

# МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАДИКАЛЬНОГО УЛУЧШЕНИЯ ГИДРОИЗОЛИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХРАНИЛИЩ РАО

О. А. Ильина<sup>1</sup>, Д. С. Лундин<sup>2</sup>, Д. В. Проскурин<sup>3</sup>, М. В. Ведерникова<sup>4</sup>, Д. В. Бирюков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ООО «Компания Бентонит», Москва

<sup>2</sup>ООО «БентИзол», Курганская обл.

<sup>3</sup>ООО «Бентонит Хакасии», Черногорск, Республика Хакасия

<sup>4</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2021 г.

*В статье рассмотрены современные материалы на основе природных глин и глинистых минералов, технологии их использования для создания и восстановления инженерных барьеров безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов при их консервации и переводе в пункты захоронения, сооружения и закрытии пунктов захоронения радиоактивных отходов. Даны описания области применения таких материалов, имеющегося опыта их использования и основные характеристики, позволяющие расширить практику применения глинистых материалов на иных объектах использования атомной энергии.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, БентИнжект, бентонитовые маты (GCL), экраны из уплотненной глины (CCL), противодиффузионные и противомиграционные завесы, jet-grouting, «стена в грунте», инъектирование, пункты захоронения радиоактивных отходов, консервация пунктов размещения особых радиоактивных отходов, инженерные барьеры безопасности.

## Введение

Развертывание работ по созданию новых пунктов захоронения РАО (ПЗРО) и консервации пунктов размещения особых РАО (ПРОРАО) требует применения максимально эффективных технологий с безусловной оглядкой на экономическую составляющую. Долговременная безопасность объектов во многом определяется изоляционными свойствами как геологических образований, в которых размещаются объекты, так и инженерных материалов, которые применяются при их создании. Практически всеми специалистами, работающими в области проектирования и обоснования безопасности ПЗРО, признано, что для барьерных материалов ведущую роль можно отвести материалам на основе природных глин.

Гидроизолирующие свойства глин хорошо известны, а в научной литературе в последнее время все больше начинает появляться работ по их фактическому или перспективному применению в области использования атомной энергии [1–3].

В рамках выполнения мероприятий ФЦП ЯРБ-1 и ФЦП ЯРБ-2 накоплен определенный опыт по консервации открытых водоемов-хранилищ ЖРО (бассейн 354 ФГУП «ГХК», бассейны Б-1, Б-2, Б-25 АО «СХК», водоем В-9 ФГУП «ПО «МАЯК»), выводу из эксплуатации ПУТР (ЭИ-2 АО «ОДЦ УТР») и созданию дополнительных инженерных барьеров безопасности с использованием глинистых материалов в качестве компонентов барьерных систем. В перспективе до 2030 года в рамках мероприятий ФЦП ЯРБ-2

предстоит провести работы по консервации хвостохранилищ ПХ-1, ПХ-2 АО «СХК», водоема В-17 ФГУП «ПО «МАЯК», хвостохранилища № 1 ПАО «НЗХК», а также семи ПУГР. Указанные работы, очевидно, потребуют применения технологий сооружения противofильтрационных и противомиграционных барьеров безопасности.

В долгосрочной перспективе количество объектов, для которых в той или иной мере понадобится использование глинистых материалов, может существенно увеличиться за счет включения объектов с отложенным решением по завершающей стадии жизненного цикла, а также принципиально новых объектов и областей применения. По предварительным данным, количество таких объектов может составить порядка 100.

Среди основных работ, которые должны быть выполнены в отношении практически всех приповерхностных ПЗРО и ПРОРАО, — создание покрывающих экранов, водоотводных сооружений или дренажных систем. Для пунктов размещения особых твердых РАО (ТРО) (специализированных сооружений, ПУГР и др.) — заполнение пустот буферным материалом, ликвидация водопоступлений в тело объектов, восстановление гидроизоляции и т. д. Для объектов в районах с высоким уровнем грунтовых вод, хвостохранилищ, водоемов-хранилищ ЖРО и ряда пунктов размещения особых ТРО (например, земляных траншей) — создание вертикальных, наклонных или горизонтальных гидроизоляционных экранов и завес в грунте, ввиду их отсутствия или нарушения целостности. Практически для решения всех перечисленных задач могут использоваться среди прочих технологии, предусматривающие применение материалов на основе природных глин.

Целью настоящей статьи является обзор современных технологий и материалов, в частности, состава «БентИнжект», широко используемых в иных отраслях для задач корректировки или управления локальными гидрологическими режимами, для их применения на объектах использования атомной энергии.

### Противofильтрационные и противомиграционные экраны

#### *Уплотненные глинистые грунты*

Простые барьерные системы обычно выполняются из уплотненных глинистых грунтов, так называемых CCL — Compacted Clay Liner. При надлежащем уплотнении CCL могут обеспечить достаточно низкий коэффициент фильтрации, например,  $10^{-9}$  м/с [4]. Однако из-за

неравномерной осадки и неоднородного уплотнения плотность экрана из глин или суглинков может отличаться на различных участках, и его изолирующая способность будет ниже ожидаемой. Использование экранов из уплотненных глинистых грунтов может быть экономически выгодно при условии близкого расположения их залегания к ПЗРО. Положительные примеры использования CCL из слабопроницаемых глин в качестве элемента системы инженерных барьеров пункта захоронения очень низкоактивных и низкоактивных РАО были описаны в [5].

Когда существует нехватка глинистого материала, в качестве добавки для улучшения изоляционных характеристик грунтов можно использовать бентонит (в объеме 5—15%). Данное техническое решение не является универсальным, и в каждом конкретном случае будет необходимо проводить оценку оптимальной дозировки добавки бентонита. Пример изучения гидравлической проводимости смесей тропических почв Бразилии и бентонита для целей создания CCL был рассмотрен в работе [6].

Технологический процесс подготовки композиции местного грунта с бентонитом включает смешивание, экструдирование и гомогенизацию. Экономически приемлемым данный способ будет, только если производственная линия подготовки смеси находится в непосредственной близости от объекта применения.

Другой способ внесения бентонита в грунт — технология холодного ресайклинга, позволяющая проводить укрепление (стабилизацию) грунтов различными вяжущими материалами путем предварительного фрезерования и смешения [7]. При фрезеровании в рабочую камеру ресайклера под давлением впрыскивается бентонит в виде суспензии (бентонитовый раствор или инъекционный состав «БентИнжект», который будет описан далее в статье), которая предварительно готовится в мобильной смесительной установке. Кроме бентонита, в зависимости от назначения получаемого покрытия, могут применяться полимерные добавки, цемент. Ресайклинг проводится на глубину до 250 мм.

