



УДК: 621.039.75: 621.039.743

DOI: 10.26277/SECNRS.2024.114.4.003

© 2024. Все права защищены.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМЫХ И ДОСТАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛИНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ

Ильина О. А.* (ilina@ibrae.ac.ru),
 Крупская В. В.**, ***, канд. геол.-минерал. наук (krupskaya@ruclay.com),
 Закусин С. В.**, *** (zakusinsergey@gmail.com),
 Понизов А. В.****, канд. техн. наук (ponizov@secnrs.ru),
 Мурлис Д. В.**** (murlis@secnrs.ru),
 Верещагин П. М.****, канд. техн. наук (vereschagin@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 22 октября 2024 г.

Аннотация

В статье рассматриваются характеристики барьерных глинистых материалов (БГМ), предназначенных для создания инженерных барьеров безопасности (ИББ) пунктов захоронения радиоактивных отходов (РАО), пунктов размещения особых РАО при их консервации, а также ядерных установок при их выводе из эксплуатации по варианту захоронения на месте. Авторами в развитие требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, относящихся к обеспечению долговременной безопасности при захоронении РАО, сформулированы функции безопасности, выполняемые ИББ на основе БГМ. С целью обеспечения возможности обоснования выбора БГМ и функций безопасности, выполняемых ИББ, авторами определен перечень показателей, которые необходимо измерять, нормировать и контролировать при проектировании и сооружении ИББ на основе БГМ. Представлено обоснование необходимых и достаточных характеристик БГМ для обеспечения долговременной безопасности пунктов захоронения РАО, которые включают:

- характеристики состава, строения и показателей свойств БГМ;
- функциональные свойства БГМ в составе ИББ;
- технологические показатели БГМ и ИББ на их основе.

Предложена классификация данных характеристик, которая может стать основой для нормирования и контроля качества БГМ.

► **Ключевые слова:** барьерные глинистые материалы, инженерные барьеры безопасности, захоронение радиоактивных отходов, функции безопасности, показатели свойств, контроль качества.

* Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия.

** Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия.

*** МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

**** Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

SUBSTANTIATION OF NECESSARY AND SUFFICIENT INDICATORS OF CLAY MATERIALS FOR CONSTRUCTING ENGINEERING SAFETY BARRIERS

Irina O. A.*,
Krupskaya V. V.**,***, Ph. D.
Zakusin S. V.**,***,
Ponizov A. V.****, Ph. D.
Murlis D. V.****,
Vereshchagin P. M.****, Ph. D.

The article was received by the editors' crew on October 22th, 2024.

Abstract

The article discusses characteristics of barrier clay materials for constructing engineering safety barriers for radioactive waste disposal, special radioactive waste placement sites during their conservation, and nuclear facilities during their decommissioning by on-site disposal option.

In order to extent requirements of federal rules and regulations in the field of atomic energy use related to ensuring long-term safety of radioactive waste disposal, the authors have formulated safety functions performed by engineering safety barriers based on barrier clay materials. To ensure the possibility of justifying the choice of barrier clay materials as well as safety functions performed by engineering safety barriers, the authors have defined the list of indicators that must be measured, standardized and controlled during the design and construction of engineering safety barriers based on barrier clay materials. The substantiation of the necessary and sufficient indicators of barrier clay materials to ensure the long-term safety of radioactive waste disposal sites is presented, that includes:

- *characteristics of the composition, structure and indicators of properties of barrier clay materials;*
- *functional properties of barrier clay materials composing the engineering safety barriers;*
- *technological indicators of barrier clay materials and engineering safety barriers based on them.*

Proposals on classification of these indicators are provided, which can become the basis for the standardization and quality control of barrier clay materials.

► **Keywords:** *barrier clay materials, engineering safety barriers, radioactive waste disposal, safety functions, indicators and characteristics, quality control.*

* Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

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

*** Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

**** Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

Введение

Вступление в силу Федерального закона от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1] положило начало проектированию и выполнению работ по созданию инженерных барьеров безопасности (ИББ) пунктов захоронения радиоактивных отходов (РАО) (ПЗРО), пунктов размещения особых РАО (ПРОРАО) при их консервации, а также при выводе из эксплуатации ядерных установок (ЯУ) по варианту захоронения на месте, в том числе с применением барьерных глинистых материалов (БГМ). Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года» (ФЦП ЯРБ-2) включает более 50 мероприятий, связанных с созданием ИББ на основе БГМ (ИББ БГМ) на указанных объектах использования атомной энергии (ОИАЭ), что потребует значительных объемов БГМ и применения специальных технологий создания ИББ БГМ.

С целью обеспечения долговременной безопасности ПЗРО/ПРОРАО разработаны федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии [2–5], содержащие требования к системе ИББ, препятствующей распространению ионизирующего излучения и радиоактивных веществ

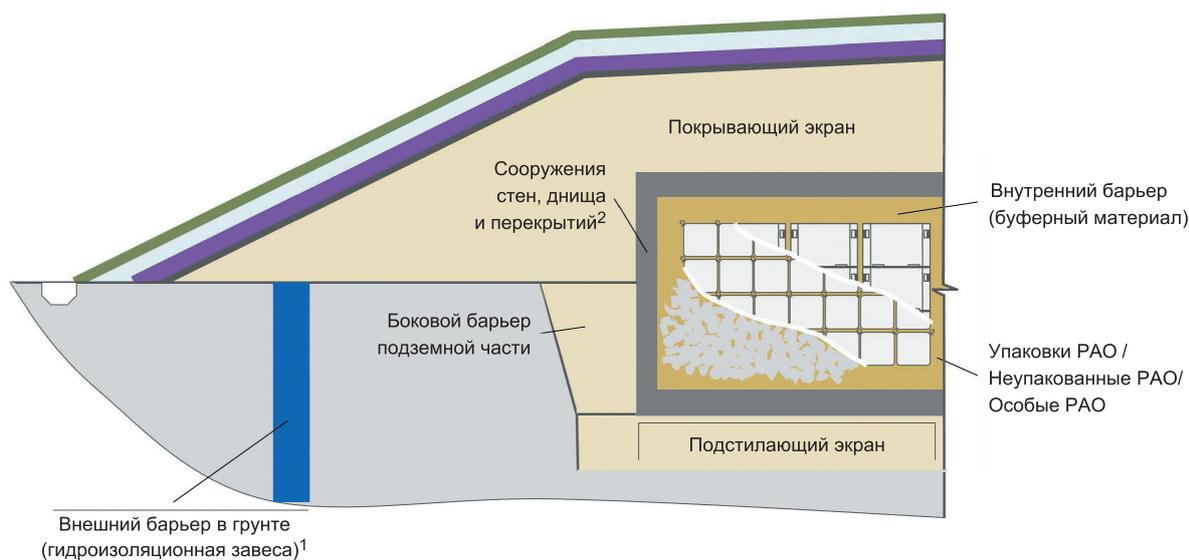
в окружающую среду. Однако существующая в настоящее время ситуация такова, что федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии содержат лишь общие положения по обеспечению безопасности систем ИББ (требования верхнего уровня), при этом требования к характеристикам БГМ, используемых для создания ИББ, отсутствуют.

В связи с этим назрела потребность установления требований к характеристикам БГМ и разработки перечня показателей, которые необходимо измерять, нормировать и контролировать при проектировании и сооружении ИББ БГМ.

1. Элементы инженерных барьеров безопасности на основе барьерных глинистых материалов и их функции безопасности

В соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии [2–4] системы ИББ ПЗРО/ПРОРАО включают следующие ИББ БГМ (рис. 1):

- подстилающий экран, включающий горизонтальный и вертикальный (боковой) барьеры основания и подземной части;
- внутренний барьер (буферный материал);
- покрывающий экран;
- внешний барьер в грунте, который может дополнительно сооружаться, например при консервации ПРОРАО.



¹ Расположение внешнего барьера в грунте на схеме показано для случая его сооружения одновременно с созданием покрывающего экрана для ПКОРАО. В иных случаях внешний барьер может быть расположен дальше от границ объекта за пределами покрывающего экрана.
² В случае наличия такой конструкции

Рис. 1. Схематическое изображение расположения инженерных барьеров безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов, пунктов размещения и консервации особых радиоактивных отходов (инженерные барьеры безопасности на основе барьерных глинистых материалов выделены в рамке)
 [Fig. 1. Layout scheme of engineering safety barriers for radioactive waste disposal facilities/facilities for placement and conservation of special radioactive waste (clay-based barriers are highlighted in a frame)]

Материалы и технологии создания ИББ БГМ были подробно рассмотрены в [6].

Для каждого ИББ должны быть установлены функции безопасности [2, 3] – описание роли барьера в обеспечении долговременной безопасности ПЗРО/ПРОРАО. Предлагаемые авторами функции безопасности ИББ БГМ представлены в таблице № 1. Для реализации указанных функций БГМ и сами ИББ БГМ должны соответствовать определенным проектным требованиям – измеряемым и наблюдаемым количественным показателям. В работах, посвященных созданию системы ИББ пункта глу-

бинного захоронения РАО (ПГЗРО) [7, 8], можно подробнее ознакомиться с показателями БГМ, предназначенными для буферного слоя. В этой области работа над обоснованием выбора БГМ идет параллельно и имеет большой прогресс.

С целью разработки необходимого и достаточного перечня показателей БГМ были выполнены анализ практики установления проектных требований к БГМ эксплуатирующими ОИАЭ организациями (ЭО) и анализ существующих методик определения показателей и их применимости для БГМ.

