DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-43-58 УДК 624.131

КЛЮЧЕВЫЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛИНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПГЗРО НА УЧАСТКЕ «ЕНИСЕЙСКИЙ»

Е. А. Вознесенский[1,2], Ф. С. Карпенко[1], В. В. Крупская[2,3], С. В. Закусин[2,3]

[1]**Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Москва**

[2]**Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва**

[3]**Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва**

Статья поступила в редакцию 18 июня 2024 г.

В статье рассматриваются показатели свойств глинистых материалов, имеющих определяющее значение для геотехнических характеристик барьеров безопасности при захоронении радиоактивных отходов. При сопоставлении этих показателей в стандартных условиях эксперимента показаны преимущества бентонитовых глин и существенное снижение изолирующих свойств глинистых материалов при уменьшении содержания смектита и увеличении других компонентов, в том числе каолинита. Каолиновые глины показали наихудшие изоляционные свойства и не могут быть рекомендованы в качестве барьерного материала для изоляции РАО, добавка их в бентонитовые глины приводит к закономерному снижению показателей свойств.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, захоронение радиоактивных отходов, бентонит, каолин, барьерные смеси, вывод из эксплуатации, инженерные барьеры безопасности, ПГЗРО.*

Введение

Захоронение радиоактивных отходов (РАО) в геологических формациях представляет собой сложную комплексную задачу и часто ставит науку и технологии перед своего рода вызовом, которого не было ранее. Система инженерных барьеров безопасности (ИББ) (материалы изоляции РАО и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) — стеклянные, цементные и другие матрицы, материалы канистр/контейнеров/первичных упаковок, материал бетонных конструкций, глинистый материал гидроизолирующих и сорбционных слоев) должна сохранять функции обеспечения безопасности и эффективного удержания радионуклидов в пределах пунктов глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) в течение длительного времени (от 300 до 10 000 лет). Основными функциями безопасности глинистых компонентов ИББ являются ограничение контакта РАО, содержащих радионуклиды, с подземными водами и предотвращение или существенная задержка их миграции в окружающую среду. Данные требования могут быть обеспечены за счет использования в барьерах определенных видов глин, обладающих такими свойствами, как высокие сорбционная способность и набухаемость, низкая водопроницаемость, которые напрямую связаны с особенностями их состава и строения. Именно благодаря подобным свойствам в подавляющем большинстве развиваемых на настоящий момент зарубежных

концепций, рассматривающих вариант захоронения высокоактивных РАО (ВАО) в трещиноватых кристаллических массивах, в качестве материала, располагаемого между контейнерами с отходами и вмещающей горной породой или используемого для герметизации помещений подземных хранилищ (буферный слой), применяют бентонит или его смеси с песком [1]—[9]. В буферном слое ПГЗРО безальтернативно рассматривают уплотненные бентонитовые глины с высоким (70—90 %) содержанием монтмориллонита, а для обратного заполнения туннелей и шахт предлагается использовать уплотненный бентонитовый или смешанный материал (бентонит — песок, бентонит — измельченная порода, иные полиминеральные глины с содержанием монтмориллонита 40—70 %) в виде блоков, пеллет или засыпки из уплотненной крупки [10]. Следует отметить, что как таковые численные показатели характеристик глинистого материала буферного слоя ПГЗРО, планируемого на участке «Енисейский», в настоящий момент находятся на стадии проектирования и данная статья является важным вкладом в проработку требований к ним. С учетом российского опыта создания барьеров безопасности при выводе из эксплуатации (ВЭ) ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО), в которых использовались смеси на основе каолина и бентонита с добавками других глинистых материалов [11], [12], в этой работе были рассмотрены бентониты разных месторождений, каолины и их смеси, близкие по структуре к барьерным при ВЭ промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР).

Различия в свойствах глинистых материалов обусловлены особенностями состава и строения преобладающих в них глинистых минералов.

Смектиты — это группа слоистых алюмосиликатов, которые представлены слоями типа 2 : 1, состоящими из двух тетраэдрических сеток, заселенных катионами Si^{+4} и Al^{+3}, и октаэдрической сетки, заключенной между ними и содержащей Al^{+3}, Mg^{+2}, Fe^{3+} и Fe^{2+} [13]. Изоморфные замещения в структуре слоя приводят к возникновению отрицательного заряда, локализованного преимущественно в октаэдрической сетке, компенсация которого происходит за счет вхождения обменных гидратированных катионов (например, Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}). Монтмориллонит является одним из представителей диоктаэдрического ряда смектитов и наиболее широко распространен среди них в природных глинах. Самое высокое его содержание (60—70 % и более) достигается в бентонитовых глинах.

Каолинит отличается строением слоя, который представлен типом 1 : 1 и состоит из чередующихся сеток алюмосиликатных октаэдров и кремнекислородных тетраэдров. Ввиду крайне низкого количества изоморфных замещений заряд слоя близок к 0, между тетраэдрами и октаэдрами соседних слоев формируются жесткие водородные связи, в результате чего у этого минерала отсутствует доступное для связывания катионов межслоевое пространство. Каолиниты, так же как смектиты и слюдистые минералы,

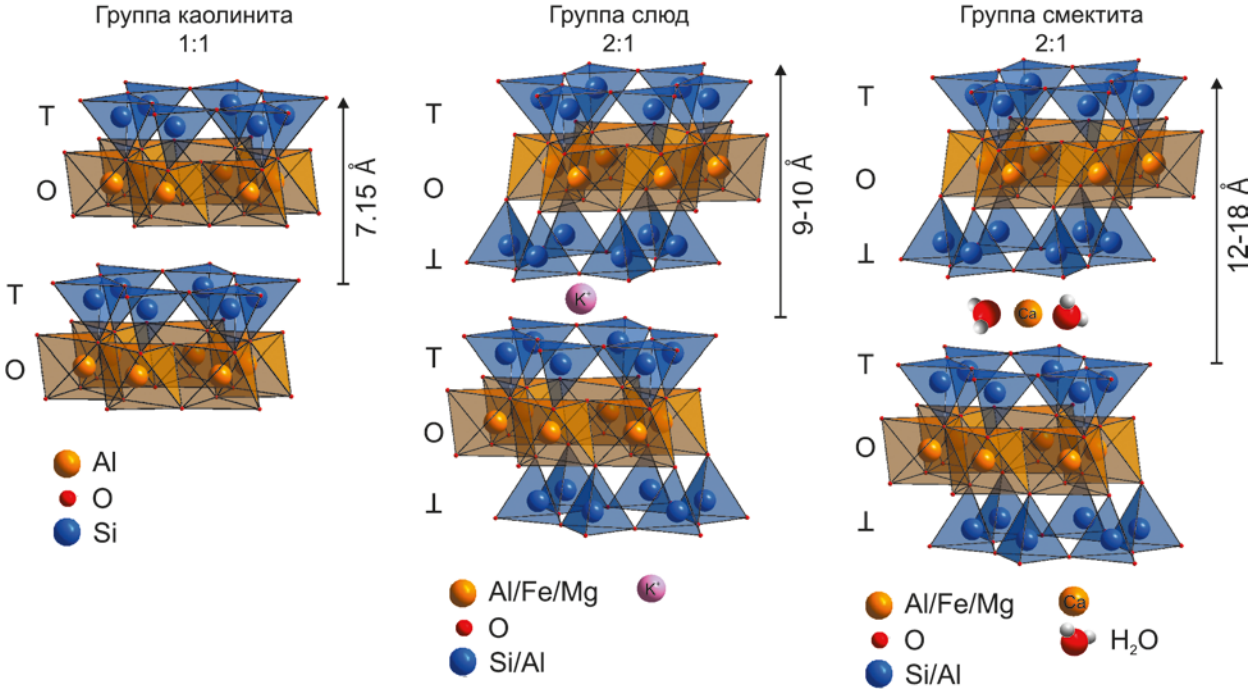

Рис. 1. Схематическое строение основных групп глинистых минералов

являются довольно широко распространенными компонентами природных глинистых пород. Наибольшие их содержания достигаются в каолиновых глинах, но при этом они не являются мономинеральными.

В изученных в данной работе глинистых материалах слюдистые минералы (слюды), которые относятся к одним из самых распространенных, обнаруживаются в примесных количествах. Они представляют собой слоистые силикаты структурного типа 2 : 1, т. е. слой состоит из двух тетраэдрических и одной октаэдрической сетки. Понятие «слюдистые минералы» объединяет группы истинных слюд (мусковит, флогопит, биотит и др.) и слюд с дефицитом межслоя (иллит, глауконит и др.) с зарядами слоя 0,85—1,00 и 0,60—0,85 соответственно.

