

ОПЫТНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ БАРЬЕРНЫХ ГЛИНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Калистратов¹, О. А. Ильина², А. О. Юданова¹, П. В. Сёмин³, Ш. А. Муздыбаева⁴

¹ООО «Бентонит Хакасии», Черногорск, Республика Хакасия

²ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

³ООО «Компания Бентонит», Москва

⁴ТОО «Алтайский геолого-экологический институт», Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2023 г.

В статье приведены данные выполненных исследовательских работ, визуально демонстрирующих поведение барьерных глинистых материалов различного минерального состава при контакте с водой. Показано, что бентонитовые глины обладают наиболее высокими гидроизоляционными свойствами, а с увеличением доли каолина в смеси (уменьшением доли монтмориллонита) снижается гидроизоляционная способность глинистых материалов. Можно заключить, что добавление каолинита в бентонит отрицательно сказывается на гидроизоляционных свойствах глинистых материалов при сооружении инженерных барьеров безопасности.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, материал засыпки, глинистые материалы, бентонит, каолинит, захоронение РАО, инженерные барьеры безопасности, водопоглощение, гидроизоляционные свойства.

Принцип глубокоэшелонированной (многобарьерной) защиты при изоляции радиоактивных отходов (РАО), в том числе особых, захораниваемых на месте (например, ПУГР и др.) предусматривает сочетание естественных и инженерных барьеров безопасности (ИББ) [1]. Важной составляющей системы инженерных барьеров является глинистый буферный материал, основным назначением которого является ограничение и задержка выхода радионуклидов в окружающую среду.

Рассмотрение сценариев эволюции при обосновании долговременной безопасности не исключает проникновения воды внутрь изоляционного контура вследствие изменения гидрологического режима, геологических, техногенных или других процессов. Прогнозирование

состояния ИББ после проникновения воды требует проведения исследований свойств барьерных смесей и их поведения при различных сценариях обводнения.

Целью настоящей работы являлась оценка поведения глинистых барьерных смесей различного состава при контакте с водой в лабораторных условиях.

Для этого было выбрано два наиболее вероятных варианта поступления воды:

1. Затопление объекта в результате поступления воды сверху;
2. Поступление воды через боковые поры/трещины.

Исследования проводились на базе Лаборатории исследований новых материалов ООО «Бентонит Хакасии» в 2022 году.

Материалы и методы исследования

Образцы для исследования были приготовлены из следующих барьерных глинистых материалов (БГМ):

- бентонитовой глины месторождения «10 Хутор» (Россия, Республика Хакасия);
- каолиновой глины месторождения «Кантатское» (Россия, Красноярский край);
- вермикулита марки КВТ-1 производства ООО «Группа Магнезит».

Проведенные ранее исследования доступных на российском рынке вермикулитоподобных продуктов, в том числе материала месторождения «Ковдорское» Группы «Магнезит», не позволяют назвать его вермикулитом, так как основная фаза представлена смешанослойным минералом ряда слюда — смектит — вермикулит с содержанием набухающей компоненты (смектитовых и вермикулитовых слоев) свыше 75 % [2]. Их соотношение определить достаточно сложно, и, скорее всего, оно будет варьировать на месторождении в довольно широких пределах. Далее в статье будет указано «вермикулит» с учетом данной оговорки.

Из указанных выше материалов были изготовлены образцы для исследований. Их состав, установленный путем рентгенодифракционного анализа, приведен в табл. 1.

Подготовка исходных материалов к испытаниям проводилась следующим образом: каолиновая и бентонитовая глины, предварительно высушенные до значений влажности 10,0–12,0%, истирались до полного прохождения материала через сито с размером ячеек 0,1 мм. Затем для экспериментов глинопорошки доводились до одинаковой влажности в диапазоне 5,2–5,5%. Для поддержания заданной влажности образцы до эксперимента хранились в герметичной упаковке.

При подготовке образцов для испытаний исходные материалы смешивались в пропорциях, позволяющих получить соотношения основных минералов, указанных в табл. 1.

В исследованиях смоделированы два варианта поступления воды:

- имитация ситуации затопления сверху;
- имитация боковой поры/ трещины.