#### *Геосинтетические бентонитовые изоляционные маты*

Использование геосинтетических бентонитовых изоляционных матов (GCL — Geosynthetic Clay Liner) позволило в значительной степени заменить или дополнить использовавшиеся ранее в барьерных системах слои из уплотненной глины (CCL) и бентонито-грунтовые смеси. Бентонитовый мат представляет собой рулонный геосинтетический материал,

внутри которого размещен тонкий слой (обычно 5–10 мм) Na-бентонита, закрепленный иглопробивным способом или с помощью сшивания. Сравнительные характеристики геосинтетических изоляционных матов (GCL) на основе Na-бентонита и слоя из уплотненной глины (CCL) приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Эквивалентный коэффициент фильтрации ( $k_{sat}$ ), толщина и расчетный срок службы GCL на основе Na-бентонита и CCL, подвергающихся воздействию различных жидкостей [4]**

Проникающее вещество / параметр	GCL	CCL
Процентное содержание глины, %	> 90	30–50
Процентное содержание набухающего глинистого минерала, %	> 80	10
Толщина, L, см	1	1·10 <sup>2</sup>
Пористость, n	0,65	0,3
Масса набухающей глины <sup>1</sup> , кг/м <sup>2</sup>	4	30–50
Масса набухающей глины на см глубины, кг/м <sup>2</sup>	4	0,6–1,0
<b>Деионизированная вода</b>		
Коэффициент фильтрации $k_{sat}$ <sup>1</sup> , м/с	1·10 <sup>-11</sup>	1·10 <sup>-9</sup>
Эквивалентная толщина <sup>3</sup> , см	1	1·10 <sup>2</sup>
Эквивалентная продолжительность срока службы <sup>4</sup> , лет	41	9,5
<b>0,1 M NaCl</b>		
Коэффициент фильтрации $k_{sat}$ , м/с	4·10 <sup>-11</sup>	5·10 <sup>-9</sup>
Эквивалентная толщина, см	4	5·10 <sup>2</sup>
Эквивалентная продолжительность срока службы, лет	10	2
<b>0,1 M CaCl<sub>2</sub></b>		
Коэффициент фильтрации $k_{sat}$ , м/с	1·10 <sup>-10</sup>	1·10 <sup>-8</sup>
Эквивалентная толщина, см	10	10·10 <sup>2</sup>
Эквивалентная продолжительность срока службы, лет	4	1
<b>Рассол на 1 M</b>		
Коэффициент фильтрации $k_{sat}$ , м/с	8·10 <sup>-10</sup>	5·10 <sup>-8</sup>
Эквивалентная толщина, см	80	50·10 <sup>2</sup>
Эквивалентная продолжительность срока службы, дней	190	70

<sup>1</sup> В соответствии со стандартными техническими требованиями к изготовлению GCL принимаемая во внимание объемная плотность для CCL составляет 2 г/см<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Коэффициент фильтрации,  $k_{sat}$ , выведен на основании экспериментальных значений, найденных в литературе (например, Rowe 2001; Shackelford and Lee 2003; Bouazza et al. 2006).

<sup>3</sup> Эквивалентная толщина рассчитывается как толщина барьера, который необходим для задержки загрязненной жидкости относительно деионизированной воды.

<sup>4</sup> Для оценки эквивалентной продолжительности срока службы используется выражение  $\eta L/k_{sat}$ ; с его помощью рассчитывают время, которое требуется для 10 см жидкости на преодоление барьера, имеющего толщину в 1 см (GCL) или 1 м (CCL).

Срок службы бентонитового мата на основании долгосрочной прочности на сдвиг и стойкости к окислению составляет не менее 100 лет [8]. Применение бентонитовых матов включено в список наилучших доступных технологий при размещении отходов производства и потребления [9]. Например, они использовались при строительстве второй очереди приповерхностного ПЗРО в г. Новоуральске в составе подстилающего экрана в сочетании со слоем уплотненной бентонитовой глины.

Способ применения бентонитового мата в составе покрывающего изолирующего барьера объекта размещения токсичных химических и радиоактивных веществ на участке «Коломенское» в г. Москве был представлен в [10]. Конструкция покрывающего экрана состоит из подстилающего слоя уплотненной глины (CCL), экрана из бентонитовых матов (GCL), дренажного, пригрузочного (супесь, песок) и почвенно-растительного слоев. Дренажный слой позволяет отвести поверхностные воды и предотвратить размывание верхнего слоя грунта, изолирующий слой GCL предотвращает попадание воды в хранилище. Для устройства дренажного слоя вместо инертных материалов (щебень, песок) могут быть применены легкие геосинтетические дренажные материалы, снижающие механическую нагрузку на конструкцию хранилища. Среди подобных материалов перспективны композиты с внутренними дренажными трубками, с помощью которых можно эффективно перехватывать и централизованно направлять стоки в коллектор для очистки и/или анализа и контроля [11]. Применение трубок позволяет этим материалам эффективно работать даже при наличии местных отрицательных уклонов местности.

Область применения бентонитовых матов может быть намного шире:

- ликвидация аварийных просыпей и разливов радиоактивных материалов при обращении с ними, в том числе при транспортировке;
- защита грунта от попадания загрязняющих и радиоактивных веществ на откосах дорог, по которым производится транспортировка РАО;
- создание противofiltrационного экрана от попадания в грунт загрязняющих и радиоактивных веществ под площадками временного размещения и хранения РАО;
- изоляция грунта на случай протечек и аварий под заводскими трубопроводами, транспортируемыми химические жидкости, радиоактивные отходы и другие опасные вещества;
- в составе покрывающих экранов ПРОРАО и ПЗРО для предотвращения попадания воды в тело хранилища.

### Инъекционный бентонитовый состав «БентИнжект»

Методы создания завес в грунте с применением слабофильтрующих глин для предотвращения миграции загрязняющих веществ и радионуклидов существуют давно. Технология «стена в грунте» широко использовалась при сооружении дамб пульпо- и хвостохранилищ, промышленных водоемов-хранилищ ЖРО, а также при выполнении работ по повышению их безопасности и консервации. Например, для повышения устойчивости плотины Теченского каскада водоемов в ее теле по всей длине (1,8 км) на глубину от 7 до 13 м был сооружен гидравлический замок [12].

Применение современных материалов и технологий позволяет создавать противofильтрационные экраны глубиной 20 м и более с помощью специальных изоляционных составов, в которых содержание сухого вещества составляет всего 30 %.