Таблица № 1

Функции безопасности инженерных барьеров безопасности на основе барьерных глинистых материалов и их элементов
Safety functions of the clay-based engineering safety barriers

Инженерный барьер безопасности	Описание функции безопасности		
	Изолирующая	Удерживающая	Механическая
Буферный барьер	ограничение проникновения атмосферных и (или) подземных вод к упаковкам РАО (неупакованным РАО)	сорбция радионуклидов в случае их выхода из упаковок РАО (неупакованных РАО)	сохранение упаковок РАО (неупакованных РАО) в проектном положении и ликвидация пустот и трещин во внутреннем пространстве пункта размещения и захоронения РАО
Противофильтрационный слой покрывающего экрана	защита РАО от проникновения атмосферных осадков и поверхностных вод во внутреннее пространство пункта размещения и захоронения РАО	сорбция радионуклидов в случае их выхода за пределы буферного барьера	восприятие и распределение нагрузки от вышележащих слоев покрывающего экрана
Противофильтрационный слой подстилающего экрана	защита РАО от проникновения подземных вод в случае повышения их уровня; защита подземных вод от радиоактивного загрязнения в случае выхода радионуклидов из упаковок РАО (неупакованных РАО)		сохранение несущей способности в составе основания пункта размещения и захоронения РАО
Противофильтрационный слой бокового экрана			восприятие горизонтального давления вмещающих грунтов
Противофильтрационная завеса	уменьшение скорости движения подземных вод на площадке пункта размещения РАО	сорбция радионуклидов в случае их выхода из упаковок РАО (неупакованных РАО) в подземные воды в пределах, оконтуренных противофильтрационной завесой	восприятие гидродинамического давления и горизонтального давления вмещающих грунтов

Примечание: Термин «сорбция» объединяет все механизмы фиксации радионуклидов на БГМ.

2. Практика установления технических требований к барьерным глинистым материалам при проектировании инженерных барьеров безопасности

В работах [9–11] были рассмотрены особенности применения на практике БГМ для создания ИББ при реализации мероприятий ФЦП ЯРБ-2. Авторами отмечались несовершенство источников информации о БГМ, трудности в тиражировании опыта с одних ОИАЭ на другие, отсутствие методологических подходов к определению характеристик БГМ. Актуальность тематики подчеркивалась и на заседаниях Научно-технического совета № 5 и 10 Госкорпорации «Росатом». Обсуждались возрастающие потребности в БГМ для консервации ПРОРАО, актуальные результаты и проблематика научных исследований, а также аспекты нормативного регулирования.

Перечисленные проблемы иллюстрируют несовершенство имеющихся источников информации о характеристиках БГМ. Даже при наличии технической документации производителя на БГМ и результатов проведения опытно-промышленных испытаний отсутствуют механизмы публикации, проверки и учета этих документов для использования в проектной документации ПЗРО/ПРОРАО.

Ниже приведен пример, который демонстрирует разрозненность и недостаточность технических требований, предъявляемых ЭО при выборе БГМ. По информации, представленной в [12–15], были рассмотрены технические задания ЭО, содержащие требования к БГМ, предназначенным для создания ИББ. Список ЭО, ОИАЭ и типов БГМ приведен в таблице № 2.

Анализ технических требований ЭО к БГМ показал следующее.

Все выбранные БГМ применяются в качестве внутреннего барьера и имеют схожие функции безопасности, однако набор технических требований к БГМ в каждом отдельном техническом задании на 60–70 % индивидуален. Перечень показателей БГМ из технических требований ЭО приведен на рис. 2.

Среди наиболее часто встречающихся – показатели, отвечающие за состояние БГМ при поставке: насыпная плотность, влажность, гранулометрический состав. Ряд показателей БГМ, таких как выход глинистого раствора, показатель фильтрации, были заимствованы из ГОСТ на глинопорошки для буровых растворов [16], а такие показатели, как коллоидальность, водопоглощение, плотность суспензии – из ГОСТ на глины бентонитовые формовочные [17].

К показателям, характеризующим состав и свойства БГМ, из перечня требований относятся только минеральный и химический состав, емкость катионного обмена. К показателям свойств ИББ БГМ – коэффициенты распределения и водопроницаемость (в требованиях ЭО и на рис. 2 указываются как коэффициент фильтрации и показатель фильтрации суспензии, подробнее проблема затронута в [18]). При этом ни в одном из технических требований не содержатся все эти пять показателей. Также важно отметить, что значения таких показателей БГМ, как коэффициент фильтрации и коэффициент распределения, должны быть даны с обязательным указанием методики или условий проведения измерения, что в рассмотренных технических требованиях не выполнено.

Очевидно, что приведенные требования ЭО не содержат необходимого и достаточного объема показателей БГМ, на основании которых можно было бы сделать обоснованный выбор БГМ. Кроме того, приведенных показателей недостаточно, чтобы

Таблица № 2

Выбор барьерных глинистых материалов в проектах объектов использования атомной энергии Cases of using barrier clay materials in radioactive waste storage and disposal

№ п/п	Эксплуатирующая организация	Объект использования атомной энергии	Барьерный глинистый материал
1	АО «ОДЦ УГР»	ПУТР ЭИ-2	материал засыпки
2	ФГУП «РАДОН»	ХТО-2	глинопорошок бентонитовый для ремонтных работ
3	ФГУП «НО РАО»	ППЗРО в г. Новоуральск	материал засыпки
4	ФГУП «ГХК»	ПУТР АД, АДЭ-1, 2	барьерная смесь

Количество упоминаний в технических требованиях на БГМ

	0	1	2	3	4
Насыпная плотность, т/м ³					
Влажность, %					
Минеральный состав, % масс					
Размер частиц (гранулометрический состав), %					
Емкость катионного обмена, мг-экв/100 г					
Коэффициент сорбционного распределения, г/см ³					
Коэффициент фильтрации, м/с					
Химический состав, %					
Функция текучести					
Выход глинистого раствора с вязкостью 20 мПа, м ³ /т					
Плотность суспензии, г/см ³					
Показатель фильтрации, см ³					
Коллоидальность, %					
Водопоглощение, ед.					

Рис. 2. Перечень показателей барьерных глинистых материалов из технических требований эксплуатирующих организаций
 [Fig. 2. List of barrier clay materials indicators from the customer technical requirements]

выполнить оценку долговременной безопасности ПЗРО/ПРОРАО, так как минимальный набор исходных данных, согласно [19], включает пористость, плотность, коэффициент фильтрации, эффективный коэффициент диффузии и коэффициент распределения дозообразующих радионуклидов в материалах ИББ.

В отсутствие специализированных показателей и методик, ЭО вынуждены заимствовать их из ГОСТ для буровых растворов на основе бентонита и формовочных глин. Подобная ограниченность сдерживает совершенствование существующих и разработку новых БГМ и затрудняет проведение контроля и подтверждения соответствия ИББ проектным требованиям. Впоследствии эти факторы негативно влияют на стоимость и сроки сооружения ПЗРО, а также на обеспечение их долговременной безопасности.

Для устранения указанных выше пробелов по инициативе Госкорпорации «Росатом» была разработана «Программа научно-технологического обеспечения работ по обоснованию выбора барьерных глинистых материалов, применяемых при реализации проектов на заключительной стадии жизненного цикла ОИАЭ» (далее – Программа). Основной задачей Программы является обеспечение обосновывающей информацией о характеристиках, способах и технологиях применения БГМ для создания ИББ, а также объемах и методах контроля

качества выполнения работ с целью повышения научно-технического уровня подготовки проектов ПЗРО и отчетов по обоснованию безопасности.

3. Предложения по необходимым и достаточным характеристикам барьерных глинистых материалов для обеспечения долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов

3.1. Разработка предварительного перечня характеристик барьерных глинистых материалов

На начальном этапе реализации Программы был составлен предварительный (наиболее полный) перечень характеристик БГМ (таблица № 3), который объединил все показатели и свойства, которые могут влиять на выполнение функций безопасности ИББ БГМ и поддержание благоприятных для системы ИББ условий в течение длительного времени. В перечень включены все показатели БГМ, которые входили в состав технических требований ЭО к БГМ, обоснований, проектную документацию и другие документы, посвященные выбору и обоснованию применения БГМ для создания ИББ ПЗРО/ПРОРАО. Перечень можно назвать «широким», так как в нем присутствуют как однозначно определяемые

Таблица № 3

Предварительный перечень характеристик барьерных глинистых материалов
Preliminary list of barrier clay materials characteristics

№ п/п	Характеристика	№ п/п	Характеристика
1	Минеральный состав	16	Угол внутреннего трения, удельное сцепление
2	Химический состав	17	Пористость
3	Содержание органического вещества	18	Слеживаемость
4	Гранулометрический состав	19	Оптимальная влажность уплотнения
5	Удельная поверхность	20	Растекаемость цементного теста, время загустевания
6	Емкость катионного обмена	21	Марка по морозостойкости (или устойчивость к термическим циклам)
7	Плотность скелета	22	Относительная деформация морозного пучения
8	Влажность	23	Параметры усадки
9	Показатели водопроницаемости	24	Модуль деформации
10	Коэффициент влагопереноса	25	Ослабление ионизирующего излучения
11	Полная влагоемкость	26	Радиационная стойкость
12	Коэффициент диффузии, эффективная пористость	27	Биологическая стойкость
13	Коэффициенты распределения радионуклидов	28	Стойкость к воздействию агрессивных сред
14	Состав равновесных контактирующих растворов	29	Скорость коррозии стали в присутствии барьерных глинистых материалов
15	Параметры набухания	30	Функция текучести

численные показатели исходного глинистого материала (например, химический и минеральный состав, емкость катионного обмена и др.), так и свойства ИББ БГМ, зависящие от выбранного материала и условий создания ИББ и характеризующиеся большим набором показателей (например, параметры набухания, слеживаемость, коэффициент фильтрации и другие). В перечень также вошли показатели, определяемые не экспериментальным, а расчетным путем: плотность скелета, пористость, коэффициент ослабления ионизирующего излучения, коэффициент влагопереноса, полная влагоемкость.