Для испытаний использовалась вода питьевая централизованного водоснабжения, соответствующая требованиям СанПиН 1.2.3685-21.

Используемые цилиндры (объем 500 см³) соответствуют требованиям ГОСТ 18481-81, пластиковые сосуды для испытаний бокового воздействия жидкости (объем 700 см³) отвечают требованиям ТР ТС 005/2011 [7].

Таблица 1. Состав образцов для испытаний

№ образца	Наименование материала	Состав	
		Компонентный	Минеральный
Образец № 1	Каолиновая глина	100 %	66,6 % – каолинит; 19,4 % – смектит*; 9,8 % – кварц; 3,0 % – иллит; 0,9 % – альбит; 0,3 % – микроклин
Образец № 2	Смесь барьерная механоактивированная композиционная (СБМК) [3]	69,5 % – образец № 1 27,0 % – образец № 4 3,5 % – вермикулит	47,7 % – каолинит; 30,5 % – смектит; 3,2 % – вермикулит; 9,9 % – кварц; 3,0 % – иллит; 2,3 % – альбит; 2,9 % – микроклин; 0,5 % – сидерит;
Образец № 3	Смесь барьерная механоактивированная (СБМ) [4]	20,0 % – образец № 1 80,0 % – образец № 4	12,0 % – каолинит; 52,8 % – смектит; 17,4 % – кварц; 3,7 % – иллит; 1,6 % – хлорит; 0,7 % – гипс; 2,7 % – альбит; 4,9 % – микроклин; 1,3 % – кальцит; 1,9 % – сидерит; 1,0 % – анатаз;
Образец № 4	Бентонитовая глина	100 %	62,9 % – смектит; 1,1 % – каолинит; 11,4 % – кварц; 3,5 % – иллит; 1,2 % – хлорит; 0,2 % – гипс; 6,1 % – альбит; 9,9 % – микроклин; 1,0 % – кальцит; 1,7 % – сидерит; 0,7 % – анатаз; 0,3 % – гематит

*Примечания: смектит представляет собой группу глинистых минералов с типом строения 2:1, в которую входят ди-октаэдрические (например, монтмориллонит, бейделит) и три-октаэдрические (например, сапонит, гекторит) разновидности. В промышленных месторождениях бентонитовых глин смектиты, ввиду особенностей их генезиса, представлены, как правило, монтмориллонитами и бейделитовыми монтмориллонитами [5], [6].

Гидроизоляционная способность глинистых материалов к поступлению жидкости сверху

Для проведения сравнительной оценки гидроизоляционных свойств исследуемых образцов, в мерные цилиндры объемом 500 см³ поместили пробы объемом 400 см³ без дополнительного уплотнения (рис. 1). Таким образом плотность скелета насыпных образцов составила: образец № 1 — 0,83 г/см³; образец № 2 — 0,87 г/см³; образец № 3 — 0,90 г/см³; образец № 4 — 0,94 г/см³.

В мерные цилиндры поверх образцов доливалась вода в объеме 250 см³. Динамика ее

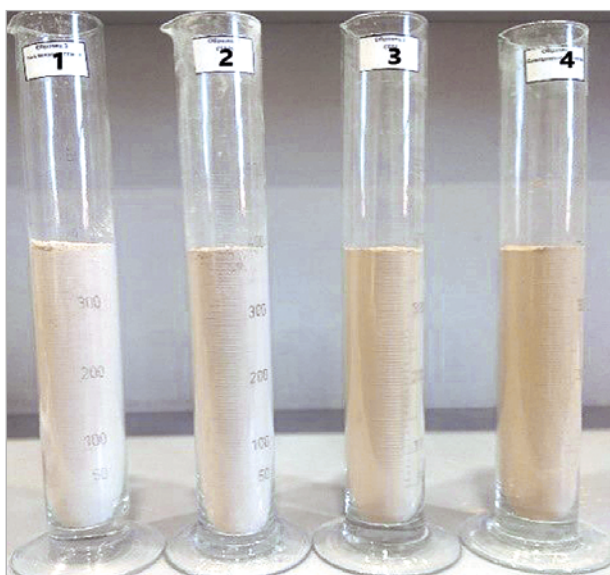


Рис. 1. Внешний вид модельных систем (1) для имитации затопления сверху до начала испытаний

