2), при этом достаточно большое количество экспериментов проводится на основе бентонита месторождения Вайоминг (MX-80), которй рассматривается часто как референсный материал.

Таблица 2. Критерии приемлемости бентонитовых глин для использования в качестве компонента ИББ согласно финской концепции [14]

Na-бентонит	Ca-бентонит
Содержание воды (влажность), %	
⩽13	⩽13
Индекс набухания, мл/2г	
⩾20	⩾15
Содержание смектита, %	
⩾75	⩾75
Полная влагоемкость, %	
⩾250	⩾80
Емкость катионного обмена (ЕКО), мг-экв/100 г	
⩾70	⩾60
Коэффициент фильтрации (при плотности скелета 1,75 г/см^3), м/с	
$\leqslant 10^{-12}$	$\leqslant 10^{-12}$
Давление набухания, МПа	
от 1 до 10	от 1 до 10
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	
1,0	1,0

На территории РФ и ближайшего зарубежья имеются месторождения довольно высококачественных бентонитов [15—17]. Основные характеристики бентонитов крупных промышленных месторождений РФ и ближнего зарубежья, чье сырье доступно на российском рынке и которые потенциально могут быть использованы в российской концепции ПГЗРО, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Основные показатели состава и свойств природных бентонитовых глин крупных промышленных месторождений Российской Федерации и ближнего зарубежья

10-й Хутор Республика Хакассия	Зырянское Курганский р-н, Россия	Таганское (Динозавровое) Республика Казахстан	Даш-Салахлинское Азербайджан
Содержание смектита (монтмориллонита), вес. %			
73	74	73	74
Величина общего заряда слоя монтмориллонита			
0,44	0,55	0,55	0,50
Величина тетраэдрического заряда, %			
3,2	26,8	0,5	0,8
Преобладание cis/trance-вакантных октаэдров			
cis-	cis-/trans-	trans-	cis-
Емкость катионного обмена по методу Триен*, мг-экв/100 г			
80,2	78,3	100,7	94,1
Емкость катионного обмена по методу МГ**, мг-экв/100 г			
36,8	27,3	81,6	80,2
Индекс свободного набухания, мл/2г			
10	18	19	не изм.
Содержание Fe_2O_3, масс. %			
4,1	8	6,7	5,8
Содержание органического углерода (Corg), масс. %			
<0,05	<0,05	<0,05	не изм.
Содержание серы, масс. %			
0,11	0,07	0,04	<0,1

* — метод адсорбции красителя метиленового голубого (МГ)
** — метод адсорбции комплекса Cu(trien)

Показатели емкости катионного обмена (ЕКО) были получены при использовании двух различных методов — по адсорбции красителя метиленового голубого (МГ), широко используемого метода в российской практике, и по адсорбции комплекса Cu(trien), который в настоящий момент является признанным в научном сообществе как наиболее корректный для оценки ЕКО бентонитов, и в особенности щелочно-земельных разностей [18, 19].

Компактирование бентонитов и показатели их физико-механических свойств

Изготовление материалов повышенной плотности из бентонитовых глин позволяет решить целый ряд вопросов, таких как формирование необходимых физико-механических свойств материалов ИББ [7], управление давлением набухания и проницаемостью. Кроме того, применение уплотненных материалов позволяет не только обеспечить однородность создаваемых барьеров, но и упростить транспортировку их элементов к месту использования [1]. Важно понимать, какие параметры необходимо контролировать при подборе условий уплотнения и какие показатели свойств следует принимать в качестве критерия оценки качества получаемого материала.

При подборе условий уплотнения ключевыми параметрами являются целевая плотность скелета, влажность и гранулометрический состав (размер частиц бентонитового материала). При этом от плотности скелета будут зависеть параметры набухаемости и проницаемости материала барьера, в то время как влажность и гранулометрический состав исходного сырья определяют прочность уплотненного материала и влияют на усилие, которое необходимо приложить для достижения целевой плотности. Важно, чтобы давление набухания и проницаемость как можно меньше зависели от плотности скелета, поскольку при сравнении показателей свойств различных бентонитов те, у которых проницаемость и давление набухания в наименьшей степени зависят от плотности скелета, являются предпочтительнее при выборе в качестве материала ИББ для изоляции ВАО [7].

Наиболее эффективным способом уплотнения бентонитов является прессование. Метод стандартного уплотнения путем трамбовки [20] не позволяет достичь необходимых параметров ввиду того, что импульсная (ударная) нагрузка не обеспечивает достаточного времени и необходимого усилия для равномерного распределения порового флюида и формирования переходных (точечных) и коагуляционных контактов между частицами при небольшой влажности.

Первичным критерием оценки качества уплотненного бентонита может служить предел прочности на одноосное сжатие. Этот параметр в первом приближении может дать оценку того, насколько материал способен сохранять целостность при транспортировке, закладке и при эксплуатации хранилища. Проведенные исследования показали, что использование промышленного помола до среднего размера 0,25—1 мм позволяет достичь наибольшей прочности компактированного бентонита месторождения Вайоминг [21], в то время как для бентонитов месторождения 10-й Хутор оптимальный размер фракций, по предварительным исследованиям, составляет менее 0,1 мм.

Для бентонитов месторождения Вайоминг величина оптимальной влажности компактирования составляет 17 % [21], исследования бентонитов месторождения 10-й Хутор позволяют говорить о показателях влажности около 20 %.

Набухание

Набухание бентонитового материала при контакте с водой является одним из основных изоляционных свойств и обеспечивает заполнение пустот (самогерметизацию) в созданном барьере, что приводит к созданию однородной среды даже при использовании различных по форме элементов (блоков, пеллет, гранул и т. д.) (рис. 2).

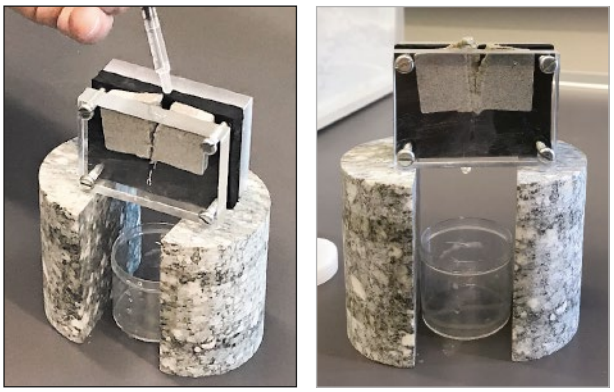

Рис. 2. Демонстрация самозалечивания трещины в компактированном бентоните при попадании воды. Время между фотографиями — 10 минут

Давление набухания компактированного бентонита зависит преимущественно от плотности скелета и особенностей самого бентонита (гранулометрический состав, содержание смектита, заряд слоя и его распределение, химический состав обменных катионов). Проницаемость (коэффициент фильтрации) в достаточно сильной степени связана с давлением набухания [7].

Исследование микроморфологических характеристик уплотненных бентонитов до и после увлажнения позволило выявить ряд изменений их микростроения. Микроструктура природных компактированных глин до увлажнения сложена микроагрегатами глинистых частиц смектита удлиненной листообразной формы, объединенными, в свою очередь, в более крупные (рис. 3а) с вариациями размеров от 1 до 10 мкм при толщине 0,5—3 мкм и с многочисленными межчастичными мелкими внутримикроагрегатными и межмикроагрегатными порами. После увлажнения наблюдается уменьшение размеров микроагрегатов и снижение количества пор, что связано с гидратацией глинистых частиц при насыщении образца водой. Набухание смектитовых частиц и агрегатов приводит к уменьшению их среднего размера, снижению степени ориентации, закрытию целого ряда пор, в результате чего формируется более однородная микроструктура (рис. 3б) [22, 23].

В макрообъеме наблюдаемые изменения микростроения при набухании приводят к довольно быстрому усреднению неоднородного материала, самозалечиванию крупных пор на границах участков разной плотности и созданию однородной системы практически с полным отсутствием пор. В работе [24] показано, что при использовании бентонита в виде уплотненных гранул и порошка его увлажнение в течение 2,5 месяцев приводит к достижению высокой гомогенизации барьера за счет набухания материала, который, в свою очередь, уже может обеспечить необходимые изоляционные свойства (рис. 4).

Давление набухания экспоненциально зависит от плотности, что должно учитываться при моделировании напряженно-деформационного состояния горного массива, в котором размещается ПГЗРО [25—27]. Следует учитывать, что изменение химического состава поровой воды, длительное воздействие температуры в ближней зоне от контейнеров с ВАО, потенциальные преобразования состава и строения бентонитов

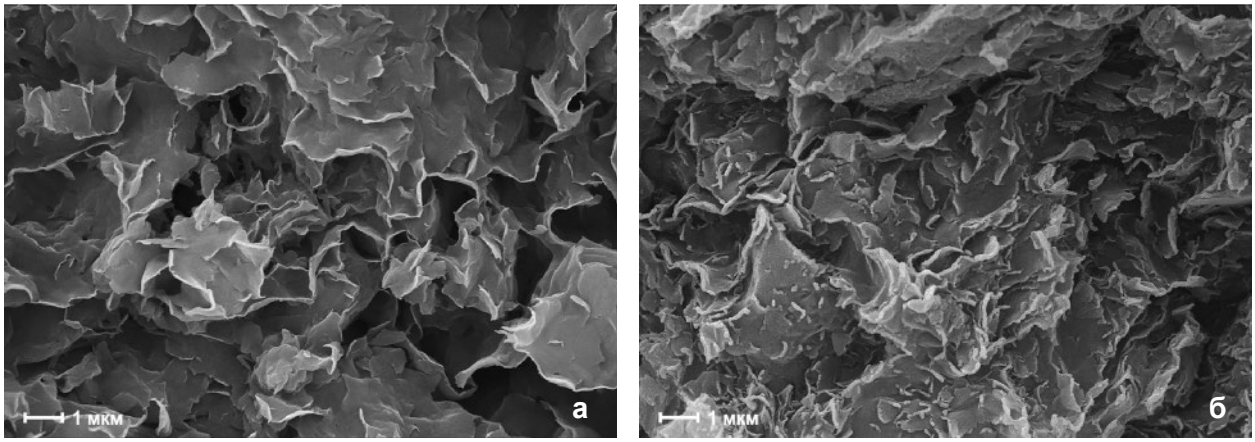

Рис. 3. Снижение пористости в уплотненных бентонитовых глинах (10-й Хутор) при увлажнении: а — влажность 11%, б — влажность 45%