Использование единого перечня ставит в один ряд универсальные характеристики БГМ, как определяемые для всех типов ИББ БГМ (например, минеральный состав, коэффициенты распределения), так и специальные, применимые только к определенным типам (например, оптимальная влажность уплотнения – для БГМ, предназначенного для послойного уплотнения при создании покрывающих/подстилающих экранов). Необходимо отметить, что в данный перечень не включены показатели БГМ, которые определяются условиями захоронения тепловыделяющих РАО (теплопроводность, газопроницаемость, стабильность состава и свойств под действием высокой температуры и т. д.), потому что они

исследуются в рамках обоснования безопасности создания ПГЗРО. Кроме того, в перечень не вошел показатель «угол естественного откоса», поскольку он применим только к несвязным грунтам (песчаным и крупнообломочным) искусственного сложения. В глинистых же порошках он чрезвычайно сильно зависит даже от незначительного изменения их влажности, проявляя, например, слипание между частицами вплоть до полной потери сыпучести. Поэтому его использование применительно к глино-порошкам лишено практического смысла.

Очевидно, что для практического применения при выборе БГМ и установления для ИББ БГМ функций безопасности предварительный перечень показателей должен быть сокращен и структурирован.

3.2. Разработка итогового перечня характеристик барьерных глинистых материалов

При разработке итогового перечня характеристик БГМ были проанализированы существующие методики определения показателей и их применимость для БГМ.

В предварительный перечень показателей БГМ были добавлены четыре методически и экономически простых показателя для определения, которые

позволят оценить пригодность глинистого сырья в качестве ИББ: индекс свободного набухания, водоотдача, плотность твердых частиц, верхний предел пластичности. Такой показатель, как гранулометрический состав, для однозначного трактования разделен на два:

1. Гранулометрический состав исходной глины – процентное содержание первичных частиц различной крупности по фракциям, определяемый по [20].

2. Фракционный состав готового сыпучего БГМ, измеряемый ситовым методом.

В примерах показателей из технических требований ЭО (рис. 2) под показателем «размер частиц (гранулометрический состав)» имеется в виду именно фракционный состав порошкообразного БГМ.

Из предварительного перечня показателей БГМ исключены показатели, которые не могут характеризовать применимость БГМ для создания ИББ и (или) отвечать за выполнение ИББ БГМ функций безопасности.

Ниже приводится обоснование исключения ряда показателей БГМ:

1) Марка по морозостойкости (п. 21 таблицы № 3) – методика определения для глинистых материалов отсутствует, марки морозостойкости разработаны для бетонов в [21]. Для бентонитовых матов, как для геосинтетических строительных материалов, используется показатель устойчивости к термическим циклам (замораживанию и оттаиванию), определяемый по [22 или 23]. Известны исследования изменения свойств глинистых материалов под действием циклов замораживания-оттаивания, которые показывают, что такие воздействия могут привести к изменению несущей способности, структуры, целостности, снижению гидравлической проводимости [24–26]. Однако негативные последствия циклов замораживания-оттаивания не являются основной причиной выхода из строя покрывающих экранов. К образованию трещин и резкому увеличению проницаемости глинистого экрана приводит растрескивание при неравномерных осадках объекта [27] и при высыхании [28]. Снизить гидравлическую проводимость и залечить трещины помогает дополнительное давление на слой глины [28], которое может быть обеспечено верхним защитным слоем покрывающего экрана достаточной толщины. Минимальная высота защитного слоя, необходимая для подавления растрескивания глинистого слоя, по данным [29], составляет приблизительно 3 м, что должно быть учтено при проектировании покрывающего экрана. Необходимость расположения противодиффузионного слоя покрывающего экрана

ниже глубины промерзания грунта в районе размещения ПЗРО, во избежание его повреждения вследствие промерзания и оттаивания, указана в [30]. Приведенные данные актуальны для БГМ различного минерального состава, и оценка влияния промерзания в каждом отдельном случае не требуется.

2) Промерзание может оказать негативное воздействие не только на свойства материалов, но и на конструкцию ПЗРО в случае возникновения линейных и объемных деформаций. Процесс сопровождается подъемом поверхности грунта и развитием сил морозного пучения, действующих на подземные конструкции сооружений, а при последующем оттаивании – осадкой. К пучинистым грунтам относятся глинистые (особенно наиболее пылеватые) грунты, пески, а также крупнообломочные грунты с глинистым заполнителем, имеющие к началу промерзания влажность выше определенного уровня. Расчеты устойчивости конструкций под действием нормальных и касательных сил морозного пучения проводятся в соответствии с СП 22.13330 [31] при планировании строительства на основаниях, сложенных пучинистыми грунтами. ИББ подземной части ПЗРО (боковой и подстилающей экраны) предназначены для гидроизоляции конструкции ПЗРО и выполняются из набухающих слабопроницаемых глин. Увлажненный набухающий глинистый грунт будет проявлять пучение при промерзании существенно меньше, чем ненабухающий глинистый грунт, даже с меньшей влажностью [32], следовательно, таким глинам не свойственно обводнение до значений, приводящих к высоким деформациям пучения. Верно будет также утверждать, что обводнение должно быть ограничено выбором площадки размещения ПЗРО и конструкцией его дренажной системы. Таким образом, определение относительной деформации морозного пучения (п. 22 таблицы № 3), как показателя качества БГМ, не требуется.

3) Методика определения слеживаемости (п. 18 таблицы № 3) для глинистых материалов не разработана. Показатель слеживаемости в общем случае характеризует способность продукции сохранять свойство сыпучести. Так, например, для противогололедных материалов [33] слеживаемость определяется визуально по наличию слежавшихся частиц (агломератов), не поддающихся разрушению при умеренном механическом воздействии. Для грунтов, укрепленных органическими вяжущими, применяемыми для устройства покрытий и оснований в строительстве [34, 35], определение слеживаемости заключается в оценке способности холодной смеси

не слеживаться при хранении в штабеле. Необходимо отметить, что при хранении готовых БГМ нередко возникает ситуация потери сыпучести. Однако причина не связана со свойствами и качеством БГМ, а является следствием нарушения правил транспортирования и хранения: повреждение упаковки – мягкого контейнера с полиэтиленовым вкладышем, хранение на открытом воздухе без поддонов/укрытия, попадание осадков.

4) Технологические параметры БГМ, характеризующие подвижность и способность материала текучей консистенции заполнять свободные пространства, в предварительном перечне показателей были позаимствованы у бетонов. В [36] приведена группа показателей, определяющих удобоукладываемость бетонной смеси, которая оценивается показателями подвижности, жесткости, распыла, степени уплотняемости. Схожие показатели можно найти в [37]: растекаемость цементного теста и время загустевания (п. 20 таблицы № 3). Данные параметры применимы для материалов только на основе цемента, которые могут использоваться в качестве внутренних барьеров (буферных материалов).

5) В одном из технических требований ЭО указан показатель «функция текучести» (п. 30 таблицы № 3). Применимости этого показателя была посвящена отдельная работа [38]. Определение «функции текучести» для БГМ методом сдвиговой ячейки было предложено на основании того, что свойство подвижности глинопорошков является функцией нагрузки при уплотнении. Следует отметить, что показатель подвижности востребован в фармацевтической промышленности для описания процесса перемещения порошковых сред в бункерах, хопперах, устройствах подачи, заполняющих машинах и в другом сходном оборудовании. Однако для ИББ важно поведение глинопорошка при распределении в полостях различной конфигурации ячеек РАО после засыпки, а не их способность проходить через систему подачи. Таким образом, «функцию текучести» не следует использовать как показатель БГМ.

6) Ослабление ионизирующего излучения (п. 25 таблицы № 3) оценивают линейным коэффициентом ослабления ($1/\text{см}$) или массовым коэффициентом ослабления ($\text{см}^2/\text{г}$). Нерассеянное излучение плоского мононаправленного источника уменьшается по экспоненциальному закону с толщиной поглотителя. Величину, показывающую, во сколько раз требуется уменьшить характеристику поля излучения (плотность потока энергии, мощность дозы и т. д.) защитой, называют кратностью ослабления.

Зная требуемое значение кратности ослабления, можно определить по справочнику требуемую толщину барьера [39]. Основываясь на этом, ослабление ионизирующего излучения будет определяться плотностью барьера и его толщиной, то есть может быть подобрано при проектировании. Каких-либо испытаний БГМ проводить не требуется. Функция биологической и радиационной защиты от ионизирующего излучения, возлагаемая на ИББ, относится, в большинстве случаев, к матрице и упаковке РАО, а не к изолирующему слою глины, таким образом, она не входит в набор функций безопасности, выполняемых ИББ БГМ.