Для ликвидации протечек в подземных сооружениях и создания противofильтрационных завес ПКОРАО специально был разработан изоляционный бентонитовый состав «БентИнжект» [13]. Материал представляет собой сухую полиминеральную смесь на основе Na-бентонита, пластифицирующих и стабилизирующих добавок. При затворении смеси водой образуется текучий раствор с высоким содержанием глинистых частиц. Загущение материала и набор им заданных высоких гидроизолирующих свойств занимает 8–12 часов после его закачки (инъектирования). Основные характеристики материала «БентИнжект» представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Основные характеристики изоляционного бентонитового состава «БентИнжект» [14]**

Показатели	Ед. изм.	Значение показателя
Индекс свободного набухания, не менее	мл/г	13
Водоотдача, не более	мл	16
Погружение конуса весом 76 г через 28 дней после затворения состава (характеристика подвижности (вязкости) состава), не более	мм	16
Плотность состава через 28 дней после затворения	г/см <sup>3</sup>	1,2 (±10 %)
Коэффициент фильтрации состава через 28 дней после затворения, не более	м/с	1·10 <sup>-10</sup>
Пористость состава через 28 дней после затворения	%	88–90

Материал «БентИнжект» может применяться при создании вертикальных, наклонных и горизонтальных гидроизоляционных экранов и

завес в грунте, уплотнении грунтов (уменьшении пористости и капиллярности), ликвидации водопуступлений в подземные сооружения и помещения, восстановлении поврежденной существующей гидроизоляции.

### Устройство вертикальных траншейных противofильтрационных завес по технологии «стена в грунте»

Технология «стена в грунте» — распространенный в строительстве метод возведения фундаментов, ограждений котлованов, подпорных стен. Разработка траншеи производится под защитой бурового раствора на основе смеси бентонитового порошка с технической водой. При этом раствор выполняет функцию стабилизации стенок траншеи и предотвращает их оползание в водонасыщенных грунтах. После достижения нижней отметки в стандартной технологии «стена в грунте» обычно в траншею опускают каркасы из арматуры с последующим заполнением бетонной смесью.

Технология создания противofильтрационных завес с применением изоляционного состава «БентИнжект» [15] подразумевает, что после достижения нижней отметки траншеи производят ее заполнение высокопластичным раствором «БентИнжект» плотностью 1,20–1,25 г/см<sup>3</sup> под низким давлением 2,0–4,0 атм, с замещением и параллельной откачкой бурового раствора отводящими патрубками. Для обеспечения максимальной сплошности тела завесы заполнение траншеи необходимо производить снизу вверх, при этом первоначальный буровой раствор вытесняется и удаляется из траншеи через отводящие патрубки (рис. 1).

С применением данной технологии траншейная противofильтрационная завеса может быть сооружена глубиной до 60 метров и шириной от 0,4 до 1 м. Ее длина и конфигурация в плане не имеют ограничений. Траншеи разрабатывают отдельными участками (захватками) длиной 3–6 метров, вскрывая их через один. Буровой раствор, собранный по отводящему патрубку, хранят для повторного использования в следующем сегменте траншейной завесы.

Вертикальные противofильтрационные инженерные барьеры в грунте могут быть сооружены:

- 1) выше, по направлению движения подземных вод от места захоронения отходов, чтобы воспрепятствовать притоку воды к сооружениям ПКОРАО и ПЗРО;
- 2) ниже, по потоку подземных вод, чтобы исключить проникновение веществ-загрязнителей за пределы площадки;

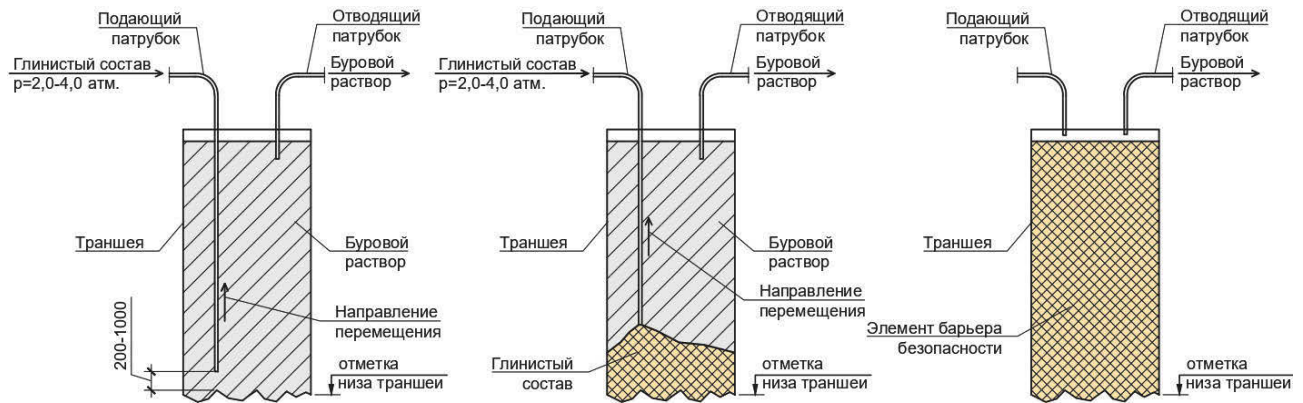


Рис. 1. Технологическая схема устройства противофильтрационной завесы типа «стена в грунте» с применением состава «БентИнжект»

3) вокруг площадки ПКРОАО и ПЗРО, с целью предотвращения распространения веществ-загрязнителей.

*Устройство вертикальных противофильтрационных завес с применением технологии jet-grouting*

Jet-grouting или технология струйной цементации, применяется для стабилизации грунтов и при строительстве и реконструкции любых

объектов, размещенных в несвязных, неустойчивых и водонасыщенных грунтах.

Принцип jet-grouting основан на разрушении энергией высокоскоростной струи инъекционного раствора природной структуры грунта и перемешивании его с нагнетаемым под высоким давлением раствором. При этом в грунтовом массиве образуется грунто-бентонитовая свая (столб) (рис. 2) [16]. В зависимости от инженерно-геологических условий площадки