Критерии пригодности глинистого сырья для компонентов ИББ, создаваемых на разных участках ПГЗРО, в данный момент разрабатываются и будут определяться особенностями выбранной концепции размещения пеналов с РАО в нем (горизонтальная выработка, скважины, туннельное размещение и др.). Тем не менее уже сегодня можно с уверенностью сказать, что к основным из них можно отнести следующие показатели:

- минеральный и гранулометрический составы, содержание примесей, которые могут сказаться на обеспечении функций безопасности ИББ;
- физические и физико-механические свойства и др.;
- изолирующие свойства (проницаемость, диффузионные и сорбционные характеристики, параметры порового пространства и др.);
- технологические возможности получения изделий/материалов с заданными свойствами и др.

Инженерно-геологическое изучение глинистых материалов является важным и необходимым этапом общих исследований, проводимых при обосновании их выбора для формирования компонентов ИББ. В первую очередь при этом должны изучаться их дисперсность и минеральный состав, отражающие кристаллохимическое строение преобладающих глинистых минералов, а также механические и физико-химические свойства, основными из которых являются деформируемость, прочность и проницаемость.

Определение гранулометрического и минерального составов — это базовые экспериментальные испытания, лежащие в основе всех дальнейших исследований, результаты которых дают характеристику состава и строения материалов и выступают основой их классифицирования.

Деформируемость и прочность являются базовыми свойствами глинистых материалов, необходимыми для эксплуатации ИББ в ПЗГРО, а также удерживающей и предохраняющей функций по отношению к контейнерам с РАО.

Деформационные свойства глинистых материалов характеризуют их сжимаемость — способность к сокращению порового пространства под действием нагрузки без разрушения материала. Деформируемость определяет предельное напряженное состояние, превышение которого приводит к развитию недопустимых деформаций. Основной из характеристик деформируемости глинистых материалов является величина модуля деформации. Эта величина необходима для определения возможных смещений конструкций ИББ и контейнеров с РАО в условиях ПЗГРО во времени.

Прочностные свойства служат основой для расчета несущей способности глинистых материалов ИББ и необходимы для оценки устойчивости барьера и возможности передачи напряжений контейнеру с РАО при потенциальных смещениях по разрывным нарушениям, при сейсмических и других воздействиях.

Проницаемость глинистых материалов является свойством, определяющим наряду с другими, диффузионными и сорбционными, изолирующую функцию ИББ. Необходимое условие функционирования буферного барьера ПГЗРО — замедление им фильтрации, т. е. движения влаги под действием градиента напора. Проницаемость материалов ИББ определяет возможность выполнения им этой функции.

Результаты проведенных в рамках данной работы исследований дают характеристику всех этих свойств глинистых материалов и могут служить основанием для выбора сырья для барьеров безопасности в реальных условиях ПЗГРО.

Материалы и методы исследований

Вышеперечисленные факторы определили направление проведенных исследований — изучение состава, строения и свойств различных потенциальных глинистых материалов для создания ИББ и закономерностей их изменения в зависимости от их начальной влажности и плотности. Они включали в себя анализ структуры, физических, механических (деформируемость и прочность) показателей и проницаемости материалов.

Исследования проводились на образцах бентонитовых и каолиновых глин нарушенного строения из различных месторождений и изготовленных на их основе смесей, близких по составу к барьерным глинистым материалам, используемым при ВЭ ЯРОО (табл. 1).

Таблица 1. Образцы глинистых материалов для лабораторных инженерно-геологических исследований

Лабораторный номер	Месторождение и состав смесей
	Бентонитовые глины
Б-1	10-й Хутор, пр. 98
Б-2	10-й Хутор, 6-й пласт, пр. 83
Б-3	Таганское, пр. 103
Б-4	Зырянское, пр. 104
Б-5	Даш-Салахлинское
	Каолиновые глины
К-1	Кантатское, пр. 84
К-2	Кыштымское
К-3	Просяновское, КФН-2
	Бентонит-каолиновые смеси
БК-1	бентонит – 15 %, каолинит – 82 %, вермикулит – 3 %, пр. 85
БК-2	бентонит – 30 %, каолинит – 70 %, пр. 86
БК-3	бентонит – 70 %, каолинит – 30 %, пр. 87

Определение гранулометрического состава грунтов осуществлялось, в соответствии с требованиями ГОСТ 12536–2014 [14], двумя методами: ситовым — для определения содержания крупнообломочной и песчаной фракций и ареометрическим — для определения количества пылеватой и глинистой фракций.

Определение физических свойств глинистых материалов проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 5180–2015 [15]. При подготовке образцов для испытаний и после их завершения определяли влажность (W) и гигроскопическую влажность ($W_{мгв}$) — методом высушивания до постоянной массы, плотность (ρ) — методом режущего кольца, плотность частиц (ρ_s) — пикнометрическим методом, предел пластичности (W_L) — методом раскатывания в шнур и предел текучести (W_P) материала — методом балансирного конуса Васильева. На основании полученных значений показателей свойств материалов расчетным путем были вычислены параметры строения образцов — плотность скелета материала (ρ_d), пористость (n), коэффициент пористости (e), степень водонасыщения (S_R), число пластичности (I_P) и показатель текучести (I_L).

В значительной степени достоверность определения физико-механических свойств материалов, полнота и объективность полученных результатов зависят от качества подготовки образцов для испытаний, что особенно важно с учетом того, что исходный материал ИББ представляет собой порошок разной крупности при его гигроскопической влажности. Таким образом, для проведения испытаний требуется специальное формирование и уплотнение образцов глинистых материалов при заданной влажности и плотности. Методика их подготовки может служить основой для разработки технологии формирования элементов конструкций ИББ. Основным важным фактором здесь выступает уплотняемость материала — его способность к сокращению объема порового пространства в определенных условиях в зависимости от строения и приложенных нагрузок.

Обычно для таких исследований применяется метод стандартного уплотнения (ГОСТ 22733-2016 [16]), заключающийся в уплотнении грунта с постоянной работой уплотнения и последовательном изменении влажности грунта. Проведенные испытания позволили определить показатели оптимальной влажности глинистых материалов, при которой они могут достигать максимальной плотности сложения. При этом оказалось, что целевые значения плотности скелета материала, составляющие около 1,7 г/см^3 [17], не могут быть получены с использованием метода стандартного уплотнения (рис. 2). Основной причиной этого является формирование вокруг частиц оболочек связанной и осмотической воды значимой толщины, препятствующей такому уплотнению.

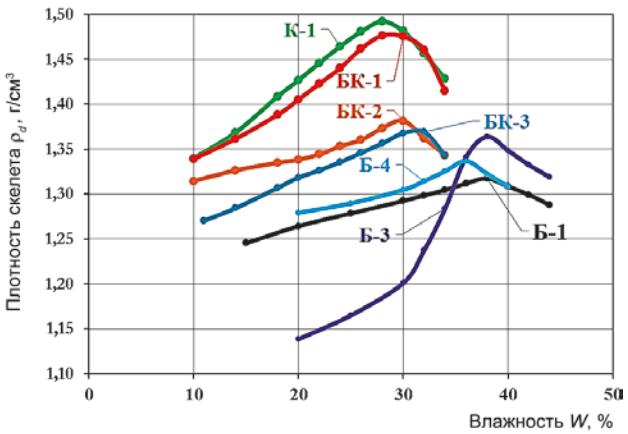

Рис. 2. Результаты испытаний глинистых материалов методом стандартного уплотнения (наименование материалов приведено в табл. 1)

В связи с этим для достижения необходимой плотности сложения (пористости) формирование образцов материалов проводилось методом статического нагружения, имитирующего прессование в ходе промышленного изготовления элементов ИББ, в воздушно-сухом, влажном и водонасыщенном состояниях.

Для изготовления образцов в воздушно-сухом состоянии необходимо расчетным путем, опираясь на известные влажность и плотность частиц исследуемого глинистого материала, определить требуемую массу его навески, которая помещалась в специальную обойму и уплотнялась до заданного объема, контролируемого датчиками деформации, статической нагрузкой в течение не менее суток. Критерием стабилизации служило отсутствие деформации образца при снятии нагрузки. Ее величина подбиралась опытным путем для каждого образца, при этом максимальное значение, при котором происходило уплотнение материала, достигало в некоторых случаях 1,2 МПа.

С целью изготовления образцов в водонасыщенном состоянии проводилось предварительное увлажнение массы воздушно-сухого материала до заданного состояния. Для этого навеска материала помещалась в эксикатор, в который добавлялось расчетное количество дистиллированной воды, и выдерживалась там в течение нескольких суток при регулярном перемешивании для равномерного распределения влаги. Массу материала и необходимое количество воды получали для каждого образца расчетным путем по результатам определения плотности частиц с учетом гигроскопической влажности материала. После увлажнения до требуемого уровня из него изготавливался образец для проведения испытаний аналогично тому, как это делалось для воздушно-сухих образцов. Влажность и плотность рассчитывались таким образом, чтобы плотность скелета материала соответствовала заданным значениям и при этом степень водонасыщения материала была равна или близка к 1,0. Максимальная нагрузка, при которой происходило формирование образцов, для водонасыщенных материалов достигала 700—800 кПа.