7) Радиационная стойкость (п. 26 таблицы № 3), как правило, характеризуется изменениями минерального состава при воздействии ионизирующего излучения и встречается преимущественно при рассмотрении глубинного захоронения высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива. В обзорной статье [40] приводятся результаты испытаний, показывающих, что для перехода монтмориллонита (основной минерал бентонита) в аморфное состояние доза α -излучения должна составить 30 ГГр. Эксперимент по воздействию γ -излучения на уплотненный бентонит, в котором суммарная годовая доза составила 0,03 ГГр, не показал существенных изменений в монтмориллоните [40]. Указанные экспериментальные значения излучения на порядки превышают значения, возможные в ПЗРО, поэтому для БГМ параметр радиационной стойкости может быть исключен из определяемых для подтверждения качества характеристик.

8) Биологическая стойкость (п. 27 таблицы № 3) нормируется для глиноматов согласно [41 и 42] и характеризует свойство материалов долговременно сопротивляться разрушающему действию грибов и бактерий. Глиномат – многослойный материал, состоящий из бентонита и слоев геосинтетических материалов, его микробиологическая устойчивость определяется именно для геосинтетических слоев, а не для глины. Микробное воздействие рассматривается в комплексе с другими процессами при исследовании БГМ для глубинного захоронения РАО. Микробы могут быть катализаторами в окислительно-восстановительных и других процессах, увеличивая при этом скорость коррозии, генерацию газа и т. д., однако высокая плотность глинистых материалов в буферном слое ПЗРО и создаваемое ими давление набухания ограничивает микробную деятельность [40, 44]. Для глубинного захоронения РАО по результатам проведенных модельных экспериментов нормируют содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$)

в БГМ – не более 1 % [43]. Для рассматриваемых в статье ПЗРО/ПРОРАО срок службы ИББ, в том числе контейнеров РАО, ниже, чем для ПГЗРО, и устанавливать требования к исходному состоянию БГМ по содержанию органического вещества не требуется.

9) Стойкость к воздействию агрессивных сред (п. 28 таблицы № 3) может быть определена как отношение значения какой-либо характеристики (например, коэффициент распределения, модуль деформации и т. д.) при воздействии негативного фактора к исходной величине в отсутствие воздействия. Среди нормируемых показателей встречается показатель для геосинтетических материалов – способность сохранять прочностные качества после воздействия на материал при определенных условиях химических реагентов, создающих кислотную или щелочную среду [41, 45]. Для ПГЗРО проводятся исследования по контактным взаимодействиям БГМ с матрицей РАО, материалом упаковки РАО, материалами других барьеров, например бетонными [46], а также с водами аналогичного району и площадке размещения ПГЗРО состава. Контактные воздействия в условиях повышенной температуры могут приводить к изменению состава и свойств, но эти процессы столь продолжительные, что их анализ требует проведения специальных экспериментальных работ с обязательным использованием расчетных методов прогнозирования изменений на длительную перспективу. Подобные исследования проводятся для обоснования безопасности ПГЗРО, но для приповерхностных ПЗРО, в силу отсутствия воздействия повышенных температур, являются излишними. Ограничения, которые могут быть наложены на БГМ по их исходным характеристикам с точки зрения воздействия подобных процессов: минеральный и химический состав, содержание некоторых акцессорных минералов – вредных примесей (пирита, кальцита, органического вещества и др. [7]) и достижение требуемой плотности или толщины барьера.

10) Влияние на скорость коррозии стали (п. 29 таблицы № 3) – актуальный аспект как для проектов консервации ПРОРАО, так и для проектов ПЗРО. Внутренний ИББ должен поддерживать среду, препятствующую деградации контейнера с РАО. Это означает, что БГМ должен создавать такие условия, при которых сдерживаются химические процессы, способные снизить срок службы контейнера или привести к условиям, когда он не сможет выполнять свои функции безопасности. Из исследований, проведенных для ПГЗРО, известно, что для этого

в БГМ должно быть ограничено содержание органического углерода (не более 0,5 %), серы (не более 1 %) и сульфидов (не более 0,5 %), которые могут увеличивать скорость коррозии, а также гипса и ангидрита [43]. Также должны быть зафиксированы: плотность для обеспечения требуемой водопроницаемости и толщина с учетом слоя, который может быть поврежден в процессе взаимодействия с продуктами коррозии. В практике встречаются попытки зафиксировать параметр скорости коррозии стали для характеристики БГМ. Известно, что скорости коррозии углеродистых сталей, определенные в процессе многолетних наблюдений, находятся в пределах от менее десятых до единиц мкм в год [40, 47]. Полученные модельные консервативные значения скорости коррозии углеродистых сталей в анаэробных условиях в контакте с бентонитом составляют до 1,6 мкм в год [47], что сопоставимо со скоростью коррозии стали без бентонита. Данный параметр также может быть исключен из определяемых для подтверждения качества характеристик БГМ.

4. Разработка классификации характеристик барьерных глинистых материалов

После исключения из перечня показателей БГМ нерелевантных, неприменимых и невоспроизводимых при регулярном контроле качества показателей, оставшиеся показатели были разделены на следующие категории (таблица № 4):

- А: характеристики состава, строения и показатели свойств глинистого сырья;
- В: показатели свойств БГМ в составе ИББ, отвечающие за выполнение функций безопасности;
- С: технологические характеристики БГМ и ИББ БГМ.

А. Характеристики состава, строения и показатели свойств глинистого сырья

Все показатели данной категории могут быть измерены напрямую и имеют тесную корреляцию друг с другом, но определяются независимо. Перечень возможно дополнить рядом других показателей, которые могут появиться при разработке новых типов ИББ БГМ или технологий их создания.

Определение показателей в данной категории проводится на образцах природных глин для оценки потенциальной пригодности месторождения глин к применению для создания ИББ. Характеристики состава, строения и показатели свойств глинистого сырья могут быть применены ко всем БГМ,

Таблица № 4

Классификация показателей барьерных глинистых материалов и инженерных барьеров безопасности на основе барьерных глинистых материалов с указанием методик измерения
Classification of indicators of barrier clay materials and indicators of clay-based engineering safety barriers with measurement methods

А. Характеристики состава, строения и показатели свойств глинистого сырья		В. Показатели свойств барьерных глинистых материалов в составе инженерных барьеров безопасности, отвечающие за выполнение функций безопасности	
минеральный состав (нп) ¹	№ 366/2022-01.00115-2013 [48], МР НСОММИ № 191 [49]	показатели водопроницаемости ²	ФР.1.31.2022.44414 [55]
химический состав	ГОСТ 21216 [50], ГОСТ 23740 [51]		
гранулометрический состав (нп)	ГОСТ 12536 [20]	показатели набухаемости и усадки: деформация и влажность набухания, давление набухания, объемная и линейная усадка, влажность на пределе усадки ²	ГОСТ 12248.6 [56]
плотность твердых частиц (нп)	ГОСТ 5180 [52]		
удельная поверхность (нп)	ГОСТ 28794 [53]	угол внутреннего трения, удельное сцепление ²	ГОСТ 12248.1 [57]
индекс набухания	ГОСТ Р 70090, Приложение Б [42]	одометрический модуль деформации ²	ГОСТ 12248.4 [58]
водоотдача	ГОСТ Р 56946 [16]	коэффициент диффузии, эффективная пористость ²	ФР.1.31.2022.44415 [59]
верхний предел пластичности	ГОСТ 5180 [52]		
емкость катионного обмена	ФР.1.31.2022.44411 [54]	коэффициент распределения	ФР.1.31.2022.44412 [60, 61]
-	-	характеристики равновесных контактирующих растворов: буферное значение рН, катионный состав, общая минерализация вытяжки	ФР.1.31.2022.44413 [62]
С. Технологические характеристики барьерных глинистых материалов		С. Технологические характеристики инженерных барьеров безопасности на основе барьерных глинистых материалов	
фракционный состав	в соответствии с техническими условиями на материал	плотность скелета (рп) ⁴	ГОСТ 5180 [52]
насыпная плотность	в соответствии с техническими условиями на материал	пористость (рп)	ГОСТ 5180 [52]
влажность и гигроскопическая влажность ³	ГОСТ 5180 [52]	влажность	ГОСТ 5180 [52]
-	-	оптимальная влажность уплотнения ⁵	ФР.1.31.2022.44416 [63]

Примечание:

¹ – нп (независимый показатель БГМ);

² – показатели определяются при фиксированных пористости и влажности, установленных для ИББ БГМ;

³ – гигроскопическая влажность определяется для порошкообразных БГМ, содержание влаги в которых обычно составляет 1–9 %;

⁴ – рп (расчетный показатель БГМ);

⁵ – оптимальная влажность уплотнения определяется для глин, применяемых для гидроизоляционных экранов методом послойного уплотнения, непосредственно перед проведением работ по уплотнению.

изготовленным из данного сырья конкретного месторождения, пласта, при достаточной выборке образцов. Определение показателей из категории «А» производится по стандартизированным методикам, которыми владеет широкое число аттестованных аналитических и исследовательских лабораторий.

Последовательность изучения глинистых материалов для оценки возможности их применения в качестве компонентов ИББ состоит в изучении сначала состава, а затем свойств материала.

В. Показатели свойств барьерных глинистых материалов в составе инженерных барьеров безопасности, отвечающие за выполнение функций безопасности

В категорию «В» входят показатели БГМ, отвечающие за выполнение функций безопасности ИББ БГМ – функциональные свойства. В этой категории уже нет независимых параметров. Основные взаимосвязи, которые можно сформулировать: зависимость от природных характеристик глин, параметров промышленной переработки и технологических параметров создания/установки ИББ БГМ. К последним относится, прежде всего, пористость (или плотность скелета). От нее зависят пять из семи перечисленных параметров.