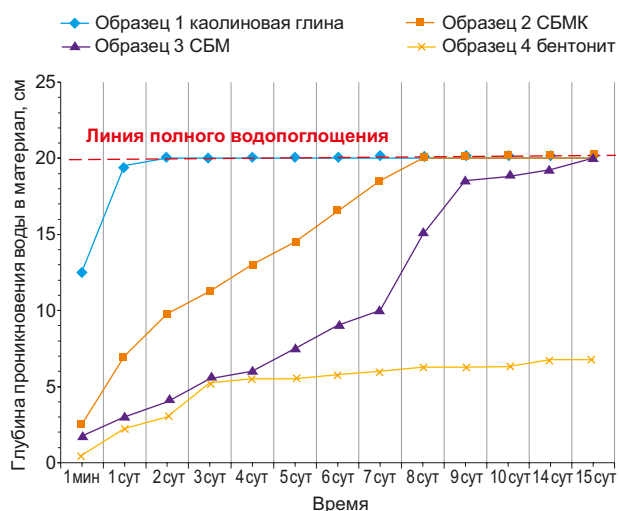


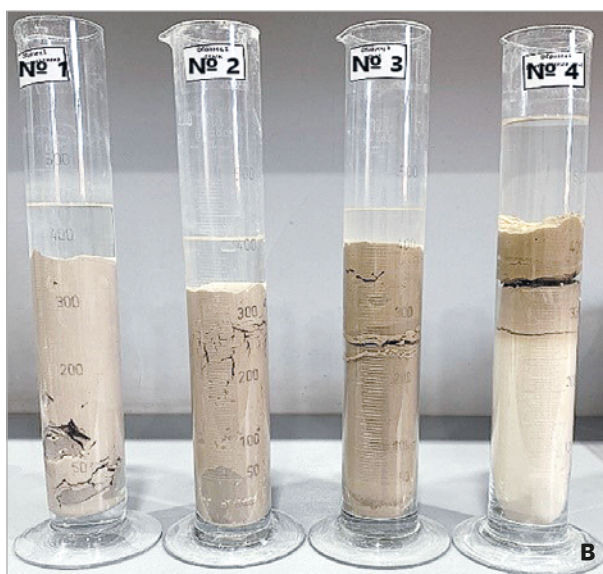
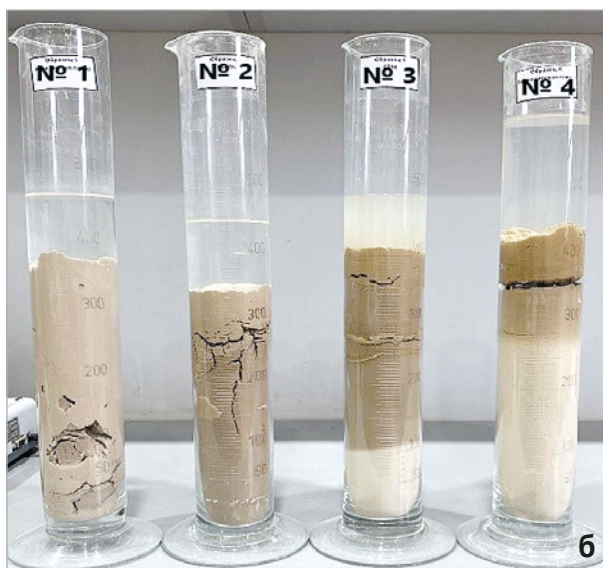
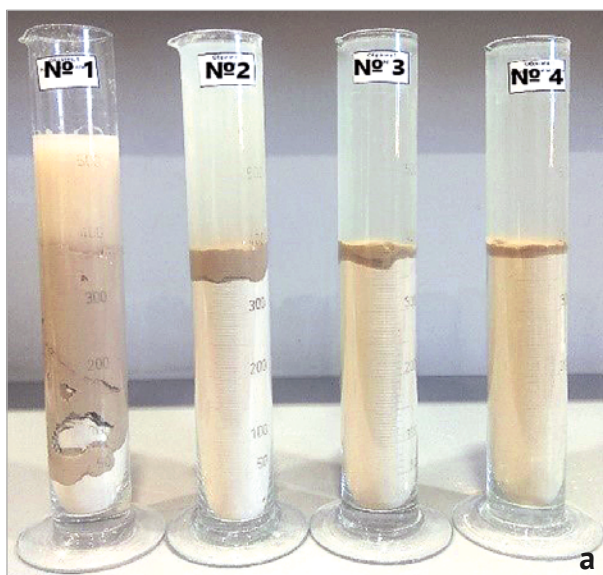
Рис. 2. Скорость продвижения фронта водопоглощения образцами в ходе испытаний