На изготовленных такими способами образцах из различных глинистых материалов проводились испытания для определения их деформационных и прочностных свойств и проницаемости.

Деформационные характеристики глинистых материалов исследовали методом трехосного сжатия по консолидированно-дренированной схеме в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.3–2020 [18]. Суть испытаний заключается в приложении к образцу грунта возрастающей осевой нагрузки при действии постоянной объемной нагрузки для получения характеристики деформируемости грунта — модуля общей деформации (E_o).

Основным методом определения прочностных свойств грунтов является метод одноплоскостного среза по фиксированной плоскости (ГОСТ 12248.1-2020 [19]), который позволяет определить: угол внутреннего трения (φ) и удельное сцепление (C). Сущность испытаний заключается в сдвиге нижней части образца относительно его верхней части касательной нагрузкой при одновременном воздействии на него нагрузкой, нормальной к плоскости среза. Результаты таких исследований являются основой для расчета несущей способности барьера безопасности.

Также определение прочностных свойств грунтов проводится методом одноосного сжатия по ГОСТ 12248.2–2020 [20], суть которого заключается в вертикальном нагружении образца грунта с возможностью его неограниченного бокового расширения до момента разрушения, что позволяет определить предел прочности на одноосное сжатие (σ_ρ). Такие исследования могут стать базовыми для разработки конструкции и при изготовлении барьеров безопасности.

Определение проницаемости глинистых материалов проводилось по нормативам Стандарта организации ИГЭ РАН СТО 93.020–2013/8 [21]. В процессе исследования вычислялся объем жидкости (воды), прошедшей через образец за единицу времени с напором, превышающим начальный градиент движения влаги. По результатам испытаний устанавливается величина коэффициента проницаемости материала. Указанные характеристики определяются в приборах компрессионного сжатия (одометрах), в условиях невозможности бокового расширения и набухания грунта.

Классификационное разделение исследованных материалов проводилось в соответствии с ГОСТ 25100–2020 [22].

Результаты исследований

Основной задачей проведенных исследований было получение комплексной характеристики инженерно-геологических свойств глинистых материалов и их зависимости от начальных условий — влажности и плотности сложения. Данные результаты должны послужить основой для обоснованного выбора предпочтительных материалов ИББ и параметров их состояния, при которых они обладают наилучшими инженерно-геологическими свойствами, что определяет наибольшую надежность работы барьера в реальных условиях эксплуатации.

Согласно проведенному анализу, все отобранные материалы подразделяются на 3 типа — бентонитовые глины, каолиновые глины и их смеси. Содержание смектита колеблется от 2—3 до 75—76 %, каолинита — от 0 до 93 % (табл. 2).

Таблица 2. Минеральный состав исследованных глинистых материалов

№	Название образца	См*	Каолинит	Иллит	Хлорит	Пирит	Кварц	КПШ**	Плагиоклаз	Кальцит	Сидерит	Анатаз	Кристобалит	Вермикулит Сл/См/ В ССМ***
1	Б-1	65,2	1,6	5,5	0,5		14,6	6,1	3,6	2,5		0,4		
2	Б-2	73,0		1,0		1,0	23,0			2,0				
3	Б-3	74,0	3,0	1,0			19,0	1,0		2,0				
4	Б-4	76,6					2,9	4,3	2,2	6,3		0,2	13,5	
5	Б-5	65,4	0,4	3,1	3,9		11,7	6,6	4,3	0,8	3,1	0,7		
6	К-1	19,1	52,5	3,0			22,5	0,7	1,4			0,8		
7	К-2	2.5	93.3	3.1			1.1							
8	К-3	1,2	95,2	2,6			1,0							
9	БК-1	22,0	49,0	2,5			17,9	4,0	1,7	0,5	0,3			2,1
10	БК-2	39,3	37,0	0,3			15,5	3,7	1,9	0,9	1,4			
11	БК-3	46,0	27,3	2,5			14,4	3,5	3,2	1,2	1,9			

* См — смектит-монтмориллонит
** КПШ — калиевый полевой шпат
*** смешанослойный иллит-смектит-вермикулит [23]

Таблица 3. Гранулометрический состав исследованных глинистых материалов

Лабораторный № образца	Содержание (%) частиц различного размера (мм)							
	>0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,002	<0,002
Б-1	0,1	0,3	1,4	12,0	26,2	16,2	3,5	40,3
Б-2	–	0,1	0,1	8,5	0,8	18,1	5,1	67,3
Б-3	–	–	–	7,7	1,7	4,8	1,8	84,0
Б-4	–	0,2	1,1	4,9	1,7	7,3	5,2	79,6
Б-5	–	0,6	1,6	11,7	0,9	7,4	0,9	76,9
К-1	0,1	0,2	0,3	6,4	0,8	7,1	3,3	81,8
К-2	–	–	–	4,3	20,8	20,4	6,8	47,7
К-3	–	–	–	7,8	6,4	11,9	6,8	67,1
БК-1	0,3	0,5	0,5	7,3	0,7	7,0	4,2	79,5
БК-2	–	–	0,2	5,1	3,3	7,7	6,0	77,7
БК-3	–	–	0,2	8,1	7,5	8,5	3,4	72,3

При этом стоит обратить внимание на то, что образцы К-2 и К-3 можно отнести к чистым каолинам и они характеризуются высоким количеством каолинита, в то время как каолины Кантатского месторождения (К-1) имеют довольно высокое содержание смектита, что следует учесть при рассмотрении их свойств. Все исследованные бентонитовые глины имеют высокие значения содержания смектита — от 65 до 76% с различным количеством примеси глинистых и неглинистых минералов.

Характерной особенностью всех исследованных материалов является повышенный уровень глинистой фракции (менее 0,002 мм) в их составе — 72—84% (табл. 3), частицы пылеватой и песчаной размерности находятся в заметно меньшем количестве (8—19% и 6—13% соответственно).

Практически все исследованные образцы представлены тяжелыми глинами (по ГОСТ 25100-2020), за исключением каолиновых материалов Кыштымского месторождения, которые классифицируются как легкие (табл. 4). Бентонитовые глины обладают наиболее высокими показателями пластичности, величина числа пластичности (I_P) для них изменяется от 40,7% в образце Б-1 до 103,2% в образце Б-5, в каолиновых глинах она находится в пределах от 17,4% (обр. К-3) до 36,8% (обр. К-1). Для бентонит-каолинитовых смесей этот показатель имеет промежуточные значения, закономерно изменяясь в зависимости от соотношения содержания в них бентонита и каолинита. Также для бентонитовых материалов в целом характерны более высокие показатели гигроскопической влажности.

Таблица 4. Физические и физико-химические свойства исследованных глинистых материалов

Лабораторный № образца	Гигроскопическая влажность $W_г$, %	Плотность частиц грунта ρ_s, г/см^3	Предел текучести W_L, %	Предел пластичности W_p, %	Число пластичности I_p
Б-1	10,1	2,64	81,6	40,9	40,7
Б-2	4,6	2,66	119,7	40,4	79,3
Б-3	10,5	2,71	129,4	42,3	87,1
Б-4	8,5	2,69	100,6	39,5	61,1
Б-5	9,1	2,64	161,6	58,4	103,2
К-1	3,4	2,66	67,5	30,7	36,8
К-2	1,3	2,61	60,0	38,1	21,9
К-3	1,3	2,61	49,1	31,7	17,4
БК-1	3,6	2,67	74,6	30,9	43,7
БК-2	3,8	2,65	79,9	34,3	45,6
БК-3	5,6	2,69	104,5	35,4	69,1

Показатели физических свойств образцов глинистых материалов в воздушно-сухом состоянии, т. е. с гигроскопической влажностью, и водонасыщенном состояниях представлены в табл. 5.