Следует дать пояснения относительно присутствия в категории «В» коэффициента распределения радионуклидов. Этот параметр в значительной степени зависит от внешних условий: состава раствора и химических свойств исследуемого радионуклида, поэтому достоверно он может быть определен только для заданных условий конкретного ОИАЭ. В качестве относительной скрининговой характеристики глинистого материала могут быть определены коэффициенты распределения для ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{241}\text{Am}/^{152}\text{Eu}$, изотопов U , ^{237}Np в фиксированных модельных условиях по унифицированной методике, представленной в работе [60].

Характеристики равновесных растворов важны для прогноза сорбционных и миграционных свойств ИББ БГМ, а также процессов их эволюции. Под этими характеристиками понимают изменения рН, минерализации, катионного и анионного составов раствора после контакта с БГМ, а также состава обменных катионов БГМ. Значениями этих показателей, как характеристиками БГМ, пользоваться нельзя, но полученные результаты могут быть использованы при проведении геомиграционного моделирования.

Определение показателей из категории «В» производится на образцах БГМ в состоянии поставки: измельченные глины, глинопорошки, крупка, гранулы и так далее с их уплотнением и увлажнением в зависимости от методики измерения. Экстраполяция полученных значений на создаваемый из этих материалов элемент ИББ возможна только при одинаковых плотностях скелета/пористости и влажности, составе порового раствора и т. д. Получаемые значения показателей свойств БГМ должны всегда включать значения технологических параметров испытываемого образца: при какой плотности скелета/пористости и влажности были измерены ключевые параметры, обеспечивающие долговременную безопасность ПЗРО.

Оценка показателей БГМ категории «В» более ресурсозатратна, для их определения сложно найти одну лабораторию, которая выполняла бы все показатели из списка. Миграционные свойства по сложившейся практике, как правило, определяют в научно-исследовательских лабораториях, имеющих соответствующую лицензию Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору на использование радиоактивных веществ при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

С. Технологические характеристики барьерных глинистых материалов и инженерных барьеров безопасности на основе барьерных глинистых материалов

К категории показателей «С» относятся все показатели, которые отвечают за производственные и эксплуатационные параметры БГМ и ИББ БГМ. Они должны использоваться при определении количественных значений показателей функциональных свойств БГМ.

Сюда включены необходимые параметры материалов или изделий из БГМ, достигаемые в процессе их подготовки/производства: оптимальная влажность, фракционный состав, насыпная плотность, влажность, гигроскопическая влажность, а также показатели ИББ БГМ, определяемые технологией создания ИББ – плотность скелета, пористость, влажность, в том числе оптимальная.

Плотность скелета определяет плотность материала ИББ без учета массы воды – это расчетный показатель. Большинство характеристик БГМ определяются как функция от пористости (или плотности скелета). Плотность скелета можно варьировать

и таким образом достигать необходимых значений при изготовлении БГМ и создании ИББ. В ходе сравнительных испытаний БГМ разного состава необходимо учитывать, при каких значениях плотности скелета готовились образцы.

Ограничения на достижение определенной плотности скелета накладывают такие характеристики БГМ, как оптимальная влажность, плотность твердых частиц, и, безусловно, технико-экономические показатели, связанные с применяемой технологией создания ИББ, включая его уплотнение. Можно встретить использование термина «самоуплотнение» по отношению к внутренним ИББ из глинопорошков [64, 65]. Самоуплотняющимися бывают бетонные смеси [66] – высокотекучие, способные к уплотнению без расслоения под собственным весом без динамического воздействия и используемые зачастую для заполнения густоармированных полостей строительных конструкций. Получаемый таким образом бетон является достаточно однородным по строению и свойствам. БГМ способны сжиматься под собственным весом с увеличением плотности от подошвы к кровле тела засыпки, что по своей сути является деформацией сжатия под весом вышележащей толщи. Сама толщина получается неоднородной, а величина деформации и ее распределение по разрезу при этом определяются модулем деформации. Однако насыпные материалы из БГМ не уплотняются без дополнительного внешнего воздействия и увлажнения. Поэтому плотность создаваемого барьера методом засыпки будет сохраняться близкой к насыпной плотности исходного материала.

Заключение

Глинистые материалы достаточно хорошо изучены для создания ИББ ПЗРО/ПРОРАО, однако на уровне нормативно-технического регулирования в атомной отрасли их применение практически не рассмотрено. Интерпретация данных научных исследований при переходе в практическую область при проектировании, обосновании долговременной безопасности ПЗРО/ПРОРАО и использовании БГМ часто приводит к формированию либо недостаточных, либо излишних наборов технических требований ЭО без опоры на требуемые функции безопасности ИББ БГМ. Активная деятельность по подтверждению результатами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ высокой изолирующей способности глинистых материалов приводит к тому, что часто им вменяют функции всех остальных барьеров.

Был рассмотрен максимально широкий перечень из 30 показателей, из которого были исключены 11 неприменимых для БГМ, которые не определяют функции безопасности ИББ: слеживаемость, растекаемость, марка по морозостойкости, относительная деформация морозного пучения, радиационная и биологическая стойкость, стойкость к воздействию агрессивных сред, скорость коррозии стали в присутствии БГМ; в том числе расчетные показатели, не требующие экспериментального определения: коэффициент влагопереноса, полная влагоемкость и коэффициент ослабления ионизирующего излучения. Были даны разъяснения о неприменимости использования таких характеристик по отношению к БГМ как «функция текучести», угол естественного откоса и самоуплотнение. Добавлены несколько новых для БГМ, но хорошо изученных показателей – плотность твердых частиц, насыпная плотность, фракционный состав, индекс свободного набухания, водоотдача, верхний предел пластичности. Получившийся перечень из 23 показателей классифицирован по трем категориям:

- А (характеристики состава, строения и показатели свойств БГМ);
- В (показатели свойств БГМ в составе ИББ, отвечающие за выполнение функций безопасности – функциональные свойства ИББ БГМ);
- С (технологические характеристики БГМ и ИББ БГМ).

Использование разработанной классификации показателей (таблица № 4) при измерении характеристик БГМ позволит обосновывать выполнение функций безопасности и делать рациональный выбор между различными материалами. Показатели из созданного перечня могут быть использованы для формирования системы контроля качества БГМ и ИББ БГМ (входного, периодического, операционного, приемочного), а также системы мониторинга ИББ БГМ. Запись и хранение значений характеристик БГМ по данным показателям в приведенных группах может служить элементом системы управления знаниями, которая в целом обеспечит проектные организации, ЭО и надзорные органы информацией о характеристиках, объемах и методах контроля качества, способах и технологиях применения БГМ для создания ИББ.

Предложенный перечень показателей БГМ и их классификация могут быть использованы при совершенствовании нормативной правовой базы в области использования атомной энергии, что позволит обосновать проектные решения по созданию ИББ БГМ, способствовать разработке

новых материалов и технологий, а также повысить конкурентоспособность среди производителей и поставщиков БГМ.

В настоящей статье учтены результаты, полученные ИГЕМ РАН при реализации проекта № 22-17-00252 Российского научного фонда, а также

МГУ им. М.В. Ломоносова и ФБУ «НТЦ ЯРБ» в рамках Программы научно-технологического обеспечения работ по обоснованию выбора барьерных глинистых материалов, применяемых при реализации проектов на заключительной стадии жизненного цикла ОИАЭ.

Литература

1. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ (в ред. федер. законов от 02.07.2013 № 188-ФЗ, от 08.12.2020 № 429-ФЗ, от 21.12.2021 № 421-ФЗ).
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности (НП-055-14): утв. приказом Ростехнадзора от 22.08.2014 № 379 (в ред. 18.05.2022).
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов (НП-100-17): утв. приказом Ростехнадзора от 23.06.2017 № 218.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности (НП-069-14): утв. приказом Ростехнадзора от 18.05.2017 № 163 (в ред. 18.05.2022).
5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов (НП-103-17): утв. приказом Ростехнадзора от 10.10.2017 № 418 (в ред. 18.05.2022).
6. Ильина О. А., Лундин Д. С., Проскурин Д. В., Ведерникова М. В., Бирюков Д. В. Материалы и технологии для радикального улучшения гидроизолирующих характеристик хранилищ РАО // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 51–62. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-51-62.
7. 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.
8. Крупская В. В., Тюпина Е. А., Закусин С. В., Ильина О. А., Савельева Е. А. Обоснование выбора глинистых материалов для разработки инженерных барьеров безопасности при изоляции РАО в ПГЗРО на участке недр «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 98–112. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-98-112.
9. 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 (3). С. 30–43.
10. Линге И. И., Иванов А. Ю., Казаков К. С. О системных мерах по расширению применения глиняных материалов на объектах атомной отрасли // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 33–41.
11. Ильина О. А., Крупская В. В., Винокуров С. Е., Калмыков С. Н. Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 71–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
12. Документация к открытому одноэтапному конкурсу в электронной форме без квалификационного отбора на право заключения договора на поставку барьерного материала на основе индивидуального композиционного состава (смеси каолинита, бентонита и вермикулита) для нужд ОАО «ОДЦ УГР» // Единая информационная система в сфере закупок. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/notice223/documents.html?noticeInfoId=1105974> (дата обращения: 12.11.2024).
13. Документация об электронном аукционе на поставку глинопорошка бентонитового для проведения работ на ХТО-2 для ФГУП «РАДОН» // Единая информационная система в сфере закупок. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/documents.html?regNumber=0573100027718000164> (дата обращения: 12.11.2024).