поглощения образцами БГМ в течение 15 суток представлена на рис. 2.

Внешний вид систем в разные моменты времени эксперимента представлен на рис. 3.

Анализ полученных данных выявил обратную зависимость между содержанием монтмориллонита в образцах и скоростью водонасыщения. При этом повышение содержания каолинита, наоборот, способствует ускорению водонасыщения образца. Визуально поступление воды в образец проявлялось в виде изменения цвета обводненного материала.

По истечении 15 суток насыщение водой на 100% произошло в образцах № 1–3, причем образец №1 (каолиновая глина) полностью насытился водой за первые 2 суток.



а) через 5 минут после поступления воды, б) через 5 суток после поступления воды, в) через 15 суток после поступления воды

Рис. 3. Внешний вид модельных систем (1) в ходе эксперимента

В чистом бентоните (образец №4) наблюдалось образование «пробки», при котором участок, контактирующий с водой, набухая, препятствовал дальнейшему проникновению жидкости внутрь образца, сохраняя в первоначальном состоянии нижележащие частицы. Стоит отметить, что в представленном эксперименте не оценивалась величина водопоглощения, а только динамика процесса.

Гидроизоляционная способность глинистых материалов к боковому поступлению жидкости

Для оценки гидроизоляционной способности образцов БГМ к попаданию воды при боковом повреждении стенки (боковому водопоглощению) при заданном объеме наполнения, были подготовлены мерные пластиковые емкости объемом 700 см³. Отверстия для бокового поступления воды разместили на высоте 40 мм от нижнего края в четырех местах по окружности. Для получения ровного отверстия фиксированного диаметра использовалась раскаленная игла диаметром 1 мм.

В подготовленные емкости помещали испытываемые образцы объемом 500 см³ без уплотнения (рис. 4) с вышеуказанными значениями плотности скелета.

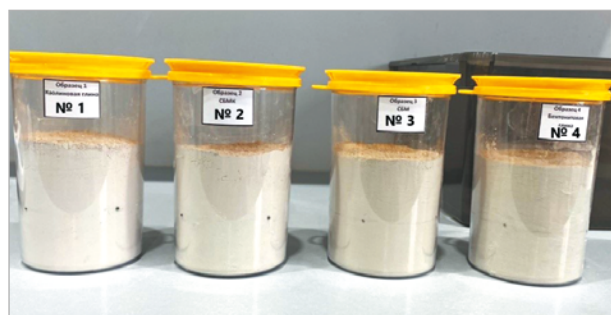


Рис. 4. Внешний вид модельных систем (2) для имитации боковой поры/трещины

Во время экспериментов образцы поместили в емкость с водой. Во избежание попадания влаги сверху, стаканы плотно закрыли крышками и использовали утяжелители, размещенные на крышках. Уровень воды в емкости устанавливался и поддерживался таким образом, чтобы места поступления воды в модельные системы (отверстия на боковой стенке) находились на равном расстоянии от дна и от верхней кромки воды (рис. 5).

В ходе эксперимента в каждой системе фиксировался начальный вид и последующие изменения:



Рис. 5. Вид модельных систем (2) для имитации боковой поры/трещины в ходе проведения эксперимента

- массы проб в стаканах,
- исходного цвета и структуры образцов за счет водопоглощения.

Изменения фиксировались через 5, 10, 30, 60 минут, а затем каждые два часа в течение первого рабочего дня. В последующие дни — два раза в день. Исследование проводилось на протяжении 15 суток.