Таблица 5. Физические свойства образцов глинистых материалов, сформированных для испытаний

Лабораторный № образца	Влажность W, %	Плотность ρ, г/см^3	Плотность частиц грунта ρ_s, г/см^3	Плотность скелета грунта ρ_d, г/см^3	Коэффициент пористости e, д. е.	Пористость n, %	Степень водонасыщения S_r, д. е.	Показатель текучести I_p, д. е.
Б-1	21,0	2,06	2,64	1,70	0,554	35,7	1,00	–0,49
	25,0	1,99		1,59	0,658	39,7	1,00	–0,39
	29,0	1,93		1,50	0,765	43,3	1,00	–0,29
	33,0	1,88		1,41	0,868	46,5	1,00	–0,19
	10,1	1,87		1,70	0,554	35,7	0,48	–0,76
	10,1	1,76		1,60	0,652	39,4	0,41	–0,76
	10,1	1,65		1,50	0,762	43,2	0,35	–0,76
	10,1	1,54		1,40	0,887	47,0	0,30	–0,76
Б-2	21,0	2,07	2,66	1,71	0,559	35,8	1,00	–0,24
	25,0	2,00		1,60	0,663	39,8	1,00	–0,19
	29,0	1,94		1,50	0,769	43,5	1,00	–0,14
	34,0	1,87		1,40	0,906	47,5	1,00	–0,08
	4,6	1,78		1,70	0,563	36,0	0,22	–0,45
	4,6	1,67		1,60	0,666	40,0	0,18	–0,45
	4,6	1,57		1,50	0,772	43,6	0,16	–0,45
	4,6	1,46		1,40	0,906	47,5	0,14	–0,45

Окончание таблицы 5

Лабораторный № образца	Влажность W, %	Плотность ρ, г/см^3	Плотность частиц грунта ρ_s, г/см^3	Плотность скелета грунта ρ_d, г/см^3	Коэффициент пористости e, д. е.	Пористость n, %	Степень водонасыщения S_r, д. е.	Показатель текучести I_p, д. е.
Б-3	22,0	2,07	2,71	1,70	0,597	37,4	1,00	–0,23
	26,0	2,00		1,59	0,707	41,4	1,00	–0,19
	30,0	1,94		1,49	0,816	44,9	1,00	–0,14
	35,0	1,88		1,39	0,946	48,6	1,00	–0,08
	10,5	1,88		1,70	0,593	37,2	0,48	–0,37
	10,5	1,77		1,60	0,692	40,9	0,41	–0,37
	10,5	1,66		1,50	0,804	44,6	0,35	–0,37
	10,5	1,55		1,40	0,932	48,2	0,31	–0,37
Б-4	22,0	2,06	2,69	1,69	0,593	37,2	1,00	–0,29
	25,0	2,01		1,61	0,673	40,2	1,00	–0,24
	29,0	1,95		1,51	0,780	43,8	1,00	–0,17
	34,0	1,88		1,40	0,917	47,8	1,00	–0,09
	8,5	1,84		1,70	0,586	37,0	0,39	–0,51
	8,5	1,74		1,60	0,677	40,4	0,34	–0,51
	8,5	1,63		1,50	0,791	44,2	0,29	–0,51
	8,5	1,52		1,40	0,920	47,9	0,25	–0,51
Б-5	21,0	2,06	2,64	1,70	0,554	35,7	1,00	–0,36
	25,0	1,99		1,59	0,658	39,7	1,00	–0,32
	29,0	1,93		1,50	0,765	43,3	1,00	–0,28
	34,0	1,86		1,39	0,902	47,4	1,00	–0,24
	9,1	1,85		1,70	0,557	35,8	0,43	–0,48
	9,1	1,75		1,60	0,646	39,2	0,37	–0,48
	9,1	1,64		1,50	0,756	43,1	0,32	–0,48
	9,1	1,53		1,40	0,883	46,9	0,27	–0,48
К-1	21,5	2,06	2,67	1,70	0,575	36,5	1,00	–0,25
	25,0	2,00		1,60	0,669	40,1	1,00	–0,15
	29,0	1,94		1,50	0,775	43,7	1,00	–0,05
	34,0	1,88		1,40	0,908	47,6	1,00	0,09
	3,4	1,76		1,70	0,569	36,2	0,16	–0,74
	3,4	1,65		1,60	0,673	40,2	0,13	–0,74
	3,4	1,55		1,50	0,781	43,9	0,12	–0,74
	3,4	1,45		1,40	0,904	47,5	0,10	–0,74
К-2	20,0	2,06	2,61	1,71	0,524	34,4	1,00	–0,83
	24,0	1,99		1,60	0,626	38,5	1,00	–0,64
	28,0	1,93		1,51	0,731	42,2	1,00	–0,46
	33,0	1,87		1,40	0,861	46,3	1,00	–0,23
К-3	21,0	2,04	2,61	1,69	0,548	35,4	1,00	–0,61
	24,0	1,99		1,60	0,626	38,5	1,00	–0,44
	28,0	1,93		1,51	0,731	42,2	1,00	–0,21
	33,0	1,87		1,40	0,861	46,3	1,00	0,07
БК-3	21,5	2,07	2,69	1,70	0,58	36,7	1,00	–0,20
	25,0	2,01		1,61	0,67	40,2	1,00	–0,15
	29,0	1,95		1,51	0,78	43,8	1,00	–0,09
	34,0	1,88		1,40	0,92	47,8	1,00	–0,02

Результаты исследований деформационных свойств глинистых материалов (табл. 6 и рис. 3) показывают, что сжимаемость каолиновых глин существенно выше, чем бентонитовых. Величина модуля деформации (E_O) каолина изменяется от 20,3 до 75,9 МПа в зависимости от влажности и плотности сложения, в то время как для бентонитовых глин она составляет от 51,1 до 373,8 МПа.

Таблица 6. Изменение деформируемости глинистых материалов при различной плотности скелета

№ образца глинистого материала	Модуль общей деформации E_o, МПа		
	Плотность скелета грунта ρ_d, г/см^3		
	1,50	1,60	1,70
Б-1	70,0	141,4	239,6
Б-3	84,6	139,3	373,8
Б-4	51,1	141,7	270,1
К-1	20,3	43,8	75,9

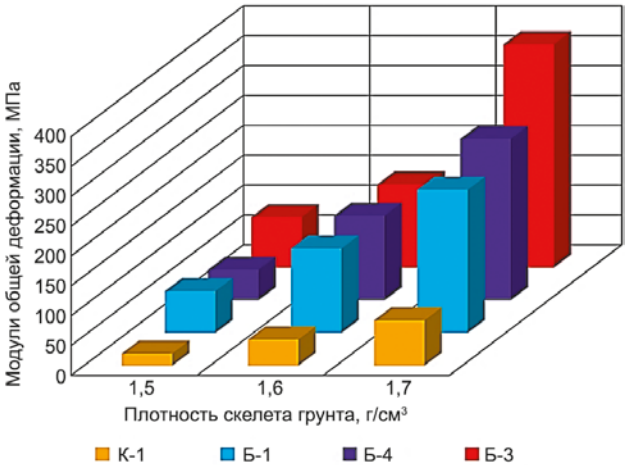

Рис. 3. Изменение деформируемости глинистых материалов при различной плотности скелета грунта

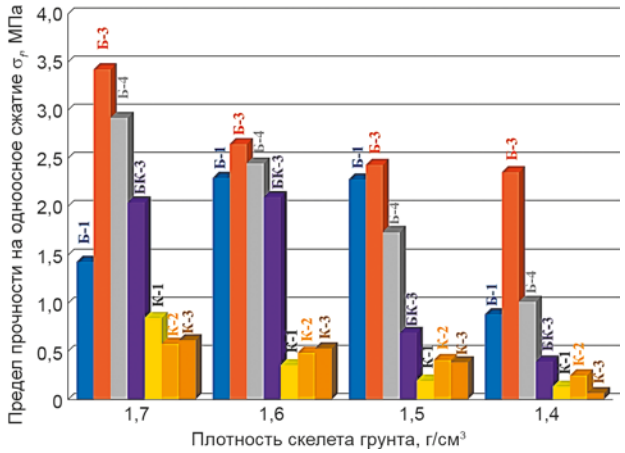

Рис. 4. Предел прочности глинистых материалов на одноосное сжатие при различной плотности скелета грунта

Результаты определения прочности потенциальных глинистых материалов ИББ, проводимого методом одноосного сжатия, приведены в табл. 7 и на рис. 4, а методом одноплоскостного среза — в табл. 8 и рис. 5.