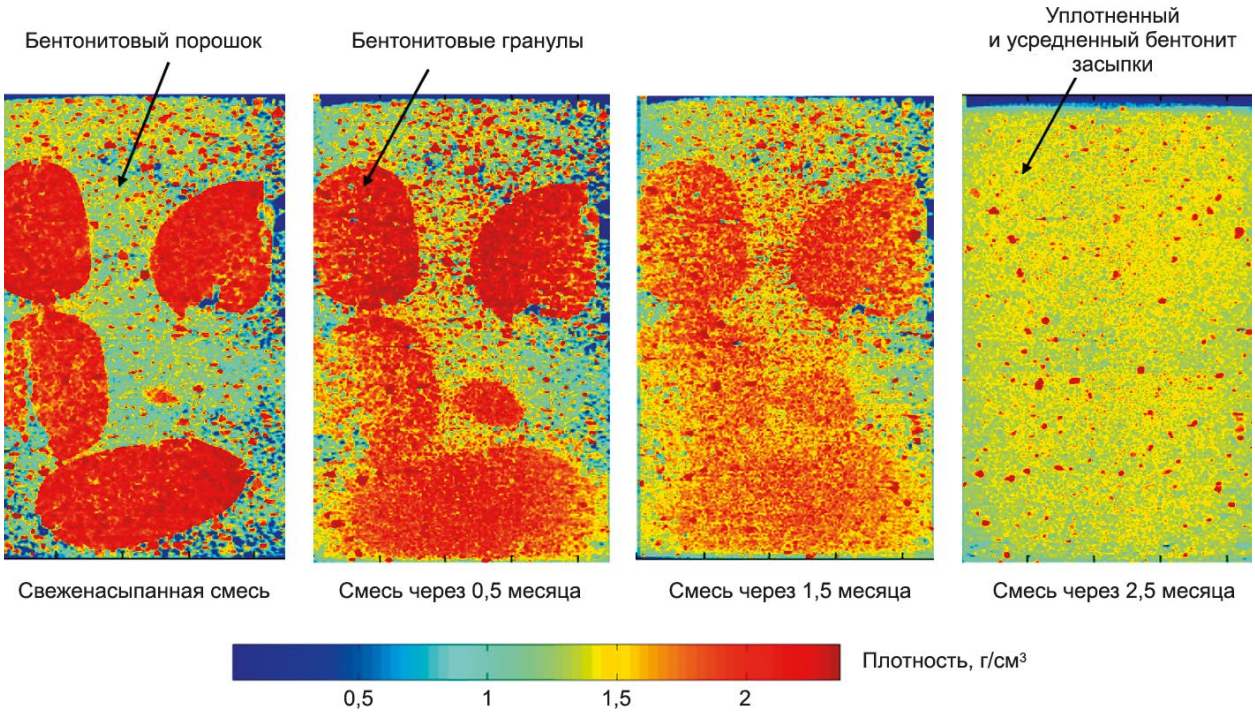

Рис. 4. Самоуплотнение бентонитового материала разного фракционного состава (по материалам [24] с дополнениями)

за счет коррозии металла контейнеров могут изменять показатели давления набухания, а значит, и гидроизоляционные свойства барьера.

Давление набухания является одним из важнейших показателей свойств бентонитового буфера, его величина должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечивать необходимый потенциал залечивания при герметизации, но не должна превышать критических значений, чтобы не создавать разрушающей нагрузки на контейнер и стенки выработки. По разным данным, величина давления набухания должна находиться в пределах 0,2—15 МПа.

Водопроницаемость

Низкая водопроницаемость является одним из главных изолирующих свойств бентонитовых глин. Низкие значения водопроницаемости могут быть получены в первую очередь за счет создания компактированных бентонитовых материалов высокой плотности, что и используется в подавляющем большинстве современных концепций захоронения РАО.

Теория фильтрации в слабопроницаемых отложениях, в том числе и инженерных барьерах на основе бентонита, подразумевает адвективное движение воды лишь при наличии начального градиента напора.

Исследования микроструктуры формируемого порового пространства после гидратации образцов уплотненного (компактированного) бентонита показывает, что доступная активная пористость, в которой может происходить фильтрация, будет минимальна или отсутствовать [28]. Размер формируемых пор зависит от давления набухания, которое, в свою очередь, контролируется особенностями строения монтмориллонита и составом раствора.

В зависимости от концепции сооружения и типа отходов для обеспечения долгосрочной безопасности необходимо, чтобы коэффициент фильтрации буфера составлял не более 10^{-11}—10^{-12} м/с.

Теплопроводность

Тепло, выделяемое контейнерами с ВАО или ОЯТ за счет процессов радиоактивного распада, должно рассеиваться, чтобы ограничить максимальную температуру в ближней зоне для обеспечения безопасной эксплуатации хранилища. Максимальная температура в бентонитовом буфере будет достигаться в первые 50—100 лет после закрытия ПГЗРО, когда остаточное тепловыделение отходов все еще высокое, а бентонит не полностью водонасыщен и не перешел в набухшее состояние [27]. Исследования в лабораторных условиях и полномасштабных экспериментах на примере проекта FEBEX (Full Scale Engineered Barriers Experiment) показали, что теплопроводность бентонита значительно

снижается при влажности ниже 50 %, а при влажности в интервале 50—100 % остается практически постоянной [29—31]. Таким образом, становится очевидно, что наиболее эффективными свойствами бентонит обладает при степени влажности не менее 50 %, что будет достигаться в хранилище при падении температуры вблизи контейнера ниже 100 °С. Однако в указанных выше работах не принималось в расчет литостатическое давление, которое будет существовать на глубине, поэтому критерии по уровню температуры могут быть пересмотрены.

Радиационная стойкость

Бентонитовый буфер, скорее всего, не будет подвергаться воздействию α- и β-излучения до тех пор, пока радионуклиды не выйдут за пределы изолирующего контейнера. Воздействие на бентонит γ-излучения отходов может изменить структуру монтмориллонита, что потенциально может привести к уменьшению его содержания в бентоните и, следовательно, уменьшению способности к набуханию и сохранению низкой водопроницаемости. Исследования показали, что поглощенная доза, при которой происходит аморфизация монтмориллонита, составляет 30 ГГр [33]. В то же время суммарные дозы облучения, воздействию которых бентонит будет подвергаться в глубинном хранилище, не приведут к каким-либо заметным изменениям в содержании и свойствах монтмориллонита [34].

Биологическая стойкость

В бентонитовом буфере и вмещающих горных породах, как в любом природном материале, присутствуют сульфатредуцирующие бактерии, продуктами жизнедеятельности которых являются сульфиды. Их количество зависит от типа бактерий и наличия питательных веществ в грунтовых водах. В результате нарушения конструкции ИББ может произойти поступление питательных веществ, например, за счет цементных добавок (таких как суперпластификаторы), органических компонентов, присутствующих в поровой воде горных пород, и прочих источников, что может вызвать повышенный рост бактерий.

Деятельность микроорганизмов может быть ограничена за счет снижения диффузионного поступления питательных веществ при повышении давления набухания, что достигается путем увеличения плотности материала бентонита. Более подробно влияние жизнедеятельности микроорганизмов и полномасштабные эксперименты освещены в работе [35].

Преобразования бентонитов в условиях ПГЗРО

Помимо определения основных показателей свойств бентонитового буфера, крайне важными являются сведения о возможности их преобразования под действием различных факторов при их функционировании в составе барьерных материалов ПГЗРО. Одним из таких факторов является повышенная температура вблизи упаковки с РАО. По разным представлениям, расчетная температура, которую будет испытывать бентонитовый буфер, находится в пределах 80—140 °С. Результаты полномасштабных экспериментов в Aspo (ABM project — Alternative Buffer Materials) показали, что под влиянием повышенной температуры (140 °С) в условиях присутствия имитатора железной канистры с ВАО происходит формирование кластеров триоктаэдрического смектита (сапонита), сопровождаемое незначительным снижением емкости катионного обмена и величины давления набухания [7]. В эксперименте PR — Prototype Repository, в котором в качестве материала канистры была выбрана медь, а температура не превышала 85 °С, изменений в составе бентонитовых глин на границе с канистрой не было отмечено, что позволяет авторам работы [7] предположить, что использование меди в качестве материала канистры гораздо более предпочтительно.

Известно, что минералы группы смектита под влиянием совокупности факторов, таких как высокая температура, давление, физико-химические реакции с компонентами порового флюида, могут претерпевать различные преобразования. Кроме упомянутого выше образования сапонита, возможна трансформация монтмориллонита в иллит, при которой набухающий монтмориллонит переходит в ненабухающий иллит. Экспериментальные работы [36, 37] показывают, что при ожидаемом составе подземных вод глинистых формаций иллитизацию порядка 80 % смектитовых слоев можно ожидать только при температуре в 150 °С после периода в 100 000 лет, а при более низких температурах — еще дольше. Концентрация калия в таких породах принималась равной 200 ppm. В то же время при концентрации калия 2000 ppm (150 °С) иллитизация 50 % смектитовых слоев произойдет гораздо быстрее (3 500 лет), но подобный химизм грунтовых вод характерен для гидротермальных растворов и не ожидается в кристаллических массивах в ходе изменения геологической ситуации. Эксперименты показывают, что в хранилище не будут достигнуты условия, при которых произойдет существенная иллитизация монтмориллонита.

Таким образом, наряду с изучением ключевых характеристик бентонитовых материалов крайне важным является выявление критериев их стабильности. Проведенными исследованиями бентонитов из различных месторождений России и ближнего зарубежья было установлено, что одним из основных параметров, определяющих стабильность структуры и свойств смектитов, является характер распределения вакантных позиций в октаэдрической сетке в структуре монтмориллонита. Было показано [38, 39], что cis-вакантные смектиты обладают большей устойчивостью по сравнению с trans-вакантными (рис. 5).