Динамика изменения массы образцов за счет их водонасыщения в зависимости от времени контакта с водой и минерального состава представлена на рис. 6.

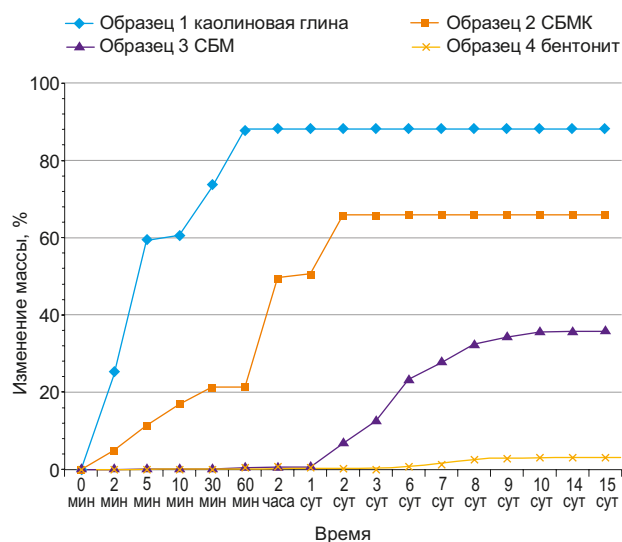


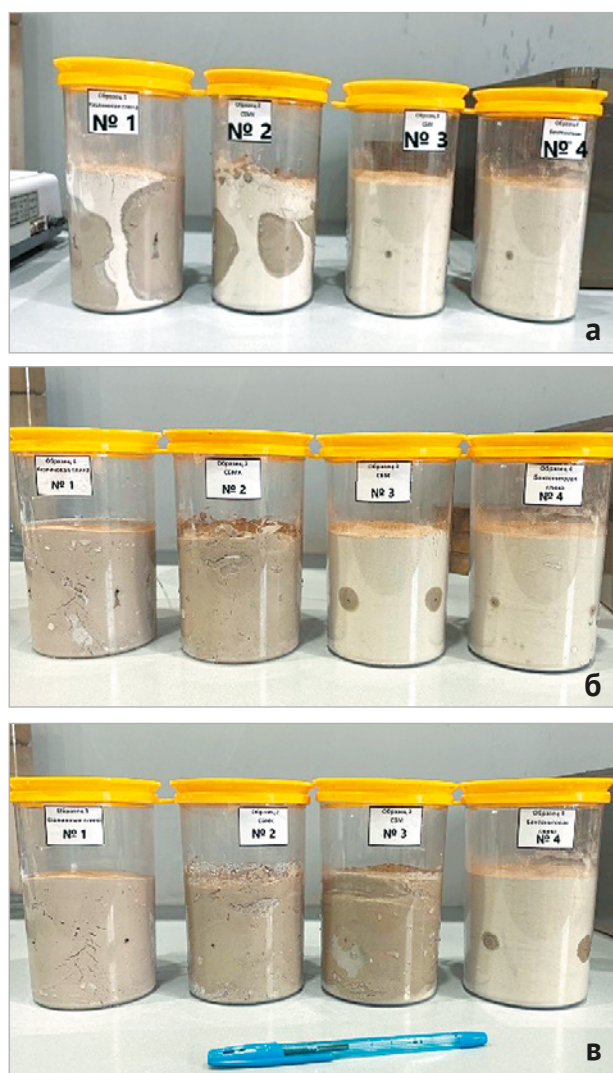
Рис. 6. Зависимость изменения массы образцов от времени контакта с водой

По результатам проведенных испытаний установлено, что у образца №1 (100% каолиновая глина) через боковой контакт общей площадью $\approx 3,14 \text{ мм}^2$ произошло полное насыщение водой за 2 часа.

Минимальные значения изменения массы при водопоглощении (ограниченно в местах контакта образца с водой) отмечены в образце №4 (100% бентонитовая глина). Динамика

влажнонасыщения в эксперименте в течение 15 суток практически отсутствовала. Можно утверждать, что при контакте сухого бентонитового материала с водой произошло его увлажнение и за счет набухания создан локальный водонепроницаемый участок, через который дальнейшее продвижение воды в образец практически прекратилось в наблюдаемый промежуток времени, и система стабилизировалась.