Таблица 7. Предел прочности глинистых материалов на одноосное сжатие при различной плотности скелета грунта

№ образца глинистого материала	Предел прочности на одноосное сжатие σ_p, МПа							
	воздушно-сухой материал				водонасыщенный материал			
	плотность скелета грунта ρ_d, г/см^3							
	1,40	1,50	1,60	1,70	1,40	1,50	1,60	1,70
Б-1	0,08	0,11	0,19	0,49	0,89	2,28	2,30	1,43
Б-2	0,07	0,12	0,19	0,41	1,20	2,15	1,84	1,26
Б-3	*	0,18	0,28	0,39	2,36	2,43	2,65	3,42
Б-4	0,13	0,14	0,52	0,60	1,02	1,74	2,45	2,92
Б-5	*	*	0,42	0,52	*	0,32	1,42	1,16
К-1	0,02	0,02	0,07	0,21	0,13	0,20	0,36	0,85
К-2	–	–	–	–	0,25	0,41	0,49	0,58
К-3	–	–	–	–	0,07	0,39	0,53	0,62

* образец не держит форму

Таблица 8. Прочность глинистых материалов на срез при различной плотности скелета в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии

№ образца глинистого материала	Прочностные свойства материалов, в числителе — угол внутреннего трения φ°, в знаменателе — сцепление C, кПа							
	воздушно-сухой				полностью водонасыщенный			
	плотность скелета грунта ρ_d, г/см^3							
	1,40	1,50	1,60	1,70	1,40	1,50	1,60	1,70
Б-1	19/69	19/93	19/147	18/209	17/298	18/418	18/399	17/304
Б-2	17/113	17/123	17/133	17/152	18/239	18/260	19/295	18/263
Б-3	*	27/89	24/136	21/178	22/351	22/374	21/407	22/467
Б-4	17/88	18/103	18/156	19/160	19/247	19/340	20/392	19/492
Б-5	*	*	*	*	*	29/50	31/76	31/164
К-1	*	11/3	11/7	11/12	12/28	13/41	13/66	12/92

* образец разрушается при изготовлении

Проведенные исследования показывают, что бентонитовые глины в целом обладают существенно более высокой прочностью по сравнению с каолиновыми. Величина предела прочности на

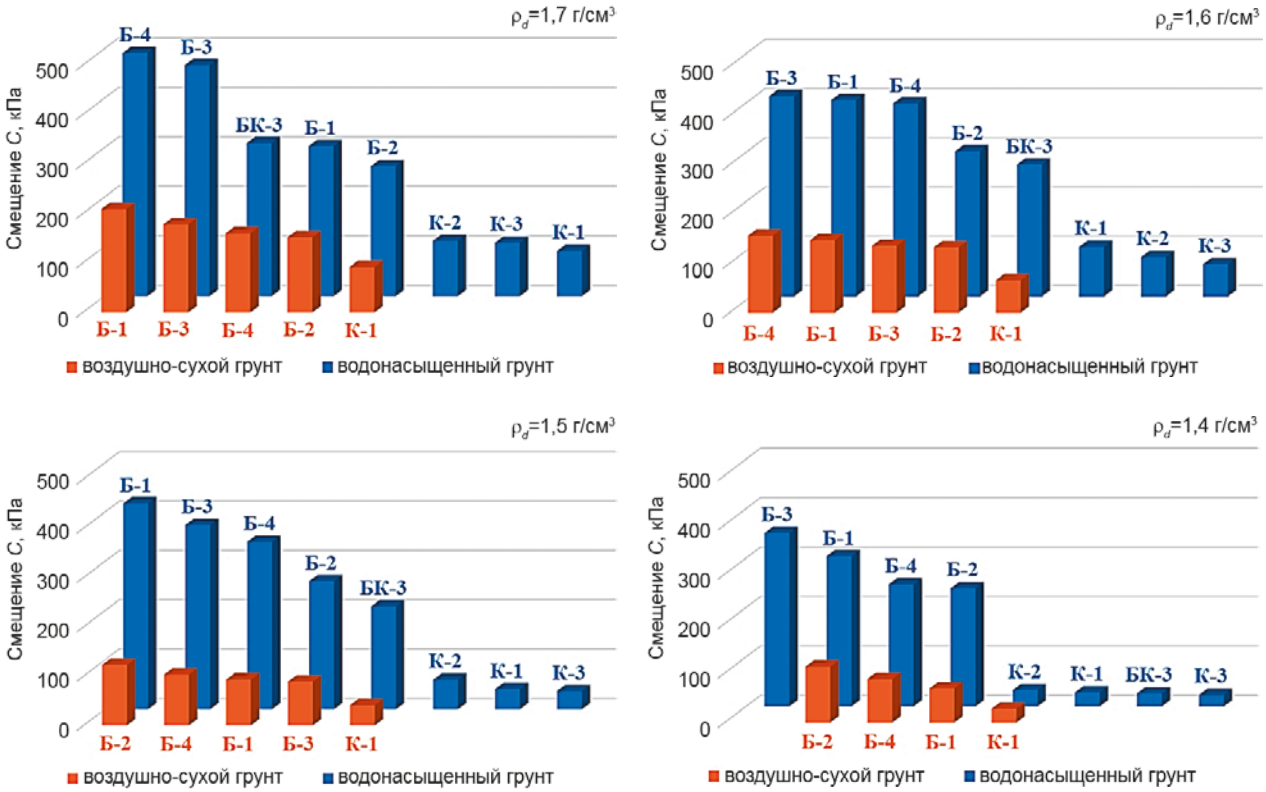

Рис. 5. Прочность глинистых материалов на срез при различной плотности скелета в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии

одноосное сжатие (σ_f) бентонитовых глин изменяется в пределах от 0,9 до 3,4 МПа, для каолиновых глин — от 0,07 до 0,8 МПа в зависимости от их состава, влажности и плотности сложения.

Изменение прочности на срез для всех глинистых материалов, исходя из содержания в них влаги и плотности скелета, выражается преимущественно в изменении сцепления. Величина угла внутреннего трения, определяющегося в основном природой поверхности частиц, при этом остается практически постоянной или меняется незначительно. Сцепление бентонитовых глин, связанное с их составом, влажностью и плотностью сложения, колеблется от 247 до 492 МПа, а каолиновых — от 23 до 112 МПа.

Глины Даш-Салахлинского месторождения по своим механическим свойствам отличаются от других бентонитовых глин, параметры их прочностных свойств близки к значениям, характерным скорее для каолиновых, а бентонит-каолинитовые смеси по своей прочности занимают промежуточное положение между бентонитовыми и каолиновыми материалами, и величина показателей их свойств зависит от соотношения содержания смектита и каолинита в составе.

Все исследованные материалы, независимо от структуры, обладают значительно меньшей прочностью в воздушно-сухом состоянии, чем при водонасыщенном.

Результаты исследования проницаемости (табл. 9, рис. 6) показывают, что каолины обладают существенно большей по сравнению с бентонитами водопроницаемостью, которая в зависимости от влажности и плотности сложения изменяется от $1{,}07 \cdot 10^{-8}$ до $1{,}87 \cdot 10^{-7}$ см/с, в то время как у бентонитовых глин этот показатель в аналогичных условиях составляет лишь $8{,}74 \cdot 10^{-10}$ — $2{,}14 \cdot 10^{-8}$ см/с. Также для бентонитовых глин характерны значительно более высокие значения начального градиента движения влаги — от 128 до 248, по сравнению с каолиновыми — от 60 до 65.

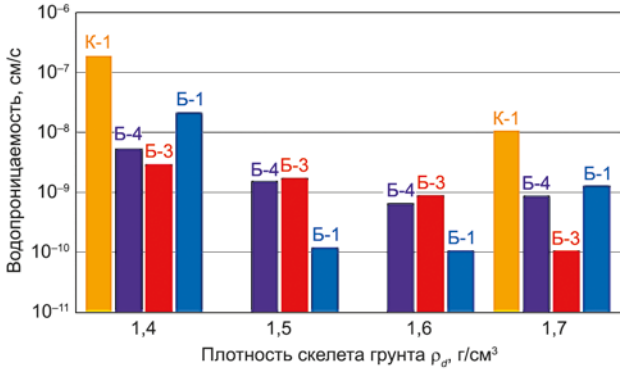

Рис. 6. Изменение водопроницаемости глинистых материалов при различной плотности скелета грунта

Таблица 9. Характеристики водопроницаемости глинистых материалов при различной плотности скелета

№ образца глинистого материала	Начальный градиент водопроницаемости				Водопроницаемость, см/с			
	плотность скелета ρ_d, г/см^3							
	1,40	1,50	1,60	1,70	1,40	1,50	1,60	1,70
Б-1	188	207	230	206	$2{,}14\cdot10^{-8}$	$1{,}19\cdot10^{-10}$	$1{,}07\cdot10^{-10}$	$1{,}28\cdot10^{-9}$
Б-3	186	204	206	248	$1{,}71\cdot10^{-9}$	$2{,}91\cdot10^{-9}$	$1{,}07\cdot10^{-10}$	$8{,}9\cdot10^{-10}$
Б-4	128	186	192	246	$5{,}34\cdot10^{-9}$	$1{,}53\cdot10^{-9}$	$6{,}5\cdot10^{-10}$	$8{,}74\cdot10^{-10}$
К-1	60	–	–	65	$1{,}87\cdot10^{-7}$	–	–	$1{,}07\cdot10^{-8}$

Обсуждение результатов исследований

Результаты проведенных исследований позволяют дать комплексную оценку свойств потенциальных глинистых материалов барьеров безопасности, а закономерности их проявления требуют своего специального анализа.