14. Документация к аукциону в электронной форме, участниками которого могут быть только субъекты малого и среднего предпринимательства, на право заключения договора на поставку материала засыпки для нужд отделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» // Единая информационная система в сфере закупок. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/notice223/documents.html?noticeInfoId=14990583> (дата обращения: 12.11.2024).
15. Документация к открытому аукциону в электронной форме на право заключения договора на поставку смеси барьерной механоактивированной для нужд ФГУП «ГХК» // Единая информационная система в сфере закупок. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/notice223/documents.html?noticeInfoId=14821814> (дата обращения: 12.11.2024).
16. ГОСТ Р 56946-2016 (ИСО 13500:2008) «Нефтяная и газовая промышленность. Материалы буровых растворов. Технические условия и испытания». – М.: Стандартинформ, 2016. – 49 с.
17. ГОСТ 28177-89 «Глины формовочные бентонитовые. Общие технические условия» (переизд.). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 20 с.
18. Вознесенский Е. А., Карпенко Ф. С., Крупская В. В., Закусин С. В. Ключевые геотехнические характеристики глинистых материалов для инженерных барьеров безопасности ПЗРО на участке «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2024. № 3 (28) С. 43–58. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-43-58.
19. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (РБ-117-16): утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.12.2016 № 531.
20. ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». – М.: Стандартинформ, 2015. – 19 с.
21. ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости». – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
22. ГОСТ Р 55032-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к многократному замораживанию и оттаиванию». – М.: Стандартинформ, 2013. – 10 с.
23. ГОСТ 33067-2014 «Материалы геосинтетические для туннелей и подземных сооружений. Общие технические требования». – М.: Стандартинформ, 2015. – 67 с.
24. Steiner A., Vardon P. J., Broere W. (2018). The influence of freeze–thaw cycles on the shear strength of illite clay / *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, v. 171, No. 1, pp. 16–27.
25. Zou W., et al. (2020). Effects of freeze-thaw cycles on the moisture sensitivity of a compacted clay // *Engineering Geology*, v. 278, 105832.
26. Манухин И. В. Влияние циклического промерзания-оттаивания на минеральный состав, строение и свойства модельных дисперсных грунтов / 23-е Сергеевские чтения (31 марта – 1 апреля 2022 г.) // *Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения*. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 295–300.
27. Mukunoki T., et al. (2014). Study of cracking process of clay cap barrier in landfill using X-ray CT // *Applied clay science*, v. 101, pp. 558–566.
28. Albrecht B. A., Benson C. H. (2001). Effect of desiccation on compacted natural clays // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (1), pp. 67–75.
29. Scherbeck R., and Jessberger H. L. (1993). Assessment of deformed mineral sealing layers. *Proc. Green '93*, R. W. Sarsby (Eds.). Manchester, England, pp. 477–486.
30. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Обеспечение безопасности при закрытии пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (РБ-111-16): утв. приказом Ростехнадзора от 24.08.2016 № 352.
31. Свод правил. СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» (актуализир. ред. СНиП 2.02.01-83). – М., 2011.
32. Голли О. Р. Использование закономерностей набухания глинистых грунтов в строительстве // *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2004. № 8. С. 132–141.
33. ГОСТ Р 58426-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы противогололедные. Методы испытаний». – М.: Стандартинформ, 2020. – 53 с.
34. ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний» (с изм. № 1). – М.: МНКТС, 1999. – 63 с.

35. ГОСТ 30491-2012 «Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
36. ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний». – М.: Стандартинформ, 2015. – 24 с.
37. ГОСТ 34532-2019 «Цементы тампонажные. Методы испытаний». – М.: Стандартинформ, 2019. – 23 с.
38. Марьинских С. Г., Жигарев В. В., Ильина О. А., Крупская В. В. Определение подвижности глинистых материалов, используемых при создании инженерных барьеров безопасности для изоляции радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 51–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-51-60.
39. Кимель Л. Р., Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений / Справочник, изд. 2. – М.: Атомиздат, 1972. – 312 с.
40. Sellin P., Leupin O. X. (2013). The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management – a review // *Clays and Clay Minerals*, v. 61, No. 6, pp. 477–498.
41. ГОСТ 32804-2014 «Материалы геосинтетические для фундаментов, опор и земляных работ. Общие технические требования». – М.: Стандартинформ, 2016. – 77 с.
42. ГОСТ Р 70090-2022 «Материалы геосинтетические бентонитовые рулонные для гидроизоляции. Общие технические условия». – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 20 с.
43. Kiviranta L., Kumpulainen S., B+Tech Oy. Quality Control and Characterization of Bentonite Materials. Posiva Working Report 2011-84. 2011.
44. Stroes-Gascoyne S., Hamon C. J., Dixon D. A. The effects of dry density and porewater salinity on the physical and microbiological characteristics of highly compacted bentonite. Ontario Power Generation Report No. 06819-REP-01200-10016-R00, 2006.
45. ГОСТ Р 55035-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к агрессивным средам». – М.: Стандартинформ, 2013. – 9 с.
46. Morozov I., et al. (2022). Bentonite-concrete interactions in engineered barrier systems during the isolation of radioactive waste based on the results of short-term laboratory experiments // *Applied Sciences*, v. 12, No. 6, p. 3074.
47. Болдырев К. А. Моделирование коррозии углеродистой стали с учетом различных факторов в применении к прогнозированию срока службы контейнеров // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 45–57. DOI: 10 25283/2587-9707-2023-1-45-57.
48. Методика (метод) измерений № 366/2022-01.00115-2013. Количественный рентгенодифракционный анализ (КРДА) горных пород, руд и материалов по методу Ритвельда. – М.: ИГЕМ, 2022. – 22 л.
49. Методические рекомендации научного совета по минералогическим методам исследования (НСОММИ) № 191. Рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА) с использованием метода внутреннего стандарта. – М.: ВИМС, 2021. – 27 с.
50. ГОСТ 21216-2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний». – М.: Стандартинформ, 2015. – 40 с.
51. ГОСТ 23740-2016 «Грунты. Методы определения содержания органических веществ». – М.: Стандартинформ, 2017. – 9 с.
52. ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». – М.: Стандартинформ, 2016. – 19 с.
53. ГОСТ 28794-90 «Реактивы. Метод определения удельной поверхности хроматографических материалов термодесорбцией». – М.: Стандартинформ, 2008. – 6 с.
54. Методика (метод) измерений ФР.1.31.2022.44411 «Методика измерения емкости катионного обмена по адсорбции комплекса меди (II) с триэтилентетрамином – Cu-TRIEN». – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403589> (дата обращения: 12.11.2024).
55. Методика (метод) измерений ФР.1.31.2022.44414. Методика измерения коэффициента фильтрации барьерных глинистых материалов. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403592> (дата обращения: 12.11.2024).
56. ГОСТ 12248.6-2020 «Грунты. Метод определения набухания и усадки». – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.
57. ГОСТ 12248.1-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза». – М.: Стандартинформ, 2020. – 13 с.

58. ГОСТ 12248.4-2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия». – М.: Стандартинформ, 2020. – 14 с.
59. Методика (метод) измерений ФР.1.31.2022.44415. Методика измерения эффективного коэффициента диффузии и эффективной пористости барьерных глинистых материалов. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403593> (дата обращения: 12.11.2024).
60. Семенкова А. С., Романчук А. Ю., Михеев И. В., Калмыков С. Н. Экспериментальные особенности определения коэффициента распределения радионуклидов на барьерных глинистых материалах // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 90–97. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-90-97.
61. Методика (метод) измерений ФР.1.31.2022.44412. Методика измерения коэффициента распределения радионуклидов для характеристики барьерных глинистых материалов. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403590> (дата обращения: 12.11.2024).
62. Методика (метод) измерений ФР.1.31.2022.44413. Методика измерения влияния барьерных глинистых материалов на состав контактирующих растворов. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403591> (дата обращения: 12.11.2024).
63. Методика (метод) измерений ФР.1.31.2022.44416. Методика измерения максимальной плотности и оптимальной влажности барьерных глинистых материалов. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403594> (дата обращения: 12.11.2024).
64. Мартынов К. В., Захарова Е. В., Дорофеев А. Н., Зубков А. А., Прищеп А. А. Функциональные свойства глинистых материалов для защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 42–57. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-42-57.
65. 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.
66. ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия». – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 10 с.

References

1. Feder. zakon ot 11.07.2011 No. 190-FZ “Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami i o vnesenii izmenenii v otдел'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii” [Federal Law No. 190-FZ dated 11.07.2011 “On the management of radioactive waste and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation”]. 2011.
2. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii “Zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya bezopasnosti” (NP-055-14) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements” (NP-055-14)]. 2022.
3. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii “Trebovaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov” (NP-100-17) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Requirements for the composition and content of the report on the justification of the safety of radioactive waste disposal sites” (NP-100-17)]. 2017.
4. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii “Near-surface disposal of radioactive waste. Safety requirements” (NP-069-14) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Near-surface disposal of radioactive waste. Safety requirements” (NP-069-14)]. 2022.
5. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii “Trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti punktov razmeshcheniya osobykh radioaktivnykh otkhodov i punktov konservatsii osobykh radioaktivnykh otkhodov” (NP-103-17) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Requirements for ensuring the safety of special radioactive waste placement sites and special radioactive waste conservation sites” (NP-103-17)]. 2022.
6. Ilyina O. A., Lundin D. S., Proskurin D. V., Vedernikova M. V., Biryukov D. V. (2021). Materialy i tekhnologii dlya radikal'nogo uluchsheniya gidrozoliruyushchikh kharakteristik khranilishch RAO [Materials and technologies providing radical improvement of RW storage facility waterproofing capacities]. Радиоактивные отходы – Radioactive waste, No. 1 (14), pp. 51–62. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-51-62. [in Russian].

7. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. (2020). Izolyatsionnyye svoystva bentonitovykh bar'yernykh sistem dlya zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov v Nizhnepanskom massive [Buffer properties of bentonite barrier systems for radioactive waste isolation in geological repository in the Nizhnepanskiy massif]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 1 (10), pp. 35–55. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.

8. Krupskaya V. V., Tyupina E. A., Zakusin S. V., Ilina O. A., Saveleva E. A. (2023). Obosnovaniye vybora glinistykh materialov dlya razrabotki inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti pri izolyatsii RAO v PGZRO na uchastke nedr “Yeniseyskiy” [On the feasibility assessment of clay material application in the development of engineered safety barrier designs for deep geological RW disposal at the Yeniseyskiy site]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 2 (23), pp. 98–112. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-98-112.

9. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. (2018). Primeneniye prirodnykh glinistykh materialov dlya povysheniya urovnya yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti ob'yektov yadernogo naslediya [The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 2 (3), pp. 30–43. [in Russian].

10. Linge I. I., Ivanov A. Y., Kazakov K. S. (2018). O sistemnykh merakh po rasshireniyu primeneniya glinyanykh materialov na ob'yektakh atomnoy otrasli [On comprehensive approach to use clay materials as nuclear facilities safety barriers]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 4 (5), pp. 33–41 [in Russian].

11. Ilina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E., Kalmykov S. N. (2019). Sovremennoye sostoyaniye v razrabotkakh i ispol'zovanii glinistykh materialov v kachestve inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti na ob'yektakh konservatsii i zakhroneniya RAO [State-of-art in the development and use of clay materials as engineered safety barriers at radioactive waste conservation and disposal facilities in Russia]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 4 (9), pp. 71–84. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.

12. Dokumentatsiya k otkrytomu odnoetapnomu konkursu v elektronnoy forme bez kvalifikatsionnogo otbora na pravo zaklyucheniya dogovora na postavku bar'ernogo materiala na osnove individual'nogo kompozitsionnogo sostava (smesi kaolinita, bentonita i vermikulita) dlya nuzhd OAO “ODC UGR” [Documentation for an open single-stage tender in electronic form without qualification selection for the right to conclude a contract for the supply of barrier material based on an individual composite composition (a mixture of kaolinite, bentonite and vermiculite) for the needs of JSC “ODC UGR” // Unified Procurement Information System]. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/notice223/documents.html?noticeInfoId=1105974> (reference date: 12.11.2024).

13. Dokumentatsiya ob elektronnom auktsione na postavku glinoporoshka bentonitovogo dlya provedeniya rabot na KHTO-2 dlya FGUP “RADON” [Documentation on the electronic auction for the supply of bentonite clay powder for work on KHTO-2 for FSUE “RADON” // Unified Procurement Information System]. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/documents.html?regNumber=0573100027718000164> (reference date: 12.11.2024).

14. Dokumentatsiya k auktsionu v elektronnoy forme, uchastnikami kotorogo mogut byt' tol'ko sub'ekty malogo i srednego predprinimatel'stva, na pravo zaklyucheniya dogovora na postavku materiala zasyпки dlya nuzhd otdeleniya “Novouralskoe” filiala “Severskiy” FGUP “NO RAO” [Documentation for the electronic auction, in which only small and medium-sized businesses can participate, for the right to conclude an agreement for the supply of backfill material for the needs of the Novouralskoye department of the Seversky branch of FSUE “NO RWM” // Unified Procurement Information System]. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/notice223/documents.html?noticeInfoId=14990583> (reference date: 12.11.2024).

15. Dokumentatsiya k otkrytomu auktsionu v elektronnoy forme na pravo zaklyucheniya dogovora na postavku smesi bar'ernoy mekhanoaktivirovannoy dlya nuzhd FGUP “GHK” [Documentation for the open electronic auction for the right to conclude an agreement for the supply of mechanically activated barrier mixture for the needs of FSUE MCC // Unified Procurement Information System]. – URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/notice223/documents.html?noticeInfoId=14821814> (reference date: 12.11.2024).

16. GOST R 56946-2016 (ISO 13500:2008). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Materialy burovnykh rastvorov. Tekhnicheskie usloviya i ispytaniya [Oil and gas industry. Drilling fluid materials. Specifications and tests]. 2016.

17. GOST 28177-89. Gliny formovochnye bentonitovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Clays molding bentonite. General specifications]. 2003.

18. Voznesensky E. A., Karpenko F. S., Krupskaya V. V., Zakusin S. V. (2024). Klyuchevyye geotekhnicheskiye kharakteristiki glinistykh materialov dlya inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti PGZRO na uchastke Yeniseyskiy [Key geotechnical characteristics of clay materials for engineered safety barriers of the deep geological RW disposal facility at the Yeniseiskiy site]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 3 (28), pp. 43–58. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-3-43-58.
19. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii “Ocenka dolgovremennei bezopasnosti punktov pripoverhnostnogo zahoroneniya radioaktivnykh otkhodov” (RB-117-16) [Safety guide in the field of atomic energy use “Long-term safety assessment of near-surface radioactive waste disposal sites” (RB-117-16)]. 2016.
20. GOST 12536-2014. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava [Soils. Laboratory methods for determining granulometric (grain) and microaggregate composition]. 2014.
21. GOST 10060-2012. Betony. Metody opredeleniya morozostoikosti [Concretes. Frost resistance determination methods]. 2012.
22. GOST R 55032-2012. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Materialy geosinteticheskie dlya dorozhnogo stroitelstva. Metod opredeleniya ustojchivosti k mnogokratnomu zamorazhivaniyu i ottaivaniyu [Public roads. Geosynthetic materials for road construction. Method for determining resistance to repeated freezing and thawing]. 2012.
23. GOST 33067-2014. Materialy geosinteticheskie dlya tunnei i podzemnykh sooruzhenii. Obshchie tehicheskie trebovaniya [Geosynthetic materials for tunnels and underground structures. General technical requirements]. 2014.
24. Steiner A., Vardon P. J., Broere W. (2018). The influence of freeze–thaw cycles on the shear strength of illite clay // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, v. 171, No. 1, pp. 16–27.
25. Zou W., et al. (2020). Effects of freeze-thaw cycles on the moisture sensitivity of a compacted clay // Engineering Geology, v. 278, 105832.
26. Manukhin I. V. (2022). Vliyaniye tsiklicheskogo promerzaniya-ottaivaniya na mineral'nyy sostav, stroyeniye i svoystva model'nykh dispersnykh gruntov [Effect of cyclic freezing-thawing on the mineral composition, structure and properties of model dispersed soils]. 23^d Sergeyevskiy chteniya / Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy sovremennogo gruntovedeniya (March 23 – April 1 2022), St. Petersburg, pp. 295–300. [in Russian].
27. Mukunoki T., et al. (2014). Study of cracking process of clay cap barrier in landfill using X-ray CT // Applied clay science, v. 101, pp. 558–566.
28. Albrecht B. A., Benson C. H. (2001). Effect of desiccation on compacted natural clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127 (1), pp. 67–75.
29. Scherbeck R., and Jessberger H. L. (1993). Assessment of deformed mineral sealing layers. Proc. Green '93, R. W. Sarsby (Eds.). Manchester, England, pp. 477–486.
30. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii “Obespecheniye bezopasnosti pri zakrytii punktov pripoverkhnostnogo zahoroneniya radioaktivnykh otkhodov” (RB-111-16) [Safety guide in the field of atomic energy use “Ensuring safety during closure of near-surface radioactive waste disposal sites” (RB-111-16)]. 2016.
31. SP 22.13330.2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Foundations of buildings and structures]. 2011.
32. Golli O. R. (2004). Ispol'zovaniye zakonomernostey nabukhaniya glinistykh gruntov v stroitel'stve [Using patterns of swelling of clay soils in construction]. Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo – Urban reconstruction and geotechnical construction. No. 8, pp. 132–141. [in Russian].
33. GOST R 58426-2020. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Materialy protivogololednye. Metody ispytaniy [Public roads. Anti-icing materials. Test methods]. 2020.
34. GOST 12801-98. Materialy na osnove organicheskikh vyazhushchikh dlya dorozhnogo i aeroportnogo stroitel'stva. Metody ispytaniy [Materials based on organic binders for road and airfield construction. Test methods]. 1999.
35. GOST 30491-2012. Smesi organomineral'nye i grunty, ukreplennyye organicheskimi vyazhushchimi, dlya dorozhnogo i aeroportnogo stroitel'stva. Tekhnicheskie usloviya [Organomineral mixtures and soils reinforced with organic binders for road and airfield construction. Specifications]. 2013.
36. GOST 10181-2014. Smesi betonnye. Metody ispytaniy [Concrete mixtures. Test methods]. 2015.
37. GOST 34532-2019. Tsementy tamponazhnye. Metody ispytaniy [Grouting cements. Test methods]. 2019.

38. Maryinskikh S. G., Zhigarev V. V., Ilyina O. A., Krupskaya V. V. (2021). Opredeleniye podvizhnosti glinistyykh materialov, ispol'zuyemykh pri sozdanii inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti dlya izolyatsii radioaktivnykh otkhodov [Assessing the mobility of clay materials used in the construction of engineered safety barriers for radioactive waste disposal]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 3 (16), pp. 51–60. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-51-60.