Внешний вид модельных систем для имитация боковой поры/трещины после завершения эксперимента представлен на рис. 7в.



а) вид систем через 10 мин от начала эксперимента,
б) вид систем через 3 сут от начала эксперимента,
в) вид систем через 13 сут от начала эксперимента

Рис. 7. Вид модельных систем (2) для имитация боковой поры/ трещины после завершения эксперимента

Обсуждение результатов

Каолиновая глина по минеральному составу представлена преимущественно каолинитом с примесью смектита до 20%. При этом известно,

что только смектит обладает задерживающими воду свойствами [8]–[12], а в случае каолиновой глины основной компонент каолинит играет роль проницаемого матрикса (как и подавляющее количество неглинистых минералов — кварц, полевые шпаты и др.). Особенно в процессе водонасыщения, как было продемонстрировано в данной работе. Можно утверждать, что каолиновые глины будут в значительной степени водонепроницаемыми, что также можно сказать и про смеси на основе каолин — бентонит с высоким содержанием каолинита.

Кроме того, во втором эксперименте в системах, содержащих каолиновую глину, фиксировалось наличие воды над поверхностью образца. Появление жидкости над образцом свидетельствует о высокой фильтрующей способности в отношении воды и, соответственно, низких гидроизолирующих свойствах.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов была показана роль минерального состава в водопоглощении глинистыми материалами водных растворов, а также подтвержден факт высоких гидроизолирующих свойств бентонитовых глин, в то время как каолиновые глины продемонстрировали повышенную фильтрующую способность.

Заключение

1. В ходе проведенных экспериментов было показано, что бентонитовые глины обладают наиболее высокими гидроизоляционными свойствами, а с увеличением доли каолина в смеси (уменьшением доли смектита) снижается гидроизоляционная способность глинистых материалов. Можно сделать вывод, что добавление каолинита в бентонит отрицательно сказывается на гидроизоляционных свойствах глинистых материалов при сооружении ИББ.

2. Способ поступления воды к образцу (сверху или через боковые повреждения) не сказывается на водопоглощении. В обоих случаях максимальная скорость водопоглощения отмечена у каолиновой глины. Снижение данного показателя проявляется с увеличением содержания бентонитового компонента (содержания смектита).

3. Добавка в глинистый материал до 3,5% вермикулитоподобного материала не оказывает влияния на гидроизоляционные свойства.

4. Приведенные результаты могут использоваться в качестве аргумента для исключения каолиновой глины из рассмотрения в качестве материала для буферной зоны при захоронении

РАО, в т. ч. особых, и расширения практики применения бентонитовых глин в качестве материалов ИББ.

5. В рамках развития исследований по изучению гидроизоляционных свойств барьерных глинистых материалов предполагается проведение аналогичных экспериментальных работ в условиях повторяемости и с использованием испытательных стендов для получения и оценки статистической информации.

Благодарность

Авторы выражают благодарность к. г.-м. н. Крупской В. В. (ИГЕМ РАН, МГУ имени М. В. Ломоносова) за определение минерального состава материалов.

Литература

1. Гаврилов П. М., Антоненко М. В., Музыкантов А. А. Вывод из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов ФГУП «ГХК» // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–18 апреля 2014 г. Т. 3. — Томск, 2014. — Изд-во ТПУ, 2014. Т. 3. С. 33–35.
2. Семенкова А. С., Ильина О. А., Крупская В. В. и др. Сорбция радионуклидов на глинистых минералах — компонентах инженерных барьеров безопасности // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2021. Т. 62. № 5. С. 425–434.
3. ТУ 572923-004-65578141-2013. Смесь барьерная механоактивированная композиционная.
4. ТУ 08.12.22-021-01424676-2022. Смесь барьерная механоактивированная.
5. Белоусов П. Е., Крупская В. В. Бентонитовые глины России и стран ближнего зарубежья //

Георесурсы. 2019. Т. 21. № 3. С. 79–90. DOI: 10.18599/grs.2019.3.79-90.