Согласно основному закону грунтоведения, свойства грунтов во многом определяются их составом и строением [24]. Глины являются полидисперсными системами, представления о строении и свойствах которых соответствуют фундаментальным положениям теорий ДЛФО (Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека), двойного электрического слоя (ДЭС), контактных взаимодействий П. А. Ребиндера и теории расклинивающего действия Б. В. Дерягина. Эти базовые теории коллоидной и физической химии были развиты применительно к глинистым дисперсным грунтам В. И. Осиповым, В. Н. Соколовым [25]—[29] и другими учеными. Дисперсная фаза глинистых дисперсных систем представлена минеральными частицами, а дисперсионная среда — водой с растворенными в ней солями, которая не только заполняет поровое пространство, но и находится в связи с минеральными частицами, формируя гидратные пленки вокруг них. При этом структурообразование во влажных глинах происходит при возникновении контактов между минеральными частицами, сформированными в результате взаимодействия сил притяжения и отталкивания и расклинивающего действия их гидратных пленок. В соответствии с положениями теории свойства глинистых систем определяются различными факторами, наиболее значимыми из которых являются минеральный состав и сила контактных взаимодействий между частицами, связанная с толщиной их гидратных пленок, зависящей от общего содержания влаги в глине.

Результаты проведенных исследований также показывают, что минеральный состав глин выступает важнейшим фактором, влияющим на их свойства и, следовательно, определяющим выбор материала для формирования конструкций глинистых барьеров безопасности. При этом бентонитовые глины обладают принципиальными преимуществами для применения их в качестве материала барьеров по сравнению с каолиновыми.

При прочих равных условиях сжимаемость каолиновых глин в 2—5 раз выше, показатели их прочностных свойств значительно ниже — до 8 раз, а проницаемости существенно больше — до 2 порядков величины, чем у бентонитовых глин. Добавление каолиновых глин даже в количестве 30 % приводит к уменьшению в 1,5—3 раза прочности исходных бентонитовых глинистых материалов, а дальнейшее увеличение их содержания в смеси закономерно приводит к еще большему ее снижению. Это показывает, что использование каолиновых глин в качестве материала ИББ как самостоятельно, так и в смеси с бентонитом не оправдано и нецелесообразно, так как приведет к ухудшению эксплуатационных качеств барьера безопасности.

Наилучшими свойствами среди исследованных бентонитовых глин обладают глины месторождений Таганское, Зырянское и 10-й Хутор, у бентонитов Даш-Салахлинского месторождения они хуже, что затрудняет возможность их применения в качестве материалов ИББ.

Как уже было отмечено выше, важным фактором, определяющим закономерности изменения прочности бентонитовых глин, является их влажность. При этом данная характеристика глин месторождения 10-й Хутор отличается от таковой для глин Таганского и Зырянского месторождений, что показано на рис. 7 и 8.

Прочности бентонитовых глин Таганского (обр. Б–3) и Зырянского (обр. Б–4) месторождений, минимальные в воздушно-сухом состоянии, в условиях водонасыщения достигают максимальных значений при влажности 22 %, но при дальнейшем увеличении влажности и соответствующем уменьшении плотности скелета и

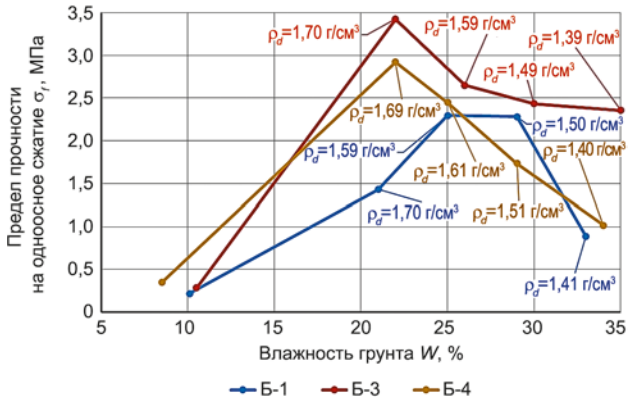

Рис. 7. Зависимость прочности бентонитовых глин на одноосное сжатие от влажности

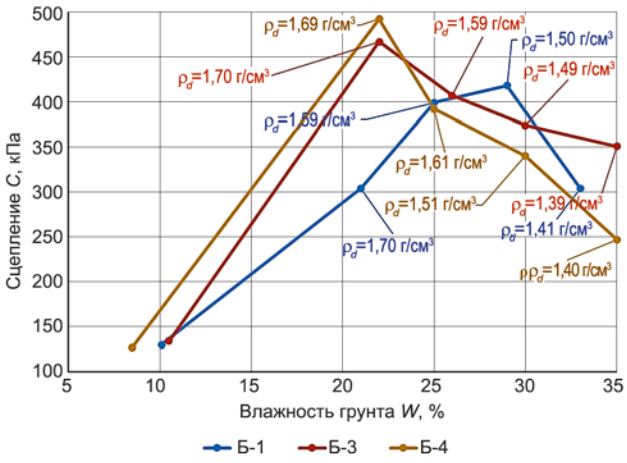

Рис. 8. Зависимость сцепления бентонитовых глин от влажности при срезе

повышении пористости — закономерно снижаются. В бентонитах месторождения 10-й Хутор (обр. Б–1) рост прочности при водонасыщении продолжается до достижения влажности 29% и только при их последующем водонасыщении начинает снижаться. Наиболее высоких показателей прочностных свойств глины Б–1 достигают при влажности 25—29% (соответственно, плотность скелета материала составляет 1,6—1,5 г/см^3, а пористость — 39,7—43,3%).

Такие особенности изменения прочностных свойств бентонитовых глин обусловлены их минеральным составом, а именно наибольшим количеством содержания минералов группы смектитов, важнейшей особенностью которых является способность к внутрикристаллическому набуханию. При низком общем содержании влаги в глинах основная ее часть поглощается слагающими их глинистыми минеральными частицами, что замедляет образование гидратных пленок вокруг них. Контакты в них при этом в полной мере не могут сформироваться, в результате чего они обладают меньшей прочностью. Гидратные пленки частиц в бентонитовых глинах месторождения 10-й Хутор полностью формируются по окончании процесса внутрикристаллического разбухания при влажности 25—29%, а при дальнейшем водонасыщении происходит их рост и увеличение толщины, что и приводит к ослаблению структурных связей между частицами и соответствующему снижению прочности. В бентонитовых глинах Таганского и Зырянского месторождений процесс роста гидратных пленок происходит раньше, уже при влажности 22—26%.

Такая закономерность изменения строения глин месторождения 10-й Хутор подтверждается результатами исследования их проницаемости, показанными на рис. 9.

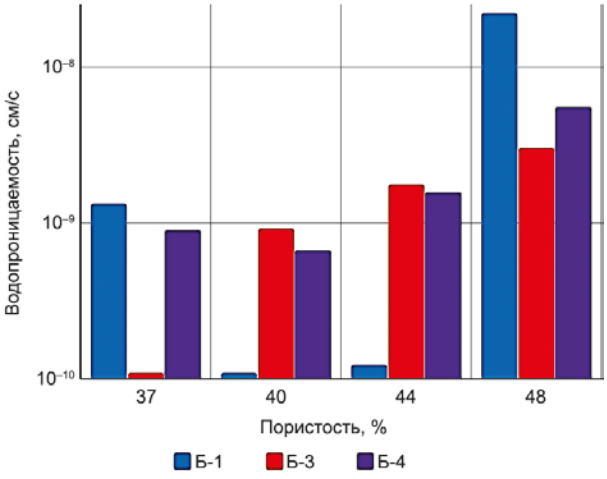

Рис. 9. Зависимость проницаемости бентонитовых глин от их пористости

В общем случае интенсивность миграции влаги должна расти при увеличении пористости грунта, однако в этих глинах ее повышение с 35% до 43% приводит к снижению проницаемости более чем на один порядок величины. Это происходит при влажности 25—29%, при которой, как было показано выше, в них происходит формирование гидратных пленок на поверхности минеральных частиц и миграция воды затрудняется противодействием давления пленок, препятствующего ей. Только при дальнейшем увеличении влажности происходит постепенное повышение скорости миграции влаги. Те же явления наблюдаются в глинах Таганского и Зырянского месторождений, но проявляются в меньшей степени.

Рассмотренные выше результаты показывают, что при внешнем физическом сходстве процессов миграция воды в бентонитовых глинах не связана с фильтрацией, проявление которой определяется ламинарным характером

движения влаги в поровом пространстве глинистого материала. В исследованных условиях строения глинистых материалов при плотности скелета 1,4—1,7 г/см^3, влажности 20—30% и пористости 35—49% миграция воды в них связана не с фильтрацией, а с физико-химическими процессами диффузии воды в гидратных пленках глинистых минеральных частиц. Это же подтверждают крайне высокие значения начального градиента движения влаги, характерные для бентонитовых глин.