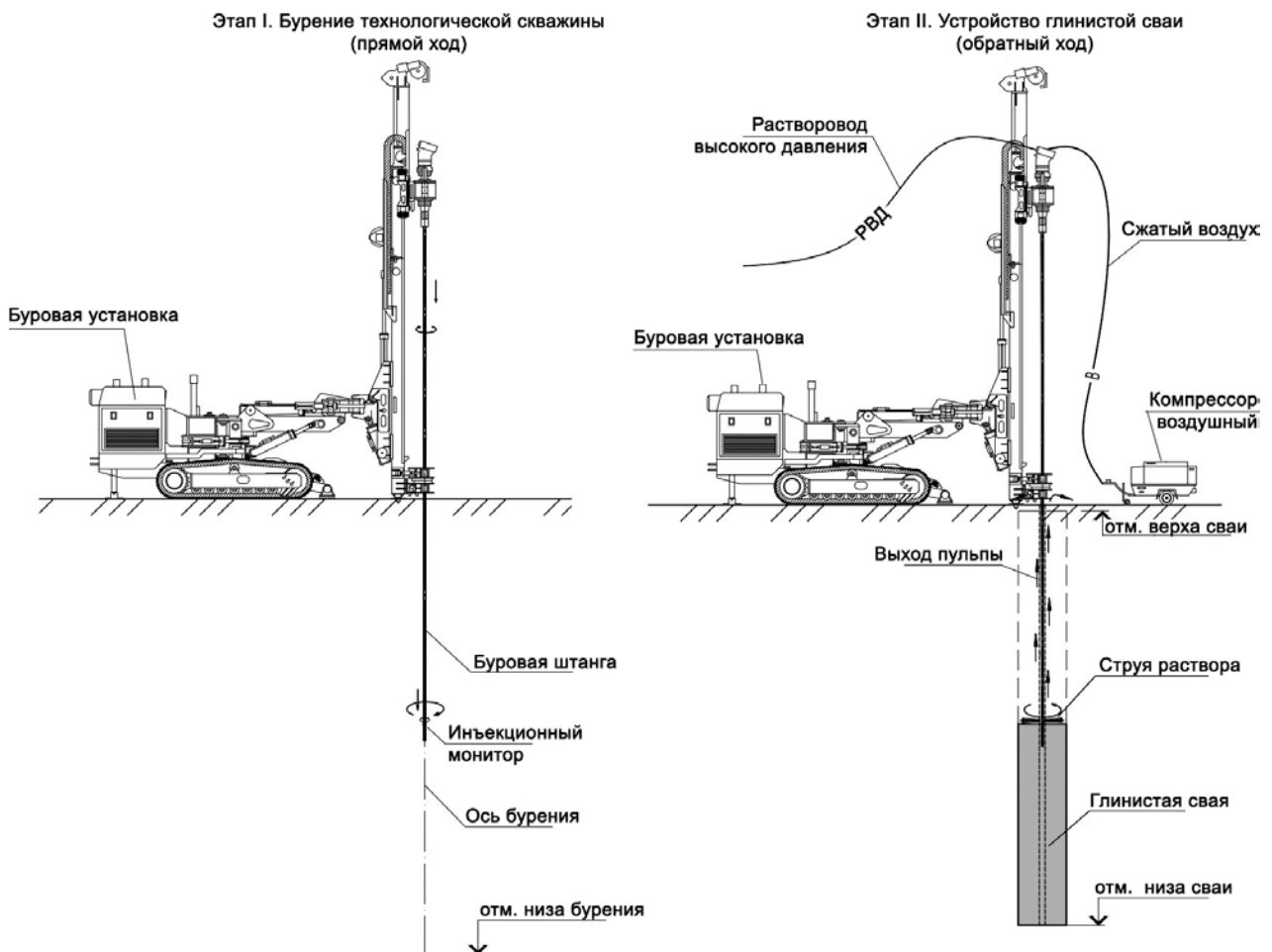


Рис. 2. Технологическая схема устройства грунтоглинистой сваи с применением состава «БентИнжект»

выбирается шаг сооружения свай: последовательное расположение в один ряд с перекрытием контуров или в два ряда с расположением центров в шахматном порядке (рис. 3). Для создания противодиффузионной завесы большей толщины можно уменьшать шаг между осями свай при их шахматном расположении. Глубина грунтоглинистых свай может достигать 60 метров, а диаметр обычно составляет 0,9–1,2 м и зависит от характеристик грунта, и определяется глубиной проникновения в него инъектируемой смеси.

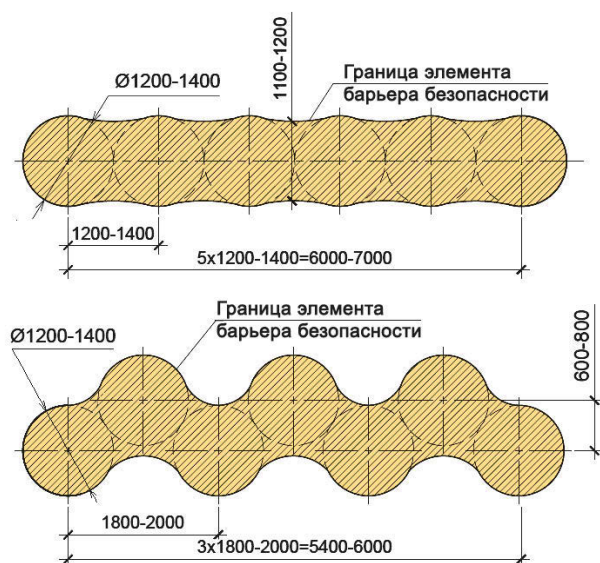


Рис. 3. Варианты схемы формирования экрана из глинистых свай (элементов барьера)

Использование материала «БентИнжект» с применением технологии jet-grouting позволяет добиться существенного повышения противодиффузионных свойств грунта за счет устройства надежного гидроизоляционного экрана. После набора заданных свойств готовый экран остается пластичным, создавая слой эластичной активной изоляции со способностью к самозалечиванию при сдвигах или осадке сооружения.

Недостатком состава «БентИнжект» является возможность образования трещин при высыхании, например, у поверхности земли, если верхний торец экрана не закрыт грунтом. Однако при попадании влаги барьер снова восстановит в полном объеме свою сплошность и гидроизолирующие свойства за счет набухания бентонитовой глины, которая содержится в его составе.

Конечные свойства барьеров по технологии «стена в грунте» и jet-grouting могут отличаться, и технологию создания экрана следует выбирать в зависимости от гидрогеологических условий и технических особенностей объекта.

### Результаты опытно-промышленного применения вертикальных противодиффузионных завес с использованием «БентИнжект»

В 2019–2020 гг. были проведены опытно-промышленные работы по обустройству противодиффузионных и противомиграционных барьеров с использованием технологий jet-grouting и «стена в грунте». Всего было создано 3 опытных участка экранов:

- грунтоглинистая свая (jet-grouting) глубиной 10 м и продуктивной толщиной 1,2–1,4 м;
- участок «стены в грунте» шириной 0,8–1,0 м и глубиной 6,0 м;
- экран из 6 грунтоглинистых свай диаметром 1,4 м и глубиной 10 м создан в непосредственной близости от ПКОРАО.

После окончания работ из экранных материалов с разной глубины были отобраны керновые пробы. В отобранных образцах были определены показатели фильтрационных, сорбционных и диффузионных характеристик: коэффициент фильтрации  $10^{-10}$ – $10^{-11}$  м/с, коэффициент диффузии трития около  $10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, коэффициент сорбционного распределения урана –  $10$ – $10^3$  мл/г [17], что соотносится с типовыми требованиями к барьерным материалам.

### Устройство горизонтальных экранов без проведения земляных работ

Вертикальных барьеров по периметру сооружения не всегда достаточно для решения проблемы обеспечения безопасности при миграции радионуклидов с грунтовыми водами. Заполнение свободного пространства ПРОРАО буферным материалом и строительство покрывающего экрана, препятствующего попаданию поверхностных вод в тело хранилища, увеличивают нагрузку на подстилающий слой и могут стать причиной увеличения его проницаемости и попадания загрязняющих веществ в почву и грунтовые воды. Перспективным направлением является промышленное освоение технологии для создания горизонтальных инженерных барьеров под ОИАЭ без проведения земляных работ.