6. Belousov, P., Chupalenkov, N., Christidis, G., Zakusin, S., Zakusina, O., Morozov, I., Chernov, M., Zaitseva, T., Tyupina, E., Krupskaya, V., 2021. Carboniferous Bentonites of 10th Khutor Deposit (Russia): Geology, Mineralogy, Genesis and Properties. Appl. Clay Sci. 215, 9365. <https://doi.org/10.3390/iecms2021-09365>.

7. ТР ТС 005/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности упаковки» (с изменениями на 18 октября 2016 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902299529?section=text> (дата обращения: 25.11.2022).

8. 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.

9. 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.

10. Мартынов К. В., Жаркова В. О., Захарова Е. В. Деформация и фильтрация в глинистых материалах для защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2021. № 4 (17). С. 78–88. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-78-88.

11. Осипов В. И., Соколов В. Н. Глины и их свойства, 2013. ГЕОС г. Москва, 576 с.

12. Kohno M. Swelling-Pressure and Hydraulic Conductivity of Compacted Clays Focusing on the Clay-Mineral Type. Materials Transactions, Vol. 62, No. 8 (2021) pp. 1203–1209. DOI: 10.2320/matertrans.Z-M2021833.

Информация об авторах

Калистратов Алексей Алексеевич, директор по качеству, ООО «Бентонит Хакасии» (655162, Республика Хакасия, Черногорск, ул. Максима Горького, д. 11 А), e-mail: kalistratov@b-kh.ru.

Ильина Ольга Александровна, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: ilina@ibrae.ac.ru.

Юданова Анна Олеговна, заместитель директора по качеству, ООО «Бентонит Хакасии» (655162, Республика Хакасия, Черногорск, ул. Максима Горького, д. 11 А), e-mail: yudanova@b-kh.ru.

Сёмин Павел Викторович, руководитель проекта, ООО «Компания Бентонит» (125009, Москва, ул. Тверская, д. 12, стр. 1), e-mail: semin@bentonit.ru.

Муздыбаева Шарбану Акказиновна, кандидат химических наук, директор ТОО «Алтайский геолого-экологический институт» (070004, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Карла Либкнехта, д. 21), e-mail: muzdybaeva@agikaz.pro.

Библиографическое описание статьи

Калистратов А. А., Ильина О. А., Юданова А. О., Семин П. В., Муздыбаева Ш. А. Опытная демонстрация гидроизоляционных свойств барьерных глинистых материалов // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 82—89. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-82-89.

WATERPROOFING PROPERTIES OF CLAY-BASED BARRIER MATERIALS AND THEIR EXPERIMENTAL DEMONSTRATION

Kalistratov A. A.¹, Ilina O. A.², Yudanova F. O.¹, Semin P. V.³, Muzdybaeva Sh. A.⁴

¹«Bentonite of Khakassia» Ltd., Republic of Khakassia, Chernogorsk, Russia

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

³Bentonite Company Ltd, Moscow, Russia

⁴Altai Geological and Ecological Institute, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

Article received on February 1, 2023

The article presents research data visually demonstrating the behavior of barrier clay materials with different mineral compositions when interacting with water. It shows that bentonite clays have higher waterproofing capacity: increased portion of kaolin in the mixture (decreased portion of montmorillonite) yields in a decreased waterproofing capacity of clay materials. It can be concluded that the addition of kaolinite to bentonite has negative effect on the waterproofing capacity of clay materials used in the engineered safety barriers construction.

Keywords: radioactive waste, backfill material, clay materials, bentonite, kaolinite, RW disposal, engineered safety barriers, water absorption capacity, waterproofing properties.

Acknowledgement

Authors would like to acknowledge Ph. D. Krupskaya V. V. (IGEM RAS, Lomonosov Moscow State University) for its efforts in identifying the mineral composition of the considered materials.

References

1. Gavrilov P. M., Antonenko M. V., Muzykantov A. A. Vывод из эксплуатации промышлennykh uran-grafitovykh reaktorov FGUP "GCHK" [Decommissioning of production uranium-graphite reactors at FSUE MCC site]. *Sovremennyye tekhnika i tekhnologii: sbornik trudov XX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Modern equipment and technologies: proceedings of the XX International Scientific

and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Tomsk, April 14—18, 2014. Vol. 3. — Tomsk, TPU Publishing House Publ., 2014. Pp. 33—35.