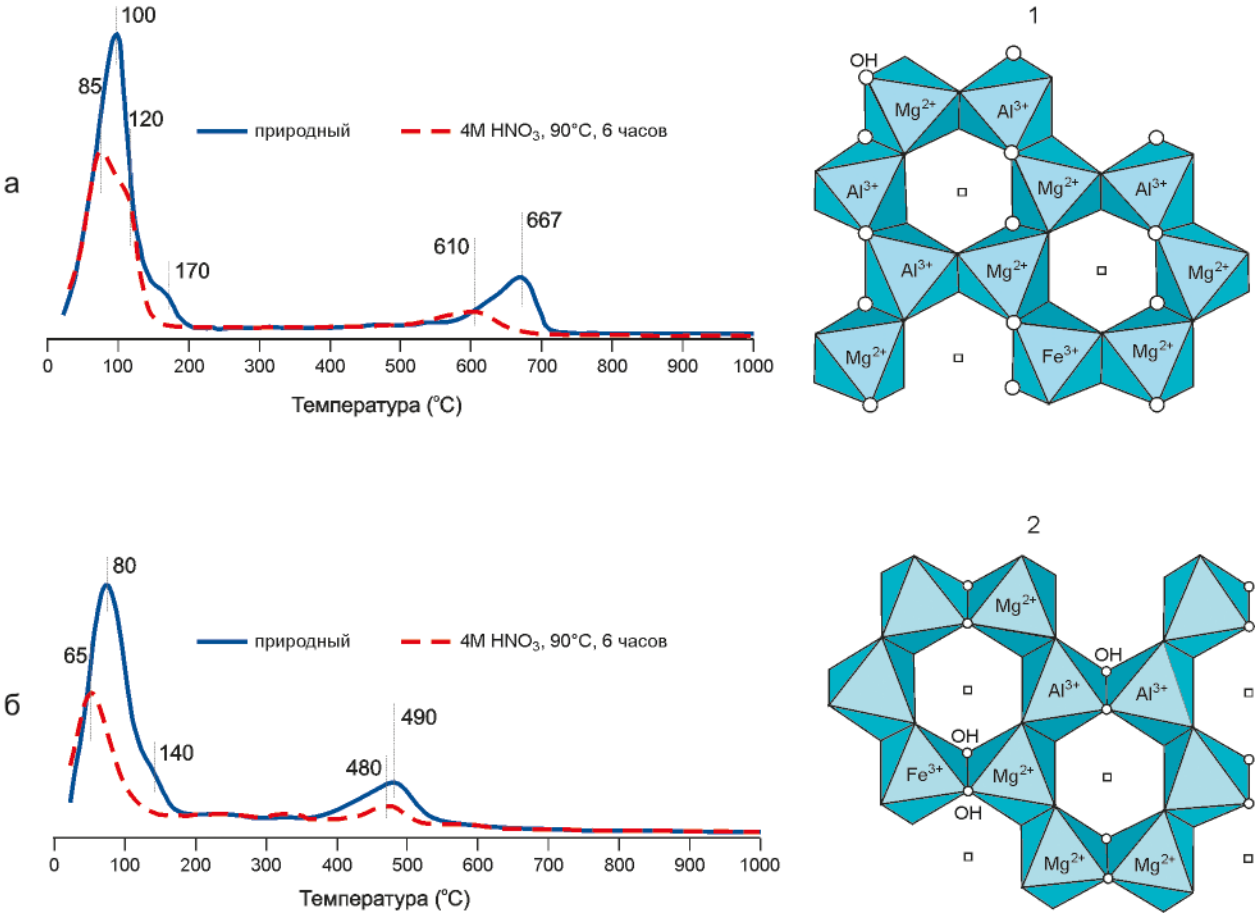

Рис. 5. Результаты термогравиметрического анализа для (а) cis-вакантных (месторождение Требия) и (б) trans-вакантных (месторождение Таганское) монтмориллонитов. Во врезках показаны модели ориентации ОН-групп в составе октаэдрической сетки по cis-мотиву (1) и trans-мотиву (2)

Согласно работам [40, 41], посвященным дегидроксилации 2:1 слоистых силикатов, в первую очередь слюд и смектитов, октаэдры могут быть ориентированы двумя разными способами так, что ОН-группы размещаются, как показано на рис. 5 (1, 2). При расположении ОН-групп относительно близко друг к другу по trans-мотиву на разрушение связей требуется меньше энергии, и, как следствие, температура дегидроксилации менее 500 °С (в диапазоне 450—500 °С). При расположении ОН-групп дальше друг от друга по cis-мотиву требуется больше энергии для разрыва связей, и температура дегидроксилации составляет выше 500 °С (в диапазоне 550—650 °С). Можно ожидать, что тот же структурный критерий окажется весомым при модельных преобразованиях бентонитов в условиях, характерных для ПГЗРО и в этом случае может быть использован в качестве критерия стабильности бентонитовых глин и учитываться при моделировании эволюции ИББ на ближнюю и дальнюю перспективу.

Лабораторные и полномасштабные эксперименты, планируемые в рамках подземной исследовательской лаборатории

В существующей на сегодняшний день концепции ПГЗРО система ИББ представляется в виде многокомпонентной конструкции. Нужно подчеркнуть, что при анализе стабильности

состава, строения и свойств материалов ИББ под действием различных факторов необходимо проводить эксперименты в условиях, наиболее близких к реальным, для того чтобы оценить влияние всей их совокупности, поскольку, вероятнее всего, эта система будет иметь эмерджентный характер.

В условиях ПИЛ ERLIK (Exploratory Rock Laboratory In Krasnoyarsk region) в Нижнеканском массиве [9] планируется проведение ряда полномасштабных экспериментов с целью изучения основных потенциальных процессов в материалах ИББ: воздействие температуры, химического состава поровой воды, давления, процессов на границах ИББ (процессы коррозии и эрозии материалов барьеров).

В существующих в настоящее время за рубежом ПИЛ проведено уже большое количество экспериментов, результаты которых могут быть использованы для моделирования эволюции ПГЗРО в российской концепции. Однако далеко не все они могут быть перенесены напрямую в связи с существующими различиями в условиях размещения объектов. Ниже рассмотрен спектр лабораторных, средне- и полномастабных экспериментов, направленных на изучение свойств бентонитовых материалов и протекающих в них процессов.

Полномасштабные натурные эксперименты в ПИЛ

С целью оценки безопасности ПГЗРО и изучения процессов эволюции барьерных материалов в рамках ПИЛ запланировано несколько серий полномасштабных экспериментов, в том числе те, что приведены на рис. 6:

а) исследование эволюции материалов ИББ в условиях ПГЗРО, включая изучение термоэволюции инженерных барьеров, изучение взаимодействия материалов ИББ, взаимодействия набухающих материалов заполнения туннелей и бетонных заглушек, эволюции свойств материалов заполнения туннелей;

б) исследование генерации и миграции газа через материалы ИББ и вмещающие породы, включая процессы газогенерации при коррозии металла контейнеров, возможное нарушение сплошности бентонитового буфера, миграцию газа.

Остановимся более подробно на описании эксперимента по изучению процессов, протекающих на границе между уплотненными бентонитами и металлическими элементами канистры. Данный эксперимент призван охарактеризовать стабильность бентонитового буфера и проследить процессы его эрозии и эволюции свойств.

В ходе реализации эксперимента предполагается достигнуть следующих результатов:

- изучить поведение бентонитового барьера на контакте с металлической канистрой под воздействием температуры в присутствии модельной поровой воды (параметры набухания, термоустойчивости, преобразования в зоне контакта);
- проанализировать преобразование бентонитового буфера из материала, выбранного в проектной документации, по основным параметрам (давление набухания, термоустойчивость, показатели физико-механических и фильтрационных свойств);
- исследовать эволюцию материалов на границе бентонит — металл, бентонит — материал заполнения/засыпки пространства между стенками выработки (бентонитовые гранулы, тиксотропный шликер и т. д.);
- выявить потенциальные перспективные альтернативные материалы — бентониты разных месторождений, глинистые смеси разного состава, бентонитовые гранулы из материала разных месторождений, материалы на основе смесей бентонита и породы;

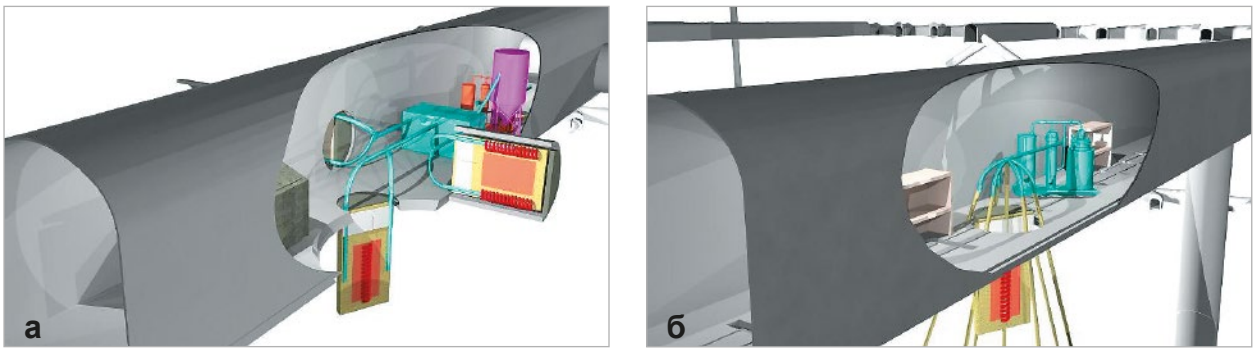

Рис. 6. Эскиз модели установок для проведения полномасштабных экспериментов: а — исследование эволюции материалов ИББ в условиях ПГЗРО, б — исследование генерации и миграции газа через материалы ИББ и вмещающие породы

- определить скорости коррозии материалов ИББ — металлической канистры, бентонита, бетона, тиксотропного шликера, альтернативных буферных материалов в условиях ПГЗРО;
- выявить особенности процессов, происходящих на границе разных материалов ИББ.

В качестве канистры выступает ее имитатор сходного состава. В случае изменения состава канистры соответствующие корректировки должны быть внесены в условия эксперимента по изучению термоэволюции бентонитового буфера (рис. 7).