Для решения проблемы устройства и восстановления гидроизоляции горизонтальной плоскости основания объектов и сооружений (подстилающего экрана), имеющих обширное распространение по площади (например, водоемы, шламонакопители и т. п.), может быть применен метод горизонтально направленного бурения (ГНБ) [18] и инъектирования глинистых смесей при обратной проходке расширителем.

Суть данной технологии заключается в комбинировании сооружения горизонтального ряда

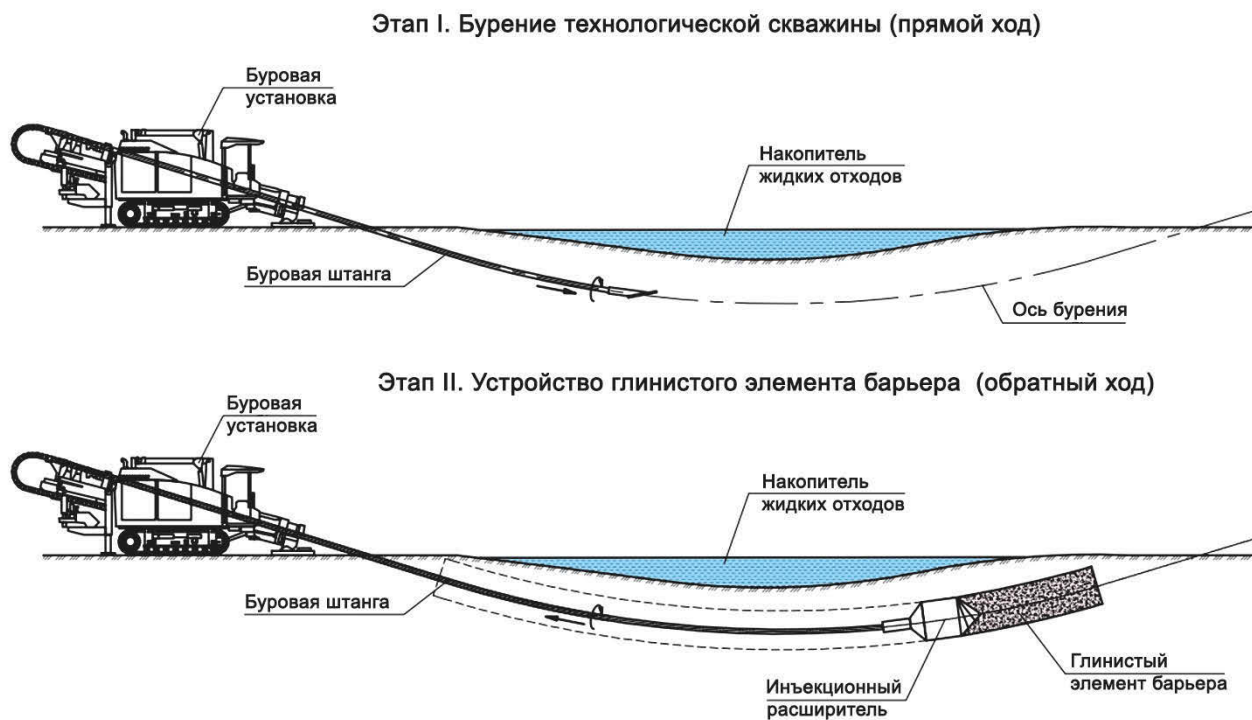


Рис. 4. Этапы устройства глинистого элемента горизонтального инженерного барьера с применением состава «БентИнжект»

пилотных буровых каналов с помощью установки для ГНБ с высокоточной системой навигации с последующим инъецированием обратным ходом пилотных каналов гидроизолирующей смесью «БентИнжект» (рис. 4). Траектории пилотных каналов строятся таким образом, чтобы обеспечивалось 100% перекрытие соседних горизонтальных стволов при инъецировании и сплошность подстилающего экрана. Гидроизоляционные характеристики такого экрана аналогичны вертикальной противодиффузионной завесе из перекрывающихся грунтоглинистых свай.

### Внутренние барьеры

Функции внутреннего инженерного барьера безопасности ПРОРАО, ПЗРО заключаются в исключении фильтрационного механизма миграции радионуклидов или снижении времени контакта РАО с водой, удержании (сорбции) выщелоченных радионуклидов за счет ликвидации пустот и свободных объемов [19].

#### Порошки, сухие смеси

Для глиняных экранов SCL, о которых говорилось выше, обычно применяют дробленую глину с размером куска до 30 см и влажностью 22–28%. Технологии переработки бентонита позволяют производить и более широкий диапазон продукции: порошки, крупка, гранулы и др.

Бентонитовый порошок в составе бурового раствора может применяться, в частности, для подготовки к эксплуатации скважин, за счет образования тонкой защитной глинистой корки, обеспечивающей устойчивость стенок. Бентонит может быть применен и для заполнения ствола скважины и подземных пустот после ее ликвидации. Бентонитовые гранулы могут быстро осесть на дно в стоячей воде, после чего набухают, оказывая давление на стенки полости, образуя надежную герметизирующую заглушку. Этот способ успешно применялся для герметизации заполненных водой буровых скважин глубиной до 500 метров [4]. В настоящее время в Великобритании проводятся лабораторные исследования возможности применения прессованного бентонита для герметизации глубоких скважин<sup>1</sup>.

Большой опыт сооружения дополнительного внутреннего инженерного барьера был получен при выводе из эксплуатации ПУГР ЭИ-2 АО «ОДЦ УГР», когда была произведена засыпка внутри реакторного пространства барьерной смеси, состоящей из 82,0–89,5% каолина, 10,0–15,0% бентонита и 0,5–3,0% вермикулита [20]. Основанием для выбора в качестве основы барьерного материала именно каолина послужило отмеченное в лабораторных условиях свойство уплотняться

<sup>1</sup> <https://www.iom3.org/resource/testing-starts-on-bentonite-system-to-seal-deep-boreholes.html>

под собственным весом после насыщения водой. Исходная насыпная плотность скелета любых глинопорошков составляет 0,9–1,1 г/см<sup>3</sup>. Уплотнение, согласно [21], достигает до 1,6–1,7 г/см<sup>3</sup> для барьерной смеси на основе каолина против 1,3–1,4 г/см<sup>3</sup> для 100% бентонита. При получаемых плотностях смесь на основе каолина обладает коэффициентом фильтрации всего на порядок выше (10<sup>-11</sup> м/с), чем для бентонита (10<sup>-12</sup> м/с). Столь высокое самоуплотнение каолина приводит к усадке барьерного материала и требует поэтапной досыпки для ликвидации пустот до завершения работ по консервации ПРОРАО. Кроме сроков выполнения работ, увеличивается расход барьерного материала и, как следствие, стоимость работ.