2. Semenkov A. S., Il'ina O. A., Krupskaya V. V. et al. Sorbtсия 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.

3. TU 572923-004-65578141-2013. *Smes' bar'ernaya mekhanoaktivirovannaya kompozitsionnaya* [Mechanically activated composite barrier mixture].

4. TU 08.12.22-021-01424676-2022. *Smes' bar'ernaya mekhanoaktivirovannaya* [Mechanically activated barrier mixture].

5. Belousov P. E., Krupskaya V. V. Bentonitovyie gliny Rossii i stran blizhnego zarubezh'ya [Bentonite Clays of Russia and Neighboring Countries]. *Georesursy — Georesursy*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 79–90. DOI: 10.18599/grs.2019.3.79-90.
6. Belousov P., Chupalenkov N., Christidis G. E., Zakusina O., Zakusin S., Morozov I., Chernov M., Zaitseva T., Tyupina E., Krupskaya V. Carboniferous bentonites from 10Th Khutor deposit (Russia): Composition, properties and features of genesis. *Applied Clay Science*, 2021, vol. 215, p. 106308. DOI: 10.1016/j.clay.2021.106308.
7. TR TS 005/2011. *Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza “O bezopasnosti upakovki”* [Technical Regulations of the Customs Union on the Packaging Safety] (as amended on October 18, 2016). — URL: <https://docs.cntd.ru/document/902299529?section=text> (accessed on 11/25/2022).
8. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. Primenenie prirodnykh glinistykh materialov dlya povysheniya urovnya yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti ob"ektov yadernogo naslediya [The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 30–43.
9. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. Izolyatsionnye svoistva bentonitovykh bar'ernykh sistem dlya zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov v Nizhnekanskom massive [Properties of Bentonite Barrier Systems for Radioactive Waste Isolation in Geological Repository in the Nizhnekanskiy Massif]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 35–55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.
10. Martynov K. V., Zharkova V. O., Zakharova E. V. Deformatsiya i fil'tratsiya v glinistykh materialakh dlya zashchitnykh bar'erov radiatsionno opasnykh ob"ektov [Deformation and Filtration in Clay Materials Constituting to the Safety Barriers of Radiation Hazardous Facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 4 (17), pp. 78–88. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-78-88.
11. Osipov V. I., Sokolov V. N. *Gliny i ikh svoistva: sostav, stroenie i formirovanie svoistv* [Clays and their properties: composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013. 576 p.
12. Kohno M. Swelling-Pressure and Hydraulic Conductivity of Compacted Clays Focusing on the Clay-Mineral Type. *Materials Transactions*, 2021, vol. 62, no. 8, pp. 1203–1209. DOI: 10.2320/matertrans.Z-M2021833.

Information about the authors

Kalistratov Alexey Alexeyevich, Director of quality, «Bentonite of Khakassia» Ltd. (11A, Maxim Gorky st., Chernogorsk, Republic of Khakassia, 655162, Russia), e-mail: kalistratov@b-kh.ru.

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

Yudanova Anna Olegovna, Deputy Director of quality «Bentonite of Khakassia» Ltd. (11A, Maxim Gorky st., Chernogorsk, Republic of Khakassia, 655162, Russia), e-mail: yudanova@b-kh.ru.

Semin Pavel Viktorovich, Project Manager, Bentonite Company Ltd (12/1 Tverskaya st., Moscow, 125009, Russia), e-mail: semin@bentonit.ru.

Muzdybayeva Sharbanu Akkazinovna, Candidate of Chemical Sciences, Director of Altai Geological and Ecological Institute (21, Karl Liebknecht str., Ust-Kamenogorsk, 21070004, Republic of Kazakhstan), e-mail: muzdybaeva@agikaz.pro.

Bibliographic description

Kalistratov A. A., Ilina O. A., Yudanova A. O., Semin P. V., Muzdybayeva Sh. A. Waterproofing properties of clay-based barrier materials and their experimental demonstration. *Radioactive Waste* 2023, no. 2 (23), pp. 82–89. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-82-89. (In Russian).