Он проводится в отдельной скважине, предельно удаленной от других исследовательских выработок. Макет представляет собой имитатор металлической канистры с ВАО — нагреватель и обрамляющий материал выбранного металла, который помещается в систему колец из уплотненного бентонита. С целью сокращения времени получения результатов планируется установить два нагревателя и две системы колец из бентонита различного состава (разных месторождений), а также потенциальных альтернативных буферных материалов. Между двумя нагревателями предусмотрено пространство, которое не будет нагреваться и здесь могут быть размещены материалы для изоляции РАО класса 2 — буферные материалы, бетон и др. согласно технической документации к проекту ПГЗРО. Температура нагревания должна быть принята

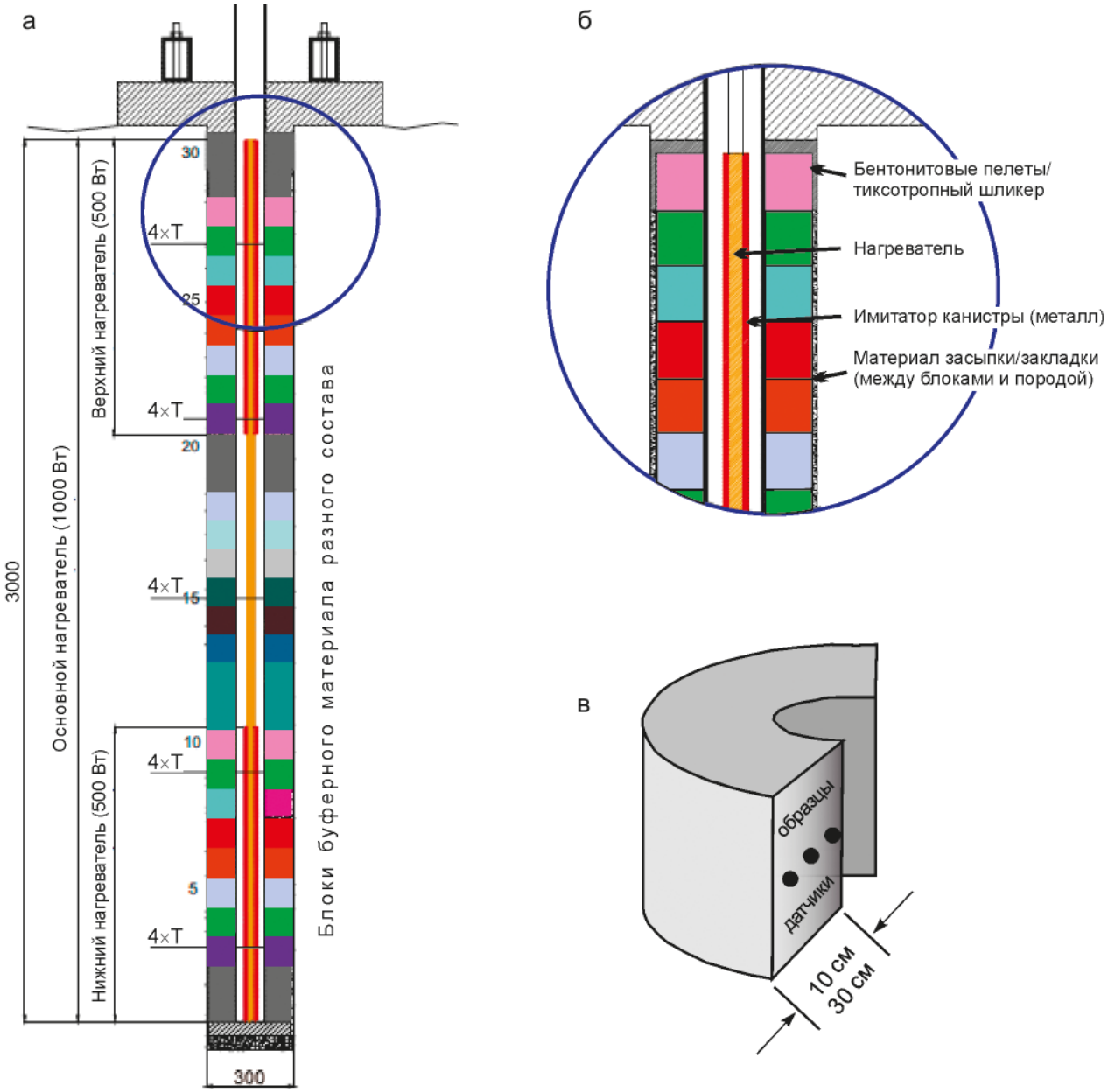

Рис. 7. Схема проведения полномасштабного эксперимента по проекту «ThermoEvolution»: а – схема размещения блоков и нагревателя в скважине, б – увеличенный фрагмент взаимного расположения материалов ИББ и нагревателя, в – планируемое размещение датчиков в блоках уплотненного бентонитового материала

исходя из расчетной согласно тепловыделению канистр с ВАО, предусмотренному проектом (в проектах Швейцарии и Швеции в сходных экспериментах была принята температура 130—150 °С). Вода подается с помощью насосного оборудования.

Буферный материал готовится в виде кольцевых блоков и размещается вокруг имитатора канистры. Для получения наиболее достоверных результатов блоки одинакового состава размещаются в 3—5 кратной повторности. Референсные материалы могут размещаться с меньшим количеством повторностей, наиболее перспективные материалы — с большим. Также в нескольких повторностях могут размещаться материалы различных компонентов ИББ, предполагаемые для обратного заполнения туннелей: бетон, тиксотропный шликер, бентонитовые гранулы и, возможно, другие перспективные материалы.

Длительность эксперимента 5—7 лет. При этом верхний нагреватель и окружающие его блоки будут извлечены уже через 3 года, что даст возможность получить первые результаты до полного завершения проекта. Расстояние между стенками скважины и блоками заполняется песком. В это пространство нагнетается грунтовая или модельная вода, которая быстро распределяется по песчаному прослою и обеспечивает равномерное набухание бентонита.

Тип бентонитового буфера и альтернативных материалов, показатели свойств и параметры уплотнения для получения оптимальных свойств (давление набухания, сопротивление сдвигу и т. д.) будут подобраны на предварительном этапе лабораторных исследований. Анализ имеющегося международного опыта и результаты предварительных исследований по компактированию российских бентонитов показывают, что технические требования к уплотнению, заложенные в технической документации (влажность 6 %), не позволят скомпактировать бентониты с заданными необходимыми свойствами и требуется проведение дополнительных расчетных и экспериментальных исследований.

Технические условия для компактирования (влажность, фракционный состав и др.) должны быть разработаны для каждого потенциального бентонитового буферного материала, так как определяются составом и строением исходного глинистого сырья.

В ходе реализации полномасштабного эксперимента в реальном времени будут получены показатели изменения температуры и влажности бентонита. Датчики температуры и влажности монтируются на разном расстоянии от нагревательного элемента, как показано на рис. 7, а конкретная конфигурация будет определяться толщиной бентонитового буфера. Сокращение толщины бентонитовых колец позволит сократить время эксперимента. В российской концепции на настоящий момент рассматривается толщина в 12 см, что, как показывает анализ международного опыта, не позволит обеспечить должную безопасность и трудновыполнимо согласно технологическим допускам в 5 см. В ходе эксперимента предполагается задействовать два макета с толщиной колец уплотненного бентонита 10 и 30 см. Во всех существующих концепциях захоронения РАО в кристаллических формациях рассматривается толщина бентонитового буфера в 35—40 см, которая в отдельных проектах увеличена до 60 см.

Изучение эволюции свойств материалов заполнения туннелей

В технической документации по ПГЗРО на настоящий момент рассматривается заполнение туннелей, после закрытия скважин с ВАО и размещения упаковок с РАО класса 2, материалом на основе цемента. В качестве альтернативного варианта для обратного заполнения туннелей и шахт возможно использование глинистого уплотненного материала или смесей на его основе. В этом случае, после размещения канистр с ВАО в вертикальные скважины, туннели заполняются предварительно уплотненными бентонитовыми блоками (как в проекте Швеции) или уплотненными пеллетами (как в проекте Финляндии). Оставшиеся зазоры между блоками и стенкой горной выработки заполняются бентонитовыми гранулами или пеллетами. Для оценки применимости этого способа предполагается проведение эксперимента по изучению процессов, происходящих при взаимодействии набухающих материалов заполнения туннелей и бетонных заглушек, анализ эволюции свойств материалов заполнения туннелей, отработка технологических решений.

В ходе эксперимента будет проведен анализ набухания материалов обратного заполнения туннелей — блоков уплотненных бентонитов/альтернативных материалов, смесей бентонит-песок и т. д., а также анализ воздействия материалов засыпки на бетонные и другие материалы ПГЗРО, воздействие поровой воды на взаимодействие материалов засыпки/заполнения туннелей и др.

Эксперимент по генерации и миграции газа через материалы ИББ

Другой тип экспериментов — анализ процессов генерации газа, его миграции через материалы инженерных барьеров, в первую очередь бентонит высокой плотности. Выделение газа,

например, в результате коррозии стальной канистры, микробиальной деятельности, разрушения кальцита, присутствующего в составе бентонита, а также при разогреве массива горных пород вблизи размещения канистр с ВАО может потенциально повлиять на качество буфера. При этом в буфере могут образоваться каналы проникновения газа. Если газ не может пройти через буфер, произойдет увеличение давления, которое может привести к механическому повреждению других барьерных элементов. Кроме того, газ может высушить бентонитовый буфер. Результаты данного эксперимента позволят определить потенциальные факторы газообразования и выявить влияние газа на возможные структурные преобразования монтмориллонита.

Схема эксперимента сходна с экспериментом по термоэволюции, отличие заключается в том, что для каждого конкретного буферного материала должен быть установлен индивидуальный макет. Внутрь образцов буфера помещаются нагреватели. Длительность экспериментов 5—10 лет. В блоки и в породу вокруг монтируются датчики температуры и давления газа. В ходе эксперимента должен проводиться непрерывный сбор проб газа, состав которого анализируется.

Для оценки скорости миграции газа и нарушений сплошности бентонитового буфера может быть инсталлирован отдельный эксперимент, в ходе которого газ нагнетается в имитатор контейнера с помощью насосов.

В задачи полномасштабных экспериментов входит:

- выявление влияния газа при коррозии металлического контейнера на свойства бентонитового буфера;
- анализ образования возможных путей миграции газа в бентонитовом буфере;
- анализ рисков возникновения повреждений в случае слишком низкой газопроницаемости буфера;
- анализ последствий потенциального обезвоживания бентонитового буфера при генерации газа;
- изучение и сопоставление механизмов воздействия газогенерации на свойства альтернативных буферных материалов.