Набухающие глины, такие как бентонит, не показывают такого уплотнения, т. к. при контакте с водой увеличиваются в объеме, заполняя собой все свободное пространство, трещины, пустоты. Даже при меньшей плотности коэффициент фильтрации будет оставаться достаточно низким — 10<sup>-12</sup> м/с. Возникающий вопрос давления набухания, которое может оказывать бентонит на конструкции внутри пункта консервации, был рассмотрен в [22], и при плотности скелета до 1,45 г/см<sup>3</sup> давление набухания не превышает 1 МПа, что не может оказать существенного влияния на прочность конструкции.

### Инъектирование

Инъекционные технологии позволяют создавать и восстанавливать изоляцию заглубленных сооружений для предотвращения разрушения от действия грунтовых вод, а также исключения возможного попадания в них радионуклидов. Данная проблема может возникнуть при эксплуатации заглубленных сооружений различного назначения, в том числе пунктов размещения особых твердых РАО, емкостей-хранилищ ЖРО после удаления жидкой фазы.

Изоляционный состав «БентИнжект» может нагнетаться как изнутри сооружения через инъекционные отверстия (рис. 5), так и снаружи через погружаемые трубчатые инъекторы. Для восстановления изоляции по технологии инъектирования не требуется выполнение разработки грунта. Данные работы могут быть выполнены в сложных и стесненных условиях строительной площадки.

На начальном этапе гидратации материал имеет текучепластичную консистенцию, позволяющую производить работы инъекционным методом, далее происходит его загущение до устойчивого состояния тугопластичной консистенции. В этом состоянии коэффициент фильтрации материала не превышает 1·10<sup>-10</sup> м/с.

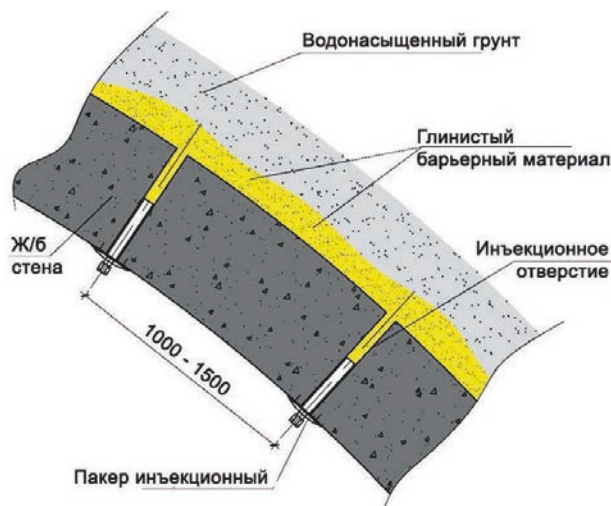


Рис. 5. Схема устройства изоляции методом законтурного инъектирования с применением состава «БентИнжект»

Преимущества изоляции методом законтурного инъектирования с применением глинистых растворов:

- исключается дальнейшее замачивание бетонных конструкций;
- минимизируется уровень коррозии арматуры и бетона;
- получаемый гидроизоляционный слой устойчив к вибрационному воздействию;
- возможен ремонт и эксплуатация гидроизоляции (повторное нагнетание в подготовленные инъекционные гнезда);
- материал инъекционной смеси нейтрален к бетону конструкции;
- материал смеси экологически чистый (не загрязняет почву и грунтовые воды).

### Заключение

В статье приводится обзор как уже нашедших широкое применение при решении задач повышения безопасности ПРОРАО и ПЗРО технологий и материалов на основе глинистых материалов, так и перспективных — направленных на радикальное улучшение гидроизолирующих характеристик хранилищ РАО. В частности, рассматриваются характеристики и варианты применения бентонитового состава «БентИнжект», созданного для ликвидации протечек в подземных сооружениях и сооружения противотрационных завес ПКРАО.

Технологии создания и восстановления инженерных барьеров безопасности ПРОРАО при их консервации и переводе в ПЗРО, сооружения и закрытии ПЗРО, описанные в статье, имеют высокие уровни зрелости TRL 7–9. Трансфер этих технологий в атомную отрасль для

использования на объектах ядерного наследия будет способствовать улучшению гидрогеологических условий и повышению уровня радиационной безопасности на площадках эксплуатирующих организаций, таких как АО «СХК», ПАО «НЗХК», АО «ЧМЗ», ФГУП «ГХК», ФГУП «ПО «МАЯК» и других.

## Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Gates W. P., Bouazza A., Churchman G. J. Bentonite Clay Keeps Pollutants at Bay // Elements. 2009. Vol. 5. № 2. Pp. 105–110. DOI: 10.2113/gselements.5.2.105
5. Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.27, IAEA, Vienna, 2020. 89 p.
6. Morandini T. L. C., Leite A. Characterization and Hydraulic Conductivity of Tropical Soils and Bentonite Mixtures for CCL Purposes // Engineering Geology. 2015. Vol. 196. Pp. 251–267. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.07.011.
7. Горьков В. А., Коркишко А. Н., Набоков А. В., Крижановская Т. В., Огороднова Ю. В. Стабилизация грунтов методом «холодного ресайклинга» в условиях многолетнемерзлых грунтов для обустройства нефтегазовых месторождений // Фундаментальные исследования. 2017. № 7. С. 20–24.
8. Zanzinger H. Contribution to the Long-Term Shear Strength of a Needle Punched GCL // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2016. Vol. 2. № 8. Pp. 1–7. DOI: 10.1007/s40891-016-0049-3.
9. ИТС 17–2016. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Размещение отходов производства и потребления. Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1885 от 15.12.2016.
10. Орлова Н. А., Кропоткин М. П., Ильина О. А., Прасолов А. А., Крупская В. В. Геоэкологические риски вследствие размещения токсичных химических и радиоактивных отходов на участке «Коломенское» в г. Москва и возможности реабилитации территории // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 57–63. DOI: 10.31857/S0869780920010159.
11. How tubular drainage geocomposite was used in landfill final cover. Project Showcase by T. B. Maier, S. Fourmont. Geosynthetics. June 1st, 2013. P. 49–51.
12. Ликвидация ядерного наследия: 2008–2015 годы / Под общ. ред. А. А. Абрамова, О. В. Крюкова, И. И. Линге. М. : Энергопроаналитика, 2015. 182 с.
13. Инъекционный бентонитовый состав для гидроизоляции и укрепления природного грунта. Заявка на выдачу патента Российской Федерации на изобретение № 2020135492 от 28.10.2020.
14. ТУ 08.12.22-005-87299967-2020. Технические условия. Смесь минеральная бентонитовая инъекционная bentinject (бентинжект) для создания и восстановления инженерных барьеров безопасности пунктов хранения и захоронения радиоактивных отходов.
15. Способ получения глинистого элемента противодиффузионного экрана (траншейной глинистой завесы). Заявка на выдачу патента Российской Федерации на изобретение № 2021102776 от 05.02.2021.
16. Способ получения грунтоглинистой сваи. Заявка на выдачу патента Российской Федерации на изобретение № 2020142959 от 24.12.2020.
17. Ильина О. А., Лундин Д. С., Проскурин Д. В., Семенкова А. С., Лехов В. А., Романчук А. Ю. Исследование противодиффузионных и противомиграционных свойств материалов на основе бентонита для повышения безопасности объектов ядерного наследия // Глины и глинистые минералы: VI Российская Школа по глинистым минералам Argilla Studium—2019 и IV Российское Совещание по глинам и глинистым минералам ГЛИНЫ—2019: Материалы докладов. М. : ИГЕМ РАН, 2019. С. 260–262.
18. СП 341.1325800.2017. Подземные инженерные коммуникации. Прокладка горизонтальным направлением бурением.
19. Павлов Д. И., Ильина О. А. О системном подходе к выбору барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 // Радиоактивные отходы. 2020. № 3(12). С. 54–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.
20. Техническое задание на поставку барьерного материала на основе индивидуального композиционного состава (смеси каолинита, бентонита и вермикулита) для