Таким образом, в рассмотренных условиях в бентонитовых глинах происходит не фильтрация, а диффузия воды в гидратных пленках. При превышении гидростатическим давлением величины осмотического давления в гидратных пленках в условиях полного водонасыщения происходит выдавливание части воды, что и наблюдается при моделировании процесса миграции влаги и ошибочно рассматривается как фильтрация. Этот момент имеет важное практическое значение, так как в значительной степени определяет возможность переноса загрязнений водой через глинистый буфер.

Изменение деформационных свойств глинистых материалов закономерно зависит от плотности их сложения, т. е. исходной величины объема порового пространства, в уменьшении которого и заключается процесс сжимаемости грунта. Величина модуля общей деформации закономерно повышается для каждого глинистого материала при снижении его влажности и увеличении плотности, а именно уменьшении начальной пористости. Необходимо отметить, что эти закономерности определены для глинистых материалов, содержащих влагу в количестве, достаточном для формирования гидратных пленок глинистых частиц и образования контактов между ними, что было описано выше.

Рассмотренные закономерности изменения свойств глин определяют показатели их строения, влажности, плотности и, соответственно, такие характеристики, как плотность скелета грунта, пористость, деформируемость и проницаемость, при которых они обладают наиболее высокими показателями прочности, деформируемости, проницаемости. В то же время полученные данные позволяют найти для каждой разновидности глинистого материала диапазон возможных изменений начальных влажности и плотности, при которых глины обладают свойствами, достаточными для формирования элементов ИББ и безопасной эксплуатации барьеров в условиях ПЗГРО.

Несомненно, строение и свойства глинистых материалов барьеров могут изменяться в процессе эксплуатации ИББ в результате различных процессов, что требует специального изучения в ходе дальнейшей работы.

Заключение

Эффективность выполнения инженерным барьером безопасности своих буферных функций в первую очередь определяется физико-химическими свойствами его материала, причем принято считать, что прежде всего его сорбционной способностью, которая является важной, но далеко не единственной характеристикой, определяющей выбор глинистого материала. Важное значение для устойчивой работы ИББ в реальных условиях ПЗГРО, тем более в течение длительного времени, имеют его физические, механические и физико-химические свойства в комплексе. Для их определения должны проводиться специальные грунтоведческие исследования потенциальных материалов ИББ.

Проведенные исследования потенциальных материалов инженерных барьеров безопасности захоронения РАО позволяют дать характеристику их свойств, закономерностей их изменения и обосновать выбор материалов, предпочтительных для формирования глинистых элементов ИББ.

Наилучшими свойствами (пластичность, прочность, деформируемость, водопроницаемость) среди изученных материалов обладают бентонитовые глины месторождений Таганское, Зырянское и 10-й Хутор. Каолиновые глины по сравнению с ними имеют существенно худшие характеристики, а добавление каолина в бентонитовый материал приводит к ухудшению свойств, что показывает нецелесообразность его применения в качестве материала ИББ, в том числе в виде добавок. Свойства бентонитовых глин зависят от их строения и состояния в компактированном виде.

Ведущим фактором, влияющим на деформационные свойства глинистых материалов, выступает плотность их сложения. Увеличение пористости и уменьшение плотности скелета вызывает закономерное снижение величины модуля деформации и соответствующее повышение сжимаемости глин.

Основным действующим фактором, определяющим закономерности изменения прочности бентонитовых глин, является их влажность. При этом характер изменения свойств глин месторождения 10-й Хутор отличается от глин Таганского и Зырянского месторождений, что связано с особенностями их строения и состава: они достигают более высоких показателей прочности

при несколько повышенном содержании влаги (25—29 % и 22—26 % соответственно) и низкой плотности сложения скелета грунта (1,6—1,5 г/см^3 и 1,7—1,6 г/см^3 соответственно).

Миграция влаги в бентонитовых глинах при заданных характеристиках материала (плотность скелета — 1,4—1,7 г/см^3, влажность — 20—30 %, пористость — 35—49 %) не связана с фильтрацией воды, которая в этих условиях не может происходить, а определяется физико-химическими процессами диффузии влаги в гидратных пленках глинистых минеральных частиц. Эти процессы имеют важное значение при рассмотрении вопросов возможного переноса водой загрязнений через буферные барьеры безопасности.

Благодарности

Исследования реализуются в рамках «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров («Стратегического мастер-плана исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве», Красноярский край), утвержденной Госкорпорацией «Росатом», с горизонтом планирования до 2030 г. Исследования минерального состава проводились при поддержке проекта РНФ № 22-17-00252

Литература

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

2. Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste: IAEA Tech. Rep. Ser. № 319. 1990.

3. Performance of Engineered Barriers in Deep Geological Repositories: IAEA Tech. Rep. Ser. № 342. 1992.

4. *Sellin P., Leupin O. X.* The Use of Clay as an Engineered Barrier in Radioactive-Waste Management — A Review // Clays and Clay Mineral. 2013. Vol. 61. Iss. 6. Pp. 477—498. DOI: 10.1346/CCMN.2013.0610601.

5. *Pusch R., Knutsson S., Al-Taie L., Mohammed M. H.* Optimal ways of disposal of highly radioactive waste // Natural Science. 2012. Vol. 4. Pp. 906—918. DOI: 10.4236/ns.2012.431118.

6. *Brookins D. G.* Geochemical aspects of Radioactive Waste disposal. — New-York, Springer-Verlag, 1984. 347 p.

7. *Chapman N. A., McKinley I. G.* The geological disposal of nuclear waste. — Chichester, Willey and Son, 1988. 280 p.

8. Preparatory Safety Assessment, Conceptual model description of the reference case, External Report, SCK•CEN-ER-215, 12/Ewe/P-42, September 2012.

9. Geological Disposal: Study of Recent Post-Closure Safety Cases, NDA Report no. NDA/RWMD/109, March 2014.

10. Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU. Technical Report TR-14-04. — Sweden, Stockholm, SKB, 2014. 237 p.

11. *Павлюк А. О. и др.* Опыт вывода из эксплуатации промышленного уран-графитового реактора ЭИ-2 АО «ОДЦ УГР» // Материалы V Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск, 13—16 сентября 2016 г. С. 508—512.

12. *Мартынов К. В., Захарова Е. В., Дорофеев А. Н., Зубков А. А., Прищеп А. А.* Использование глинистых материалов для создания защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 39—53. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-39-53.

13. *Guggenheim S. et al.* Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: Report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) Nomenclature Committee for 2006 // Clay Minerals. 2006. Vol. 41. No. 4. Pp. 863—877. DOI: 10.1180/0009855064140225.

14. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. — М. : Стандартинформ, 2015. 22 с.

15. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М. : Стандартинформ, 2016. 23 с.

16. ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. — М. : Стандартинформ, 2016. 15 с.

17. *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.

18. ГОСТ 12248.3–2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. — М. : Стандартинформ, 2020. 33 с.

19. ГОСТ 12248.1–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. — М. : Стандартинформ, 2020. 21 с.

20. ГОСТ 12248.2–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия. — М. : Стандартинформ, 2020. 11 с.

21. Стандарт организации СТО 93.020-2013/8. Лабораторные определения параметров

проницаемости дисперсных грунтов методом трехосного сжатия.
22. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. — М. : Стандартинформ, 2020. 41 с.
23. *Семенкова А. С., Ильина О. А., Крупская В. В., Закусин С. В., Доржиева О. В., Покидько Б. В., Романчук А. Ю., Калмыков С. Н.* Сорбция радионуклидов на глинистых минералах — компонентах инженерных барьеров безопасности // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2021. Т. 62. № 5. С. 425—434.
24. *Трофимов В. Т., Королёв В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р. С.* Грунтоведение / Под ред. В. Т. Трофимова. — 6-е изд., переработ. и доп. — М. : Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
25. *Осипов В. И.* Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. — М. : Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
26. *Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А.* Микроструктура глинистых пород / Под ред. Е. М. Сергеева. — М. : Недра, 1989. 210 с.
27. *Осипов В. И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. — М. : ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
28. *Осипов В. И., Соколов В. Н.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. — М. : ГЕОС, 2013. 576 с.
29. *Соколов В. Н.* Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 18—41.

Информация об авторах

Вознесенский Евгений Арнольдович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы); директор, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (101100, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2), e-mail: eugene@geoenv.ru.

Карпенко Федор Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (101100, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2), e-mail: kafs08@bk.ru.

Крупская Виктория Валерьевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35); ведущий научный сотрудник, Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Закусин Сергей Вячеславович, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35); ведущий инженер, Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы), e-mail: zakusinsergey@gmail.com.