Лабораторные эксперименты по изучению взаимодействия материалов ИББ в ПГЗРО

Важным этапом реализации полномасштабных работ в ПИЛ являются лабораторные эксперименты. Планируется проведение работ, посвященных изучению взаимодействия на границе материалов барьеров. В качестве контактных материалов выбраны образцы материала канистры (сталь, медь и др) и различные глинистые материалы — бентониты и альтернативные композиционные смеси (рис. 8). Эксперименты предполагается проводить в аэробных и анаэробных условиях для анализа влияния микробиальной активности на скорость и характер коррозии материалов ИББ.

Рис. 8. Схема лабораторных экспериментов по взаимодействию на границе бентонит — материал металлической канистры с ВАО/ОЯТ

В ходе работ планируется изучить процессы преобразования на границе барьерных материалов: взаимодействия бентонит — металлическая канистра (с использованием разных материалов), взаимодействия бентонит — бетон, влияние поровой воды, температуры и микробиальной активности на скорость и характер преобразований на контакте материалов друг с другом.

Определение величин давления набухания, коэффициентов фильтрации и диффузии

Одними из ключевых характеристик, определяющих изоляционные свойства бентонитового барьера, являются показатели давления набухания, коэффициенты фильтрации, диффузии и газопроницаемости.

Измерение давления набухания компактированных образцов бентонита осуществляется в жесткой камере известного объема, внутренние размеры которой соответствуют размеру

образца. Возникающее в камере при смачивании образца давление измеряется при помощи тензометрического датчика.

Измерение показателей проницаемости бентонитов и материалов на их основе является достаточно сложной задачей в связи с возможностью формирования вязко-пластичного режима фильтрации в порах образца. Поэтому для корректного лабораторного определения коэффициента фильтрации материалов инженерных барьеров на основе бентонита необходимо создавать реальные гидравлические градиенты, характерные для потенциальной территории строительства ПГЗРО. При таких условиях возникают большие временные и трудовые затраты, поскольку длительность одного эксперимента составляет месяцы. Проведение фильтрационных экспериментов с большими гидравлическими градиентами можно рассматривать как вариант развития наихудшего сценария. Методика определения коэффициента фильтрации основывается непосредственно на пропускании раствора через образец и измерении объема профильтровавшейся жидкости во времени.

Эксперимент по определению проницаемости можно проводить в приборе трехосного сжатия. В этом случае создается всестороннее изотропное обжатие образца бентонита, которое необходимо для моделирования давления в массиве и предотвращения пристеночной фильтрации. В связи с большой длительностью эксперимента и необходимостью исследования серии образцов для получения корректных результатов использование такого прибора является малоперспективным.

Определение коэффициента фильтрации возможно и косвенным способом, с использованием данных консолидационного эксперимента. Согласно теории фильтрационной консолидации динамика деформации грунта под нагрузкой связана со скоростью оттока порового раствора при условии полного водонасыщения [42].

Таким образом, для оценки ключевых свойств бентонитовых буферов за обозримое время и возможности проведения репрезентативного количества экспериментов различные группы исследователей, как правило, разрабатывают свое собственное оборудование [43—49]. Экспериментальные установки имеют одинаковые ключевые позиции, но различаются некоторыми конструктивными и техническими решениями.

Принципиально установка по определению показателей давления набухания, коэффициентов фильтрации и диффузии состоит из цилиндрического корпуса, один торец которого является неподвижным основанием с отверстиями для ввода/вывода раствора и поршня с верхнего торца (рис. 9). Исследуемые образцы имеют диаметр 30 мм и могут варьировать по толщине от 5 до 15 мм с шагом в 5 мм.

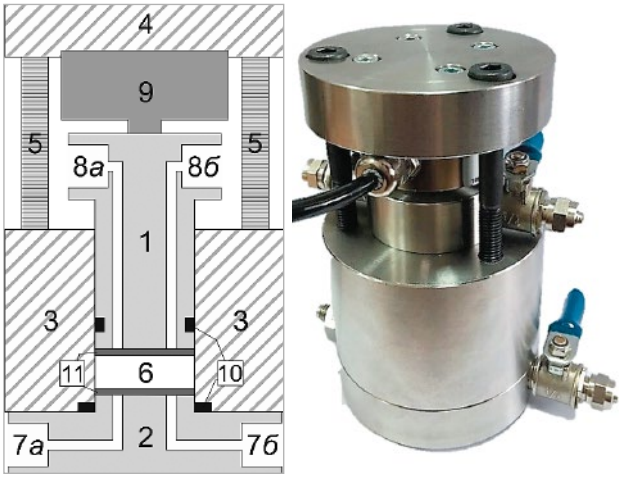

Рис. 9. Принципиальная схема опытной установки для создания образца компактированного бентонита и определения давления набухания, коэффициента фильтрации и коэффициента диффузии: 1 — поршень, 2 — основание, 3 — корпус, 4 — упорная пластина, 5 — болты, 6 — камера для образца, 7а, б — нижний вход и выход, 8а, б — верхний вход и выход, 9 — тензометрический датчик, 10 — уплотнительные кольца, 11 — металлический пористый фильтр

Определение давления набухания осуществляется путем равномерного промачивания исследуемого образца с нижнего торца в камере ограниченного объема, что обеспечивает получение более корректных данных по показателям давления набухания. Определение коэффициента фильтрации производится после завершения эксперимента по определению давления набухания. По окончании фильтрационного эксперимента, комбинируя описанные в литературе схемы диффузионных экспериментов, можно определять коэффициенты диффузии нейтральных и сорбируемых элементов, значения активной пористости и параметры сорбции.

На рис. 10 и 11 приведены графики зависимостей коэффициента фильтрации и давления набухания от плотности скелета компактированных бентонитов месторождения 10-й Хутор. Величины коэффициентов фильтрации в диапазоне плотностей скелета 1,46—1,82 г/см^3 варьируют от $5{,}34 \cdot 10^{-13}$ до $2{,}06 \cdot 10^{-14}$ м/с. Полученные данные коэффициентов фильтрации имеют экспоненциальную аппроксимацию вида $\ln(y) = -0{,}00903x - 14{,}778$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}93$. Давление набухания для

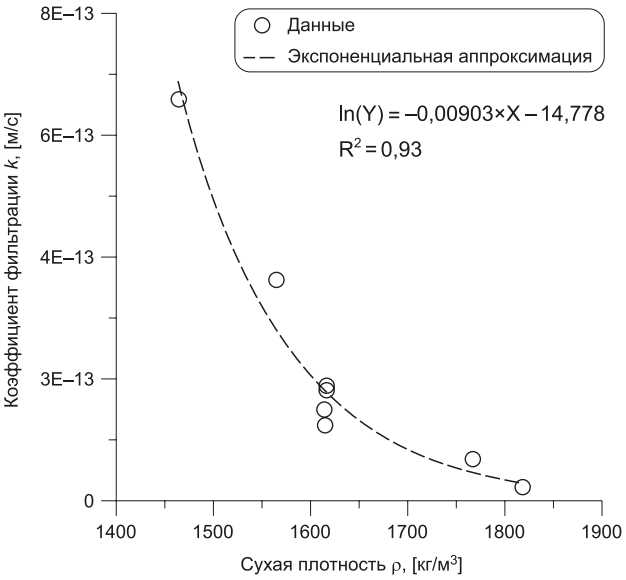

Рис. 10. Зависимость коэффициента фильтрации от плотности скелета компактированных образцов бентонита с месторождения 10-й Хутор (по результатам экспериментов на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова). Пунктирной линией приведен результат аппроксимации

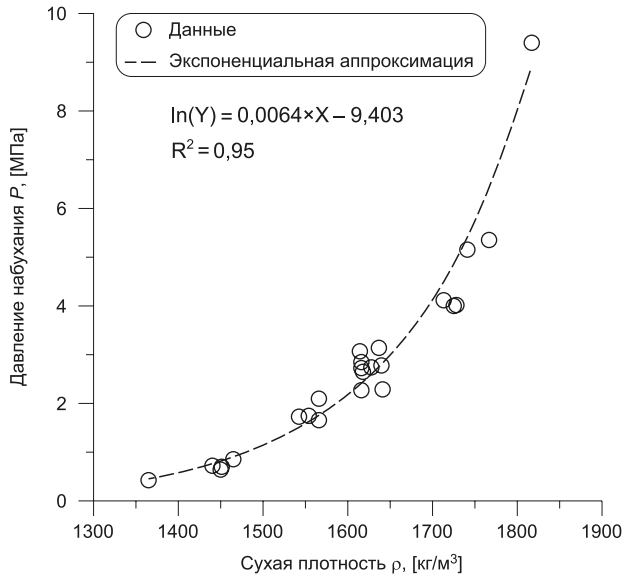

Рис. 11. Зависимость давления набухания от плотности скелета компактированных образцов бентонита с месторождения 10-й Хутор (по результатам экспериментов на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова). Пунктирной линией приведен результат аппроксимации

сухой плотности компактированных образцов 1,44—1,82 г/см³ составило от 0,52 до 9,39 МПа и хорошо описывается экспоненциальной зависимостью вида $\ln(y) = 0{,}0064x - 9{,}403$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}95$.

По данным этих предварительных экспериментов можно заключить, что в изученном диапазоне плотностей при контакте с дистиллированной водой такие характеристики, как водопроницаемость и давление набухания, для бентонитов месторождения 10-й Хутор зависят в первую очередь от плотности скелета компактированного образца, в то время как при содержании смектита около 70 % состав его ионно-обменного комплекса не оказывает большого влияния и может быть скомпенсирован задаваемой плотностью [7].

Лабораторные эксперименты по изучению генерации и миграции газа через материалы ИББ

Интенсивная газогенерация может привести к нарушению сплошности бентонитового буфера [50]. Постановка лабораторных экспериментов позволит лучше спроектировать полномасштабные эксперименты, описанные выше.

Лабораторные эксперименты по влиянию миграции газа на свойства компактированного бентонита будут проводиться при использовании описанной выше или подобной установки в аэробных и анаэробных условиях.

Для исследования вопросов газогенерации в условиях ПГЗРО необходимо изучение генерации газа за счет термического разложения кальцита, содержащегося в бентонитах, а также являющегося материалом заполнения трещин в кристаллическом массиве. Подобные работы на примере образцов кернов и выбранных бентонитов позволят оценить характер и скорости образования газа в условиях, приближенных к условиям ПГЗРО.