выполнения работ по Государственному контракту № Д.4Ш.21.22.13.1072 по теме «Вывод из эксплуатации промышленного уран графитового реактора ЭИ-2 и площадки 2 реакторного завода ОАО «СХК». АО «ОДЦ УГР». 2013 // Единая информационная система в сфере закупок. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31300396292> (дата обращения 05.02.2021).

21. Мартынов К. В., Жаркова В. О., Захарова Е. В. Компрессионные и фильтрационные свойства барьерных материалов // Глины и глинистые

минералы: VI Российская Школа по глинистым минералам Argilla Studium — 2019 и IV Российское Собрание по глинам и глинистым минералам ГЛИНЫ — 2019: Материалы докладов. М.: ИГЕМ РАН, 2019. С. 265—268.

22. Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А., Доржиева О. В., Белоусов П. Е., Тюпина Е. А. Изоляционные свойства бентонитовых барьерных систем для захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 35—55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.

---

### Информация об авторах

Ильина Ольга Александровна, директор по науке, ООО «Компания Бентонит» (125009, Москва, ул. Тверская, д. 12, стр. 1, офис 24), e-mail: [ilina@bentonit.ru](mailto:ilina@bentonit.ru).

Лундин Дмитрий Сергеевич, заместитель коммерческого директора по сервису, ООО «БентИзол» (641321, Курганская обл., Кетовский р-н, пос. Введенское, ул. Промышленная, д. 14), e-mail: [lundin@bentizol.ru](mailto:lundin@bentizol.ru).

Проскурин Денис Владимирович, руководитель сервисной службы по буровым растворам, ООО «Бентонит Хакасии» (655162, Республика Хакасия, Черногорск, ул. Максима Горького, д. 11 А), e-mail: [proskurin@b-kh.ru](mailto:proskurin@b-kh.ru).

Ведерникова Марина Владимировна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: [vmv@ibrae.ac.ru](mailto:vmv@ibrae.ac.ru).

Бирюков Дмитрий Викторович, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: [biryukov@ibrae.ac.ru](mailto:biryukov@ibrae.ac.ru).

### Библиографическое описание статьи

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.

---

## MATERIALS AND TECHNOLOGIES PROVIDING RADICAL IMPROVEMENT OF RW STORAGE FACILITY WATERPROOFING CAPACITIES

Ilyina O. A.<sup>1</sup>, Lundin D. S.<sup>2</sup>, Proskurin D. V.<sup>3</sup>, Vedernikova M. V.<sup>4</sup>, Biryukov D. V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Bentonite Company Ltd, Moscow, Russia

<sup>2</sup>BentIzol Ltd, Kurgan region, Russia

<sup>3</sup>Bentonite of Khakassia Ltd, Republic of Khakassia, Chernogorsk, Russia

<sup>4</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on February 15, 2021

*The article explores the application of modern clay mineral-based materials and technologies for the development and restoration of engineered safety barriers at the facilities holding non-retrievable radioactive waste during their upgrading to a long-term safe storage configuration (term referred to as conservation in Russian literature) and*

to disposal facilities. It presents the fields of application, available experience of such applications and the main characteristics allowing to expand the practice of their application at nuclear facilities.

**Keywords:** radioactive waste, bentonite, BentInject, Geosynthetic Clay Liner (GCL), compacted clay liner (CCL), anti-seepage and anti-migration screens, jet-grouting, "buried wall", injection, engineered safety barriers, disposal facilities for radioactive waste, radioactive waste disposal safety, conservation of disposal facilities for non-retrievable radioactive waste, engineering safety barriers.