39. Kimel' L. R., Mashkovich V. P. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy [Protection against ionizing radiation]. Guide, edition 2. – Moscow: Atomizdat, 1972. [in Russian].

40. Sellin P., Leupin O. X. (2013). The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management – a review // Clays and Clay Minerals, v. 61, No. 6, pp. 477–498.

41. GOST 32804-2014. Materialy geosinteticheskkiye dlya fundamentov, opor i zemlyanykh rabot. Obshchiye tekhnicheskkiye trebovaniya [Geosynthetic materials for foundations, supports and earthworks. General technical requirements]. 2015.

42. GOST R 70090-2022. Materialy geosinteticheskkiye bentonitovyye rulonnyye dlya gidroizolyatsii. Obshchie tekhnicheskkiye usloviya [Bentonite roll geosynthetic materials for waterproofing. General specifications]. 2022.

43. Kiviranta L., Kumpulainen S., B+Tech Oy. Quality Control and Characterization of Bentonite Materials. Posiva Working Report 2011-84. 2011.

44. Stroes-Gascoyne S., Hamon C. J., Dixon D. A. The effects of dry density and porewater salinity on the physical and microbiological characteristics of highly compacted bentonite. Ontario Power Generation Report No. 06819-REP-01200-10016-R00, 2006.

45. GOST R 55035-2012. Dorogi avtomobil'nyye obshchego pol'zovaniya. Materialy geosinteticheskkiye dlya dorozhnogo stroitel'stva. Metod opredeleniya ustoychivosti k agressivnym sredam [Public roads. Geosynthetic materials for road construction. Method for determining resistance to aggressive environments]. 2013.

46. Morozov I., et al. (2022). Bentonite-concrete interactions in engineered barrier systems during the isolation of radioactive waste based on the results of short-term laboratory experiments. Applied Sciences, v. 12, No. 6, p. 3074.

47. Boldyrev K. A. (2023). Modelirovaniye korrozii uglerodistoy stali s uchetom razlichnykh faktorov v primeneniye k prognozirovaniyu sroka sluzhby konteynerov [Modelling carbon steel corrosion considering different factors seeking to forecast the container lifetime]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 1 (22), pp. 45–57. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-45-57.

48. Metodika (metod) izmereniy No. 366/2022-01.00115-2013. Kolichestvennyy rentgenodifraktsionnyy analiz (KRDA) gornyykh porod, rud i materialov po metodu Ritvel'da [Measurement technique (method) No. 366/2022-01.00115-2013. Quantitative X-ray diffraction analysis (QXRD) of rocks, ores and materials using the Rietveld method]. 2022.

49. Metodicheskkiye rekomendatsii NSOMMI No. 191. Rentgenograficheskii kolichestvennyy fazovyy analiz (RKFA) s ispol'zovaniyem metoda vnutrennego standarta [Methodological recommendations of the NCOMMI No. 191. X-ray quantitative phase analysis (XQPA) using the internal standard method]. 2021.

50. GOST 21216-2014. Syr'ye glinistoye. Metody ispytaniy [Clay raw materials. Test methods]. 2015.

51. GOST 23740-2016. Grunty. Metody opredeleniya soderzhaniya organicheskikh veshchestv [Methods for determining the content of organic matter]. 2017.

52. GOST 5180-2015. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik [Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics]. 2016.

53. GOST 28794-90. Reaktivy. Metod opredeleniya udel'noi poverkhnosti khromatograficheskikh materialov termodesorbtsiei [Reagents. Method for determining the specific surface area of chromatographic materials by thermal desorption]. 2008.

54. Metodika (metod) izmereniy FR.1.31.2022.444111. Metodika izmereniya yemkosti kationnogo obmena po adsorbtsii kompleksa medi (II) s trietilentetraminom – Cu-TRIEN [Measurement methodology (method) FR.1.31.2022.444111. Method for measuring the cation exchange capacity by adsorption of copper (II) complex with triethylenetetramine – Cu-TRIEN]. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403589> (reference date: 12.11.2024).

55. Metodika (metod) izmereniy FR.1.31.2022.44414. Metodika izmereniya koeffitsiyenta fil'tratsii bar'yernyykh glinistyykh materialov [Measurement methodology (method) FR.1.31.2022.44414. Method for measuring

the filtration coefficient of barrier clay materials]. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403592> (reference date: 12.11.2024).

56. GOST 12248.6-2020. Grunty. Metod opredeleniya nabukhaniya i usadki [Soils. Method for determining swelling and shrinkage]. 2021.

57. GOST 12248.1-2020. Grunty. Opredeleniye kharakteristik prochnosti metodom odnoplосkostnogo sreza [Soils. Determination of strength characteristics by the single-plane shear method]. 2021.

58. GOST 12248.4-2020. Grunty. Opredeleniye kharakteristik deformiruyemosti metodom kompressionnogo szhatiya [Soils. Determination of deformability characteristics by the compression method]. 2021.

59. Metodika (metod) izmereniy FR.1.31.2022.44415. Metodika izmereniya effektivnogo koeffitsiyenta diffuzii i effektivnoy poristosti bar'yernykh glinistykh materialov [Measurement methodology (method) FR.1.31.2022.44415. Methodology for measuring the effective diffusion coefficient and effective porosity of barrier clay materials]. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403593> (reference date: 12.11.2024).

60. Semenkov A. S., Romanchuk A. Yu., Mikheev I. V., Kalmykov S. N. (2023). Eksperimental'nye osobennosti opredeleniya koehffitsienta raspredeleniya radionuklidov na bar'ernykh glinistykh materialakh [Radionuclide distribution on clay barrier materials – specific aspects associated with experimental evaluation of the distribution coefficients]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 2 (23), pp. 90–97. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-90-97.

61. Metodika (metod) izmereniy FR.1.31.2022.44412. Metodika izmereniya koeffitsiyenta raspredeleniya radionuklidov dlya kharakterizatsii bar'yernykh glinistykh materialov [Measurement methodology (method) FR.1.31.2022.44412. Method for measuring the distribution coefficient of radionuclides for characterizing barrier clay materials]. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403590> (reference date: 12.11.2024).

62. Metodika (metod) izmereniy FR.1.31.2022.44413. Metodika izmereniya vliyaniya bar'yernykh glinistykh materialov na sostav kontaktiruyushchikh rastvorov [Measurement methodology (method) FR.1.31.2022.44413. Method for measuring the effect of barrier clay materials on the composition of contacting solutions]. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403591> (reference date: 12.11.2024).

63. Metodika (metod) izmereniy FR.1.31.2022.44416. Metodika izmereniya maksimal'noy plotnosti i optimal'noy vlazhnosti bar'yernykh glinistykh materialov [Measurement methodology (method) FR.1.31.2022.44416. Method for measuring the maximum density and optimal moisture content of barrier clay materials]. – URL: <http://195.96.167.253:5002/fundmetrology/registry/16/items/1403594> (reference date: 12.11.2024).

64. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. (2020). Funktsional'nyye svoystva glinistykh materialov dlya zashchitnykh bar'yerov radiatsionno opasnykh ob"yektov [Performance of clay materials constituting to safety barriers in radiation hazardous facilities]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 4 (13), pp. 42–57. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-42-57.

65. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. (2020). Ispol'zovanie glinistykh materialov dlya sozdaniya zashchitnykh bar'erov radiatsionno opasnykh ob"ektov [Use of clay materials in the construction of protective barriers at radiation hazardous facilities]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste, No. 3 (12), pp. 39–53. [in Russian]. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-39-53.

66. GOST R 59714-2021. Smesi betonnyye samouplotnyayushchiyesya. Tekhnicheskiye usloviya [Self-compacting concrete mixtures. Specifications]. 2022.

Сведения об авторах

Ильина Ольга Александровна, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52).

Крупская Виктория Валерьевна, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., 35); ведущий научный сотрудник, Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы).

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).

Понизов Антон Владимирович, начальник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Мурлис Денис Витальевич, начальник лаборатории отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Верецагин Павел Михайлович, заместитель начальника отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Authors credentials

Ilina Olga Aleksandrovna, Project Manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya Street, Moscow, 115191), e-mail: ilina@ibrae.ac.ru.

Krupskaya Victoria Valer'evna, Senior Researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny per., Moscow, 119017); Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, 119991), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Zakusin Sergej Vyacheslavovich, Researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyy per., Moscow, 119017); Leading Engineer, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, 119991), e-mail: zakusinsergej@gmail.com.

Ponizov Anton Vladimirovich, Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Murlis Denis Vital'evich, Head of laboratory of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: murlis@secnrs.ru.

Vereshchagin Pavel Mikhailovich, Deputy Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: vereschagin@secnrs.ru.

Для цитирования

Ильина О. А., Крупская В. В., Закусин С. В., Понизов А. В., Мурлис Д. В., Верецагин П. М. Обоснование необходимых и достаточных характеристик глинистых материалов для создания инженерных барьеров безопасности // Ядерная и радиационная безопасность. 2024. № 4 (114). С. 36–57. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.114.4.003.

For citation

Ilina O. A., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Ponizov A. V., Murlis D. V., Vereshchagin P. M. (2024). Obosnovanie neobkhodimyykh i dostatochnyykh kharakteristik glinistykh materialov dlya sozdaniya inzhenernykh bar'eroov bezopasnosti [Substantiation of necessary and sufficient indicators of clay materials for constructing engineering safety barriers]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 4 (114), pp. 36–57. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.114.4.003.