Важным вопросом в анализе газогенерации является десорбция CO_2, ранее сорбированного глинистыми минералами. Исследования показывают, что глинистые минералы могут адсорбировать на поверхности частиц и внутри межслоевого пространства до 1 ммоль/г CO_2 (соответствует 10 % массы $CaCO_3$ в глине) при 45—50 °С и давлении менее 20 МПа [51]. Десорбция газа происходит стадийно и обуславливается процессами дегидратации (70—200 °С) и дегидроксилации (550—650 °С). При этом было показано [39, 52], что количество десорбированного CO_2 при температуре до 100 °С составляет 23 %, а в диапазоне 140—200 °С — 42 %. На процессы десорбции CO_2 с поверхности частиц бентонита основное влияние оказывают его плотность и структурные особенности монтмориллонита [52], что определяет необходимость проведения экспериментов по сорбции и десорбции CO_2. Отдельным важным пунктом в оценке процессов газогенерации стоят эксперименты по изучению влияния микробиальной активности, которые подробно рассмотрены в работе [35].

Заключение

Исходя из многочисленных исследований, можно заключить, что бентонит является практически идеальным изоляционным природным материалом и поэтому был выбран как компонент ИББ во всех концепциях, где рассматривается строительство ПГЗРО в кристаллических массивах горных пород.

Было выявлено, что содержание монтмориллонита должно быть достаточно высоким для поддержания и сохранения давления набухания, обеспечения достаточно низкой водопроницаемости и необходимой прочности. При этом количество неблагоприятно влияющих примесных компонентов (пирита, кальцита, органического вещества и др.) должно быть максимально низким. Следует отметить, что единогласного мнения по поводу негативного влияния примесных компонентов во всем диапазоне эксплуатационных условий на настоящий момент не выработано и требуются детальные исследования при условиях, близких к ПГЗРО.

Характеристики и плотность выбранного эталонного бентонита могут отличаться для различных национальных концепций, но плотность сухого материала (плотность скелета), как правило, находится в интервале 1,45—1,75 г/см^3 для однородного буфера, размещаемого в ячейке для изоляции ВАО/ОЯТ.

Вокруг контейнеров с ВАО бентонит должен размещаться в виде компактированных (уплотненных) элементов, что позволит обеспечить необходимые изоляционные свойства ИББ на ближнюю и дальнюю перспективу.

Основными показателями, характеризующими изоляционные свойства глинистого буферного материала, являются: давление набухания, термостойкость, коэффициенты фильтрации и диффузии, структурная устойчивость к изменению внешних условий. Многочисленные исследования показали, что бентониты обладают достаточно высокими показателями сорбционных свойств для того, чтобы обеспечить фиксацию различных радионуклидов и тяжелых металлов, содержащихся в отходах.

Для обоснования безопасности ПГЗРО на ближнюю и дальнюю перспективу необходимо проведение экспериментов по изучению поведения материалов ИББ в натурных и лабораторных условиях, наиболее приближенных к условиям эксплуатации ПГЗРО.

В результате реализации экспериментов будет получена необходимая информация для понимания процессов, происходящих в материалах ИББ и для моделирования развития процессов эволюции ПГЗРО на ближнюю и дальнюю перспективу.

Благодарности

Авторы признательны М. С. Чернову, старшему научному сотруднику кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова за помощь в проведении микроструктурных исследований, Б. В. Покидько, доценту, старшему научному сотруднику кафедры коллоидной химии Естественнонаучного факультета МИТХТ им. М. В. Ломоносова за содействие в исследовании сорбционных свойств бентонитов.

Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 16-17-10270.

Литература

1. *Sellin P., Leupin O. X.* The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management — a review // Clay and Clay Minerals. 2013. Vol. 61. № 6. Pp. 477—498.

2. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В., Медянцев Н. В., Шамина А. В.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Под ред. И. И. Линге и Ю. Д. Полякова. — М.: Изд-во «Комтехпринт», 2015. 208 с.

3. *Dixon D., Sandén T., Jonsson E., Hansen J.* Backfilling of deposition tunnels: Use of bentonite pellets. SKB P-11-44. 2011. 46 c. URL: http://www.skb.com/publication/2308782/P-11-44.pdf.

4. Technical Report, SKB 2010. TR-10-15. Design, production and initial state of the buffer. Svensk Kärnbränslehantering AB December 2010, 89 p.

5. Technical Rreport, SKB 2009. TR-09-52. Assessment of backfill design for KBS-3V repository. Svensk Kärnbränslehantering AB October 2009, 125 p.

6. *Fries T., Claudel A., Weber H., Johnson L., Leupin O.* The Swiss concept for the disposal of spent fuel and vitrified HLW. International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository. 16—18 June 2008. Prague. URL: http://library.sinap.ac.cn/db/fangshexing201103//41025019.pdf.

7. *Kaufhold S., Dohrmann R.* Distinguishing between more and less suitable bentonites for storage of high-level radioactive waste // Clay Minerals. 2016. № 51 (2). Pp. 289—302.

8. *Birgersson M., Hedström M., Karnland O., Sjöland A.* Bentonite buffer: Macroscopic performance from nanoscale properties // Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste (Second Edition). 2017. Pp. 319—364.

9. *Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А.* Стратегический мастерплан исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 32—41.
10. *Karnland O., Olsson S., Nilsson U.* Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. Technical Report TR 06-30. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 2006. 112 p. URL: http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-06-30.pdf.
11. *Karnland O., Olsson S., Dueck A., Birgersson M., Nilsson U., Hernan-Håkansson T., Pedersen K., Nilsson S., Eriksen T. E., Rosborg B.* Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel, Technical Report TR-09-29. 2009. — 297 p.
12. *Wersin P.* LOT A2 test parcel. Compilation of copper data in the LOT A2 test parcel. Technical Report TR-13-17. 2013. 28 p.
13. Geological Disposal: A review of the development of bentonite barriers in the KBS-3V disposal concept. NDA Technical Note 21665941. 2014. 84 p.
14. *Ahonen L., Korkeakoski P., Tiljander M., Kivikoski H., Laaksonen R.* Quality Assurance of the Bentonite Material. Posiva Working Report 2008-33. Eurajoki, Finland. 2008. 126 c. URL: http://www.posiva.fi/files/526/WR_2008-33_web.pdf.
15. *Крупская В. В., Бирюков Д. В., Белоусов П. Е., Лехов В. А., Романчук А. Ю., Калмыков С. Н.* Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия // Радиоактивные отходы. 2018. № 2. С. 30—43.
16. *Белоусов П. Е.* Сравнительная характеристика месторождений высококачественных бентонитов России и некоторых зарубежных стран // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования. 2013. № 2. С. 55—61.
17. *Белоусов П. Е., Крупская В. В., Закусин С. В., Жигарев В. В.* Бентонитовые глины месторождения 10-й Хутор (республика Хакасия): особенности генезиса, состава и адсорбционных свойств // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 1. С. 135—143.
18. *Dohrmann R., Genske D., Karnland O., Kaufhold S., Kiviranta L., Olsson S., Plötze M., Sandén T., Sellin P., Svensson D., Valter M.* Interlaboratory CEC and exchangeable cation study of bentonite buffer materials: I. Cu(II)-triethylenetetramine method // Clays and Clay Minerals. 2012. Vol. 60. № 2. Pp. 162—175.
19. *Lorenz P., Meier L., Kahr G.* Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clays minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine // Clays and Clay Minerals. 1999. Vol. 47. № 3. Pp. 386—388.
20. ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности.
21. *Eriksson P.* Compaction properties of bentonite clay. Technical Report TR-16-16. — Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 2017. 41 p. URL: http://www.skb.com/publication/2488183/TR-16-16.pdf.
22. *Осипов В. И., Соколов В. Н.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС. 2013. — 576 с.
23. *Holmboe M., Wold S., Jonsson M.* Porosity investigation of compacted bentonite using XRD profile modeling // Journal of Contaminant Hydrology. 2012. Vol. 128. № 1—4. Pp. 19—32.
24. *Van Geet M., Volckaert G., Roels S.* The use of microfocus X-ray computed tomography in characterising the hydration of a clay pellet/powder mixture // Applied Clay Sciences. 2005. № 29. Pp. 73—87.
25. *Wang Q., Tang A.M., Cui Y.-J., Delage P., Gatmiri B.* Experimental study on the swelling behavior of bentonite/claystone mixture // Engineering Geology. 2012. № 124. Pp. 59—66.
26. *Karnland O.* Bentonite swelling pressure in strong NaCI solutions Correlation of model calculations to experimentally determined data. POSIVA report 98-01. 1998. 35 c. URL: http://www.posiva.fi/files/2666/POSIVA-98-01_web.pdf.
27. *Dixon D. A., Gray M. N., Graham J.* Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and USA // Proc. of the second Intern. Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan. 1996. Pp. 5—8.
28. *Pashley R. M., Israelachvili J. N.* Molecular layering of water in thin films between mica surfaces and its relation to hydration forces // Journal of Colloid and Interface Science. 1984. Vol. 101. № 2. Pp. 511—523.
29. *Hökmark H., Lönnqvist M., Fälth B.* THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydromechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm. 2010. 268 p. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/103/41103172.pdf?r=1&r=1.
30. *Börgesson L., Fredrikson A., Johannesson L.-E.* Heat conductivity of buffer materials. SKB Technical Report TR 94-29. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 1994. 63 p. URL: http://www.skb.com/publication/11249/TR94-29.pdf.
31. *Plötze M., Valter M.* Bentonite as barrier material — thermal conductivity of compacted bentonite. NAGRA Arbeitsbericht NAB 11-16 National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Switzerland. 2011.