Библиографическое описание статьи

Вознесенский Е. А., Карпенко Ф. С., Крупская В. В., Закусин С. В. Ключевые геотехнические характеристики глинистых материалов для инженерных барьеров безопасности ПГЗРО на участке «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2024. № 3 (28) С. 43—58. DOI: 10 25283/2587-9707-2024-3-43-58.

KEY GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF CLAY MATERIALS FOR ENGINEERED SAFETY BARRIERS OF THE DEEP GEOLOGICAL RW DISPOSAL FACILITY AT THE YENISEISKIY SITE

Voznesensky E. A.[1,3], Karpenko F. S.[1], Krupskaya V. V.[2,3], Zakusin S. V.[2,3]

[1]Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

[3]Geological faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Article received on June 18, 2024

This article considers the properties and the performance indicators of clay materials crucial for the geotechnical characteristics of clay-based safety barriers in radioactive waste (RW) disposal facilities. The study compares

these parameters under standard experimental conditions demonstrating the advantages of bentonite clays and considerable deterioration in the insulating properties of clay materials observed along with a decline in smectite content and higher concentrations of other components, including kaolinite. Kaolin clays showed the worst isolating properties and cannot be recommended as a barrier material for RW disposal as their addition to bentonite clays leads to regular deterioration of its properties.

Keywords: *radioactive waste, radioactive waste disposal, bentonite, kaolin, barrier mixtures, decommissioning, engineered safety barriers, deep RW disposal facilities.*

Acknowledgments

The research is being implemented within the framework of the Comprehensive Research Program Demonstrating the Long-Term Safety of RW Disposal and Streamlining the Performance Indicators (Strategic Master Plan for Research Implemented to Demonstrate the Safety of DGR Construction, Operation and Closure in the Nizhnekanskiy Rock Mass (Krasnoyarsk region)) approved by Rosatom State Corporation with a planning horizon up to 2030. The mineral composition studies were supported under the project № 22-17-00252 of the Russian Science Foundation.

References

1. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. et al. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [Overview of International SNF and RW Disposal Practices]. Moscow, Komtechprint Publ., 2015. 208 p.
2. Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste: IAEA Tech. Rep. Ser. No. 319. 1990.
3. Performance of Engineered Barriers in Deep Geological Repositories: IAEA Tech. Rep. Ser. No. 342. 1992.
4. Sellin P., Leupin O. X. The Use of Clay as an Engineered Barrier in Radioactive-Waste Management — A Review. *Clays and Clay Mineral,* 2013, vol. 61, iss. 6, pp. 477—498. DOI: 10.1346/CCMN.2013.0610601.
5. Pusch R., Knutsson S., Al-Taie L., Mohammed M. H. Optimal ways of disposal of highly radioactive waste. *Natural Science,* 2012, vol. 4, pp. 906—918. DOI: 10.4236/ns.2012.431118.
6. Brookins D. G. Geochemical aspects of Radioactive Waste disposal. New-York, Springer-Verlag Publ., 1984. 347 p.
7. Chapman N. A., McKinley I. G. The geological disposal of nuclear waste. Chichester, Willey and Son Publ., 1988. 280 p.
8. Preparatory Safety Assessment, Conceptual model description of the reference case, External Report, SCK•CEN-ER-215, 12/Ewe/P-42, September 2012.
9. Geological Disposal: Study of Recent Post-Closure Safety Cases, NDA Report no. NDA/RWMD/109, March 2014.
10. Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU. Technical Report TR-14-04. Sweden, Stockholm, SKB, 2014. 237 p.
11. Pavliuk A. O. et al. Opyt vyvoda iz ekspluatatsii promyshlennogo urangrafitovogo reaktora EI-2 AO "ODTS UGR" [Production Uranium-Graphite Reactor EI-2 at PDC UGR: Decommissioning Experience]. *Proceedings of the V International Conference Radioactivity and Radioactive elements in the human environment.* Tomsk, September 13—16, 2016. Pp. 508—512.
12. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. Ispol'zovanie glinistykh materialov dlya sozdaniya zashchitnykh bar'erov radiacionno opasnykh ob"ektov [Use of Clay Materials in the Construction of Protective Barriers at Radiation Hazardous Facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 3 (12), pp. 39—53. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-39-53.
13. Guggenheim S. et al. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: Report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) Nomenclature Committee for 2006. *Clay Minerals,* 2006, vol. 41, no. 4, pp. 863—877. DOI: 10.1180/0009855064140225.
14. GOST 12536–2014. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava* [Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution]. Moscow, Standardinform Publ., 2015. 22 p.
15. GOST 5180–2015. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* [Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 p.
16. GOST 22733–2016. *Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimal'noy plotnosti* [Soils. Laboratory method for determining of maximum density]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 15 p.
17. Bogatov S. A., Drobyishevskiy N. I., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A. Predvaritel'nye ocenki parametrov inzhenernykh bar'erov v koncepcii PGZRO s gorizontal'nym razmeshcheniem upakovok s RAO v konteynerakh s mednym pokrytiem [Preliminary Assessment of Engineered Barrier Parameters under DGR Concept with Horizontal Orientation of RW Packages in Copper Coated Containers]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2023, no. 3 (24), pp. 77—91. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-77-91.

18. GOST 12248.3–2020. *Grunty. Opredeleniye kharakteristik prochnosti i deformiruyemosti metodom trekhosnogo szhatiya* [Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 32 p.
19. GOST 12248.1–2020. *Grunty. Opredeleniye kharakteristik prochnosti metodom odnoploskostnogo sreza* [Soils. Determination of strength parameters by shear strength testing]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 20 p.
20. GOST 12248.2–2020. *Grunty. Opredeleniye kharakteristik prochnosti metodom odnoosnogo szhatiya* [Soils. Determination of strength parameters by unconfined compression testing]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 11 p.
21. Standart organizatsii STO 93.020-2013/8. *Laboratornyye opredeleniya parametrov pronitsayemosti dispersnykh gruntov metodom trekhosnogto szhatiya* [Organization Standard 93.020-2013/8. Permeability parameters of dispersed soils and their laboratory-based evaluation by the triaxial compression method].
22. GOST 25100–2020. Grunty. Klassifikatsiya [Soils. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 41 p.
23. Semenkova A. S., Ilyina O. A., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Dorzhieva O. V., Pokidko B. V., Romanchuk A. Yu. N. Sorbtsiya radionuklidov na glinistykh mineralakh – komponentakh inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti [Sorption of radionuclides on clay minerals — elements of engineered safety barriers]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya — Moscow University Bulletin. Series 2. Chemistry,* 2021, vol. 62, no. 5, pp. 425—434.
24. Trofimov V. T., Korolev V. A., Voznesensky E. A., Golodkovskaya G. A., Vasilchuk Y. K., Ziangirov R. S. *Gruntovedeniye* [Soil Science]. Edt. by V. V. Trofimov. Moscow, Moscow State University Publ., 2005. 1024 p.
25. Osipov V. I. *Priroda prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv glinistykh porod* [Clayey rocks: nature of their strength and deformation properties]. Moscow, Moscow State University Publ., 1979. 232 p.
26. Osipov V. I., Sokolov V. N., Rumyantseva N. A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clayey rocks]. Edt. by E. M. Sergeev. Moscow, Nedra Publ., 1989. 210 p.
27. Osipov V. I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazheniy v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IGE RAS Publ., 2012. 74 p.
28. Osipov V. I., Sokolov V. N. *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroyeniye i formirovaniye svoystv* [Clays and their properties. Composition, structure and evolution of properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013. 576 p.
29. Sokolov V. N. Fiziko-khimicheskiye aspekty mekhanicheskogo povedeniya glinistykh gruntov [Clayey soils and the physicochemical aspects of their mechanical behavior]. *Inzhenernaya geologiya — Environmental Geoscience,* 1985, no. 4, pp. 18—41.

Information about the authors

Voznesensky Evgeny Arnoldovich, Ph.D. in Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Department of Geology, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia); Director, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences (13, bdg. 2, Ulansky lane, Moscow, 101100, Russia), e-mail: eugene@geoenv.ru.

Karpenko Fedor Sergeyevich, Ph.D. in Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences (13, bdg. 2, Ulansky lane, Moscow, 101100, Russia), e-mail: kafs08@bk.ru.

Krupskaya Victoria Valeryevna, Ph.D. in Geological and Mineralogical Sciences, Leading 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, Geological faculty of Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Zakusin Sergey Vyacheslavovich, research staff member, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia); Lead engineer, Geological faculty of Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia), e-mail: zakusinsergey@gmail.com.

Bibliographic description

Voznesensky E. A., Karpenko F. S., Krupskaya V. V., Zakusin S. V. Key geotechnical characteristics of clay materials for engineered safety barriers of the deep geological RW disposal facility at the Yeniseiskiy site. *Radioactive Waste,* 2024, no. 3 (28), pp. 43—58. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-43-58. (In Russian).