32. *Huertas F., Fuentes-Cantilliana J. L., Rivas F., Linares J., Farina P., Jockwer N., Kickmaier W., Martinet M. A., Samper J., Alonso E., Elorza F. S.* Full scale engineered barriers experiment for a high level radioactive waste in crystalline host rock (FEBEX project): final report. EUR 19147 EN. European Commission, Brussels. 2000.
33. *Gu B. X., Wang L. M., Minc L. D., Ewing R. C.* Temperature effects on the radiation stability and ion exchange capacity of smectites // Journal of Nuclear Materials. 2001. № 297. Pp. 345—354.
34. *Pusch R., Karnland O., Lajudie A., Decarreau A.* MX 80 clay exposed to high temperatures and gamma radiation. SKB TR 93-03. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 1993. 54 p. URL: http://www.skb.com/publication/8678/TR93-03webb.pdf.
35. *Сафонов А. В., Болдырев К. А.* Исследование биогенных процессов в ПИЛ ПГЗРО в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100.
36. *Huang W., Longo J., Pevear D.* An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer // Clays and Clay Minerals. 1993. № 41. Pp. 162—177.
37. *Pytte A., Reynolds R.* The thermal transformation of smectite to Illite. Chapter 8. In: Thermal History of Sedimentary Basins. Hrsg: Naer M. C., McCulloh T. H., 133–140, Springer: New York, USA, 1989.
38. *Zakusin S. V., Krupskaya V. V., Dorzhieva O. V., Zhuhlistov A. P., Tyupina E. A.* Modification of the adsorption properties of montmorillonite by the thermochemical treatment // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. Т. 15. № 6. С. 874—883.
39. *Krupskaya V., Novikova L., Tyupina E., Belousov P., Dorzhieva O., Zakusin S., Kim K., Roessner F., Badetti E., Brunelli A., Belchinskaya L.* The influence of acid modification on the structure of montmorillonites and surface properties of bentonites // Applied Clay Science. 2019. Vol. 172. Pp. 1—10.
40. *Drits V. A., McCarty D. K., Zviagina B. B.* Crystal-chemical factors responsible for the distribution of octahedral cations over trans- and cis-sites in dioctahedral 2:1 layer silicates // Clays and Clay Minerals. 2006. Vol. 54. № 2. Pp. 131—152.
41. *Drits V. A., Besson G., Muller F.* An improved model for structural transformations of heat-treated aluminous dioctahedral 2:1 layer silicates // Clays and Clay Minerals. 1995. Vol. 43. № 6. Pp. 718—731.
42. *Necib S., Diomidis N., Keech P., Nakayama M.* Corrosion of carbon steel in clay environments relevant to radioactive waste geological disposals, Mont Terri rock laboratory (Switzerland) // Swiss Journal of Geosciences. 2017. Vol. 110. Pp. 329—342.
43. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации.
44. *Cavé L., Al T., Xiang Y., Vilks P.* A technique for estimating one-dimensional diffusion coefficients in low-permeability sedimentary rock using X-ray radiography: Comparison with through-diffusion measurements // Journal of Contaminant Hydrology. 2009. Vol. 103. № 1—2. Pp. 1—12.
45. *Cho W. J., Oscarson D. W., Hahn P. S.* The measurement of apparent diffusion coefficients in compacted clays: an assessment of methods // Applied Clay Science. 1993. Vol. 8. № 4. Pp. 283—294.
46. *Hume H. B., Banthia N.* Procedures and apparatus for measuring diffusion and distribution coefficients in compacted clays // Atomic Energy Canada Limited, AECL. 1993. № 10981. Pp. 1—40.
47. *Loon L. R. Van, Soler J. M., Bradbury M. H.* Diffusion of HTO, 36Cl- and 125I- in Opalinus Clay samples from Mont Terri: Effect of confining pressure // Journal of Contaminant Hydrology. 2003. Vol. 61. № 1—4. Pp. 73—83.
48. *Wang B.-T., Lee C.-P., Wu M.-C.., Tsai T.-L., Tsai S.-C., Hsu K.-C.* Novel method for analyzing transport parameters in through-diffusion tests // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 196. Pp. 125—132.
49. *Zhu C.-M., Ye W.-M., Chen Y.-G., ChenB., Cui Y.-J.* Influence of salt solutions on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite // Engineering Geology. 2013. Vol. 166. Pp. 74—80.
50. *Johannesson L.-E.* Manufacturing of buffer and filling components for the Multi Purpose Test. P-14-07. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 2014. 29 p. URL: http://www.skb.com/publication/2478195/P-14-07.pdf.
51. *Namiki K., Asano H., Takahashi S., Shimura T., Hirota K.* Laboratory gas injection tests of compacted bentonite buffer material for TRU waste disposal // Geological Society. London. Special Publications. 2014. V. 400. Pp. 521—529. doi.org/10.1144/SP400.27.
52. *Busch A., Bertier P., Gensterblum Y., Rother G., Spiers C. J., Zhang M., Wentinck H. M.* On sorption and swelling of CO_2 in clays on sorption and swelling of CO_2 in clays // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2016. Vol. 2. № 2. Pp. 111—130.
53. *Azzouz A., Nousir S., Platon N., Ghomai K., Shiao T. C., Hersant G., Bergeron J. Y., Roy R.* Truly reversible capture of CO2 by montmorillonite intercalated with soya oil-derived polyglycerols // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2013. Vol. 17. Pp. 140—147.

Информация об авторах

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, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Закусин Сергей Вячеславович, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: zakusinsergey@gmail.com.

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

Доржиева Ольга Валерьевна, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 3), e-mail: dorzhievaov@gmail.com.

Белоусов Петр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: pitbl@mail.ru.

Тюпина Екатерина Александровна, кандидат технических наук, доцент, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (125047, Москва, Миусская пл., д. 9), e-mail: tk1972@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

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. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.

BUFFER PROPERTIES OF BENTONITE BARRIER SYSTEMS FOR RADIOACTIVE WASTE ISOLATION IN GEOLOGICAL REPOSITORY IN THE NIZHNEKANSKIY MASSIF

Krupskaya V. V.[1,2], Zakusin S. V.[1,3], Lekhov V. A.[3], Dorzhieva O. V.[1], Belousov P. E.[1], Tyupina E. A.[4]

[1]Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[2]Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[3]Moscow State University, Geological Faculty, Moscow, Russia

[4]D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

Article received on January 14, 2020

The paper discusses the main properties of bentonite clays being considered as a component of safety barriers for radioactive waste isolation in geological repositories. It focuses on experimental and analytical studies providing the basic information needed for the selection of the most suitable material for the experiments that are to be carried out in the underground research laboratory and in the construction of the geological repository. The paper summarizes the required full-scale and supporting laboratory experiments that are to be implemented in the Underground Research Laboratory being constructed in the Nizhnekanskiy massif (Krasnoyarsk Region). The proposed experiments were based on the requirements and basic properties of bentonite being considered as the engineered barrier for radioactive waste disposal. As a result of laboratory and full-scale experiments the information required to assess the repository's evolution following its closure will be obtained.

Keywords: *bentonite, radioactive waste, engineered barriers, geological repository, bentonite properties, laboratory and full-scale experiments, Nizhnekanskiy massif.*

Acknowledgments

The authors are grateful to M. S. Chernov, Senior Researcher at the Department of Engineering and Ecological Geology, Geological Faculty, Moscow State University Lomonosov for help in conducting microstructural studies, B. V. Pokidko, Associate Professor, Senior Researcher at the Department of Colloid Chemistry, Faculty of Natural Sciences, Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies for assistance in the study of the sorption properties of bentonites.

The work was supported by the Russian Science Foundation, project № 16-17-10270.

References

1. Sellin P., Leupin O. X. The use of clay as an engineered barrier in radioactive–waste management – a review. *Clay and Clay Minerals,* 2013, vol. 61, no. 6, pp. 477—498.
2. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. et al. *Obzor zarubezhnyh praktik zahoroneniya OYAT i RAO* [Overview of foreign practices of SNF and RW disposal]. Edited by Linge I. I., Polyakov Yu. D. Moscow, Komtekhprint Publ., 2015. 208 p.
3. Dixon D., Sandén T., Jonsson E., Hansen J. *Backfilling of deposition tunnels: Use of bentonite pellets.* SKB P-11-44. 2011. 46 p. URL: http://www.skb.com/publication/2308782/P-11-44.pdf.
4. Technical Report, SKB 2010. TR-10-15. *Design, production and initial state of the buffer.* Svensk Kärnbränslehantering AB December 2010, 89 p.
5. Technical Rreport, SKB 2009. TR-09-52. *Assessment of backfill design for KBS-3V repository.* Svensk Kärnbränslehantering AB October 2009, 125 p.
6. Fries T., Claudel A., Weber H., Johnson L., Leupin O. The Swiss concept for the disposal of spent fuel and vitrified HLW. *Intern. Conf. Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository.* 16—18 June 2008. Prague. URL: http://library.sinap.ac.cn/db/fangshexing201103//41025019.pdf.
7. Kaufhold S., Dohrmann R. Distinguishing between more and less suitable bentonites for storage of high-level radioactive waste. *Clay Minerals,* 2016, no. 51 (2), pp. 289—302.
8. Birgersson M., Hedström M., Karnland O., Sjöland A. *Bentonite buffer: Macroscopic performance from nanoscale properties. Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste* (Second Edition). 2017. Pp. 319—364.
9. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategicheskij master-plan issledovanij v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, ekspluatacii i zakrytiya punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 32—41.
10. Karnland O., Olsson S., Nilsson U. *Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials.* Technical Report TR 06-30. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 2006. 112 p. URL: http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-06-30.pdf.
11. Karnland O., Olsson S., Dueck A., Birgersson M., Nilsson U., Hernan-Håkansson T., Pedersen K., Nilsson S., Eriksen T. E., Rosborg B. *Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project.* Final report on the A2 test parcel, Technical Report TR-09-29. 2009. 297 p.
12. Wersin P. *LOT A2 test parcel. Compilation of copper data in the LOT A2 test parcel.* Technical Report TR-13-17. 2013. 28 p.
13. *Geological Disposal: A review of the development of bentonite barriers in the KBS-3V disposal concept.* NDA Technical Note 21665941. 2014. 84 p.
14. Ahonen L., Korkeakoski P., Tiljander M., Kivikoski H., Laaksonen R. *Quality Assurance of the Bentonite Material.* Posiva Working Report 2008-33. Eurajoki, Finland. 2008. 126 c. URL: http://www.posiva.fi/files/526/WR_2008-33_web.pdf.
15. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. Primenenie prirodnyh glinistyh materialov dlya povysheniya urovnya yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti ob"ektov yadernogo naslediya [The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* 2018, no. 2 (3), pp. 30—43.
16. Belousov P. E. Sravnitel'naya harakteristika mestorozhdenij vysokokachestvennyh bentonitov Rossii i nekotoryh zarubezhnyh stran [Comparative characteristic of high-quality bentonite deposits of Russia and some foreign countries]. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya — RUDN Journal of Engineering researches,* 2013, no. 2, pp. 55—61.
17. Belousov P. E., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Zhigarev V. V. Bentonitovye gliny mestorozhdeniya 10-j Hutor (respublika Hakasiya): osobennosti genezisa, sostava i adsorbcionnyh svojstv [Bentonite clays from 10th Khutor deposite: features of genesis, composition and adsorption properties]. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya — RUDN Journal of Engineering researches,* 2017, vol. 18, no. 1, pp. 135—143.
18. Dohrmann R., Genske D., Karnland O., Kaufhold S., Kiviranta L., Olsson S., Plötze M., Sandén T.,

Sellin P., Svensson D., Valter M. Interlaboratory CEC and exchangeable cation study of bentonite buffer materials: I. Cu(II)-triethylenetetramine method. *Clays and Clay Minerals,* 2012, vol. 60, no. 2, pp. 162—175.
19. Lorenz P., Meier L., Kahr G. Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clays minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine. *Clays and Clay Minerals,* 1999, vol. 47, no. 3, pp. 386—388.
20. GOST 22733-2016. *Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimal'noj plotnosti* [State Standard 22733-2016. Soils. Laboratory method for determining of maximum density]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 12 p.
21. Eriksson P. *Compaction properties of bentonite clay.* Technical Report TR-16-16. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 2017. 41 p. URL: http://www.skb.com/publication/2488183/TR-16-16.pdf.
22. Osipov V. I., Sokolov V. N. *Gliny i ih svojstva. Sostav, stroenie i formirovanie svojstv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013. 576 p.
23. Holmboe M., Wold S., Jonsson M. Porosity investigation of compacted bentonite using XRD profile modeling. *Journal of Contaminant Hydrology,* 2012, vol. 128, no. 1—4, pp. 19—32.
24. Van Geet M., Volckaert G., Roels S. The use of microfocus X-ray computed tomography in characterising the hydration of a clay pellet/powder mixture. *Applied Clay Sciences,* 2005, no. 29, pp. 73—87.
25. Wang Q., Tang A. M., Cui Y.-J., Delage P., Gatmiri B. Experimental study on the swelling behavior of bentonite/claystone mixture. *Engineering Geology*, 2012, no. 124, pp. 59—66.
26. Karnland O. *Bentonite swelling pressure in strong NaCI solutions Correlation of model calculations to experimentally determined data.* POSIVA report 98-01. 1998. 35 p. URL: http://www.posiva.fi/files/2666/POSIVA-98-01_web.pdf.
27. Dixon D. A., Gray M. N., Graham J. *Swelling and hydraulic properties of bentonites from Japan, Canada and USA*. Proc. of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, 1996. Pp. 5—8.
28. Pashley R. M., Israelachvili J. N. Molecular layering of water in thin films between mica surfaces and its relation to hydration forces. *Journal of Colloid and Interface Science,* 1984, vol. 101, no. 2, pp. 511—523.
29. Hökmark H., Lönnqvist M., Fälth B. *THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydromechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites.* SKB TR-10-23. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm. 2010. 268 p. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/103/41103172.pdf?r=1&r=1.
30. Börgesson L., Fredrikson A., Johannesson L.-E. *Heat conductivity of buffer materials*. SKB Technical Report TR 94-29. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 1994. 63 p. URL: http://www.skb.com/publication/11249/TR94-29.pdf.
31. Plötze M., Valter M. *Bentonite as barrier material — thermal conductivity of compacted bentonite*. NAGRA Arbeitsbericht NAB 11-16 National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Switzerland. 2011.
32. Huertas F., Fuentes-Cantilliana J. L., Rivas F., Linares J., Farina P., Jockwer N., Kickmaier W., Martinet M. A., Samper J., Alonso E., Elorza F. S. *Full scale engineered barriers experiment for a high level radioactive waste in crystalline host rock (FEBEX project): final report.* EUR 19147 EN. European Commission, Brussels. 2000.
33. Gu B. X., Wang L. M., Minc L. D., Ewing R. C. Temperature effects on the radiation stability and ion exchange capacity of smectites. *Journal of Nuclear Materials,* 2001, no. 297, pp. 345—354.
34. Pusch R., Karnland O., Lajudie A., Decarreau A. *MX 80 clay exposed to high temperatures and gamma radiation. SKB TR 93-03.* Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 1993. 54 p. URL: http://www.skb.com/publication/8678/TR93-03webb.pdf.
35. Safonov A. V., Boldyrev K. A. Issledovanie biogennyh processov v PIL PGZRO v Nizhnekanskom massive [URL in the Nizhnekanskiy Massif: Studying Biogenic Processes under HLW Disposal Project]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste,* 2019, no. 2 (7), pp. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100.
36. Huang W., Longo J., Pevear D. An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. *Clays and Clay Minerals,* 1993, no. 41, pp. 162—177.
37. Pytte A., Reynolds R. *The thermal transformation of smectite to Illite.* Chapter 8. In: Thermal History of Sedimentary Basins. Hrsg: Naer M. C., McCulloh T. H., 133–140, Springer: New York, USA, 1989.
38. Zakusin S.V., Krupskaya V. V., Dorzhieva O. V., Zhuhlistov A. P., Tyupina E. A. Modification of the adsorption properties of montmorillonite by the thermochemical treatment. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy — Sorption and chromatography processes,* 2015, vol. 15, no. 6, pp. 874—883. (In English).
39. Krupskaya V., Novikova L., Tyupina E., Belousov P., Dorzhieva O., Zakusin S., Kim K., Roessner F., Badetti E., Brunelli A., Belchinskaya L. The influence of acid modification on the structure of montmorillonites and surface properties of bentonites. *Applied Clay Science,* 2019, vol. 172. Pp. 1—10.
40. Drits V. A., McCarty D. K., Zviagina B. B. Crystal-chemical factors responsible for the distribution of octahedral cations over trans- and cis-sites in dioctahedral 2:1 layer silicates. *Clays and Clay Minerals,* 2006, vol. 54, no. 2, pp. 131—152.

41. Drits V. A., Besson G., Muller F. An improved model for structural transformations of heat-treated aluminous dioctahedral 2:1 layer silicates. *Clays and Clay Minerals,* 1995, vol. 43, no. 6, pp. 718—731.
42. Necib S., Diomidis N., Keech P., Nakayama M. Corrosion of carbon steel in clay environments relevant to radioactive waste geological disposals, Mont Terri rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences,* 2017, vol. 110, pp. 329—342.
43. GOST 25584-2016. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya koefficienta fil'tracii* [State Standard 25584-2016]. Soils. Laboratory methods for determination of coefficient of hydraulic conductivity]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 20 p.
44. Cavé L., Al T., Xiang Y., Vilks P. A technique for estimating one-dimensional diffusion coefficients in low-permeability sedimentary rock using X-ray radiography: Comparison with through-diffusion measurements. *Journal of Contaminant Hydrology,* 2009, vol. 103, no. 1—2, pp. 1—12.
45. Cho W. J., Oscarson D. W., Hahn P. S. The measurement of apparent diffusion coefficients in compacted clays: an assessment of methods. *Applied Clay Science,* 1993, vol. 8, no. 4, pp. 283—294.
46. Hume H. B., Banthia N. Procedures and apparatus for measuring diffusion and distribution coefficients in compacted clays. *Atomic Energy Canada Limited,* AECL, 1993, no. 10981, pp. 1–40.
47. Loon L. R. Van, Soler J. M., Bradbury M. H. Diffusion of HTO, 36Cl- and 125I- in Opalinus Clay samples from Mont Terri: Effect of confining pressure. *Journal of Contaminant Hydrology,* 2003, vol. 61, no. 1—4, pp. 73—83.
48. Wang B.-T., Lee C.-P., Wu M.-C., Tsai T.-L., Tsai S.-C., Hsu K.-C. Novel method for analyzing transport parameters in through-diffusion tests. *Journal of Environmental Radioactivity,* 2019, vol. 196, pp. 125—132.
49. Zhu C.-M., Ye W.-M., Chen Y.-G., Chen B., Cui Y.-J. Influence of salt solutions on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite. *Engineering Geology,* 2013, vol. 166, pp. 74—80.
50. Johannesson L.-E. *Manufacturing of buffer and filling components for the Multi Purpose Test*. P-14-07. Svensk Kärnbränslehantering AB, Sweden. 2014. 29 p. URL: http://www.skb.com/publication/2478195/P-14-07.pdf.
51. Namiki K., Asano H., Takahashi S., Shimura T., Hirota K. Laboratory gas injection tests of compacted bentonite buffer material for TRU waste disposal. *Geological Society. London. Special Publications*. 2014, v. 400, pp. 521—529. doi.org/10.1144/SP400.27.
52. Busch A., Bertier P., Gensterblum Y., Rother G., Spiers C. J., Zhang M., Wentinck H. M. On sorption and swelling of CO_2 in clays on sorption and swelling of CO_2 in clays. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources,* 2016, vol. 2, no. 2, pp. 111—130.
53. Azzouz A., Nousir S., Platon N., Ghomai K., Shiao T. C., Hersant G., Bergeron J. Y., Roy R. Truly reversible capture of CO_2 by montmorillonite intercalated with soya oil-derived polyglycerols. *International Journal of Greenhouse Gas Control,* 2013, vol. 17, pp. 140—147.

Information about the authors

Krupskaya Victoria Valer'yevna, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyy per., Moscow, 119017, Russia); Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Zakusin Sergej Vyacheslavovich, Junior researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyy per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: zakusinsergey@gmail.com.

Lekhov Vladimir Alekseyevich, Researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, 119991, Russia), e-mail: v.lekhov@gmail.com.

Dorzhieva Ol'ga Valer'evna, Junior researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyy per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: dorzhievaov@gmail.com.

Belousov Petr Yevgen'yevich, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyy per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: pitbl@mail.ru.

Tyupina Ekaterina Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia), e-mail: tk1972@mail.ru.

Bibliographic description

Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. Buffer Properties of Bentonite Barrier Systems for Radioactive Waste Isolation in Geological Repository in the Nizhnekanskiy Massif. *Radioactive Waste,* 2020, no. 1 (10), pp. 35—55. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.