## References

1. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. Primenenie prirodnykh glinistyykh 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]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 30–43.
2. Linge I. I., Ivanov A. Yu., Kazakov K. S. O sistemnykh merakh po rasshireniyu primeneniya glinyanykh materialov na ob"ektakh atomnoi otrasli [On Comprehensive Approach to Use Clay Materials as Nuclear Facilities Safety Barriers]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 33–41.
3. Il'ina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E., Kalmykov S. N. Sovremennoe sostoyanie v razrabotkakh i ispol'zovanii glinistyykh materialov v kachestve inzhenernykh bar'erov bezopasnosti na ob"ektakh konservatsii i zakhoroneniya RAO v Rossii [State-Of-Art in the Development and Use of Clay Materials as Engineered Safety Barriers at Radioactive Waste Conservation and Disposal Facilities in Russia]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 71–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
4. Gates W. P., Bouazza A., Churchman G. J. Bentonite Clay Keeps Pollutants at Bay. *Elements*, 2009, vol. 5, no. 2, pp. 105–110. DOI: 10.2113/gselements.5.2.105.
5. Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.27, IAEA, Vienna, 2020. 89 p.
6. Morandini T. L. C., Leite A. Characterization and Hydraulic Conductivity of Tropical Soils and Bentonite Mixtures for CCL Purposes. *Engineering Geology*, 2015, vol. 196, pp. 251–267. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.07.011.
7. Gor'kov V. A., Korkishko A. N., Nabokov A. V., Krizhanivskaya T. V., Ogorodnova Yu. V. Stabilizatsiya gruntov metodom "kholodnogo resaiklinga" v usloviyakh mnogoletnemerzlykh gruntov dlya obustroystva neftegazovykh mestorozhdenii [Stabilization of Soils by the Method of "Cold Rescycling" in Conditions of Permafrost Soils for the Infrastructure Development of Oil-And-Gas Field]. *Fundamental'nye issledovaniya — Fundamental Research*, 2017, no. 7, pp. 20–24.
8. Zanzinger H. Contribution to the Long-Term Shear Strength of a Needle Punched GCL. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2016, vol. 2, no. 8, pp. 1–7. DOI: 10.1007/s40891-016-0049-3.
9. ITS 17—2016. Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Razmeshchenie otkhodov proizvodstva i potrebleniya [Disposal of production and consumption waste]. Approved by the order of the Federal Agency on Technical Regulating and Metrology of December 15, 2016 no. 1885.
10. Orlova N. A., Kropotkin M. P., Il'ina O. A., Prasolov A. A., Krupskaya V. V. Geoekologicheskie riski vsledstvie razmeshcheniya toksichnykh khimicheskikh i radioaktivnykh otkhodov na uchastke "Kolomenskoe" v g. Moskva i vozmozhnosti reabilitatsii territorii [Geocological Risks Arising from the Disposal of Toxic Chemical and Radioactive Waste in Kolomenskoe (Moscow) and the Options of Territory Rehabilitation]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya — Environmental Geoscience*, 2020, no. 1, pp. 57–63. DOI: 10.31857/S0869780920010159.
11. How tubular drainage geocomposite was used in landfill final cover. Project Showcase by T. B. Maier, S. Fourmont. *Geosynthetics*, 2013, no. 6, pp. 49–51.
12. *Likvidatsiya yadernogo naslediya: 2008—2015 gody* [Nuclear legacy cleanup: 2008—2015]. Under general ed. of A. A. Abramov, O. V. Kryukov, I. I. Linge. Moscow, Energopromanalitika Publ., 2015. 182 p.
13. In"eksionnyi bentonitovyi sostav dlya gidroizolyatsii i ukrepleniya prirodnogo grunta [Injectable bentonite composition providing waterproofing and strengthening of natural soil]. Zayavka na vydachu patenta Rossiiskoi Federatsii na izobretenie № 2020135492 ot 28.10.2020.
14. TU 08.12.22-005-87299967-2020. Tekhnicheskie usloviya. Smes' mineral'naya bentonitovaya in"eksionnaya bentinject (bentinzhekt) dlya sozdaniya i vosstanovleniya inzhenernykh bar'erov bezopasnosti punktov khraneniya i zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Mineral bentonite injection mixture bentinject for the construction and restoration of engineered safety barriers at storage and disposal facilities for radioactive waste].
15. Sposob polucheniya glinistogo ehlementa protivofil'tratsionnogo ehkrana (transheinoi glinistoi zavesy). [Method providing the fabrication of an anti-filtration screen clay element (trench clay curtain)] Zayavka na vydachu patenta rossiiskoi federatsii na izobretenie № 2021102776 ot 05.02.2021.

16. Sposob polucheniya gruntoglinistoi svai [Soil-clay pile fabrication method]. Zayavka na vydachu patenta rossiiskoi federatsii na izobrenenie № 2020142959, 24.12.2020.
17. Il'ina O. A., Lundin D. S., Proskurin D. V., Semenkova A. S., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu. Issledovanie protivofil'tratsionnykh i protivomigratsionnykh svoistv materialov na osnove bentonita dlya povysheniya bezopasnosti ob'ektov yadernogo naslediya [Study of impervious and anti-migration properties of bentonite-based materials to enhance the safety of nuclear legacy facilities] // *VI Rossiyskaya Shkola po glinistym mineralam Argilla Studium-2019 i IV Rossiyskoye Soveshchaniye po glinam i glinistym mineralam GLINY-2019* [Clays and Clay Minerals: VI Russian School of Clay Minerals Argilla Studium — 2019 and IV Russian Meeting on Clays and Clay Minerals CLAY — 2019. Proceedings]. Moscow, IGEM RAS Publ., 2019. Pp. 260—262.
18. SP 341.1325800.2017. Podzemnye inzhenernye kommunikatsii. Prokladka gorizontaln'ym napravlennym bureniem [Underground engineering communications. Lining of by a method of the horizontal directional drilling].
19. Pavlov D. I., Il'ina O. A. O sistemnom podkhode k vyboru bar'erov bezopasnosti dlya zakhroneniya RAO klassov 3 i 4 [On a System Approach to the Selection of Safety Barriers for the Disposal of Radioactive Waste Class 3 and 4]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 54—65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.
20. Tekhnicheskoe zadanie na postavku bar'ernogo materiala na osnove individual'nogo kompozitsionnogo sostava (smesi kaolinita, bentonita i vermikulita) dlya vypolneniya rabot po Gosudarstvennomu kontraktu №D.4SH.21.22.13.1072 po teme «Vyvod iz ehkspluatatsii promyshlennogo uran grafitovogo reaktora EHI-2 i ploshchadki 2 reaktornogo zavoda OAO «SKHK». AO «ODTS UGR». 2013. [8. Terms of reference for the supply of a barrier material based on an individual composite composition (kaolinite, bentonite and vermiculite mixture) to be applied under the operations envisaged by the State Contract] Unified Information System in Procurement. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31300396292>.
21. Martynov K. V., Zharkova V. O., Zakharova E. V. Kompessionnye i fil'tratsionnye svoistva bar'ernykh materialov [Compression and filtration properties of barrier materials]. *VI Rossiyskaya Shkola po glinistym mineralam Argilla Studium-2019 i IV Rossiyskoye Soveshchaniye po glinam i glinistym mineralam GLINY-2019* [Clays and Clay Minerals: VI Russian School of Clay Minerals Argilla Studium — 2019 and IV Russian Meeting on Clays and Clay Minerals CLAY — 2019. Proceedings]. Moscow, IGEM RAS Publ., 2019. Pp. 265—268.
22. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A., Dorzhieva O. V., Belousov P. E., Tyupina E. A. Izo-lyatsionnye 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]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 35—55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.

---

### Information about the authors

*Ilyina Olga Alexandrovna*, Director of Science, Bentonite Company Ltd (office 24, 12/1 Tverskaya st., Moscow, 125009, Russia), e-mail: [ilina@bentonit.ru](mailto:ilina@bentonit.ru).

*Lundin Dmitry Sergeevich*, Deputy commercial director for service, BentIzol Ltd (14, Promyshlennaya st., Vvedenskoye set., Ketovsky district, Kurgan region, 641321, Russia), e-mail: [lundin@bentizol.ru](mailto:lundin@bentizol.ru).

*Proskurin Denis Vladimirovich*, Head of the service of drilling fluids, Bentonite of Khakassia Ltd (11A, Maxim Gorky st., Chernogorsk, Republic of Khakassia, 655162, Russia), e-mail: [proskurin@b-kh.ru](mailto:proskurin@b-kh.ru).

*Vedernikova Marina Vladimirovna*, PhD, researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: [vmv@ibrae.ac.ru](mailto:vmv@ibrae.ac.ru).

*Biryukov Dmitry Viktorovich*, Junior researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: [biryukov@ibrae.ac.ru](mailto:biryukov@ibrae.ac.ru).

### Bibliographic description

Ilyina O. A., Lundin D. S., Proskurin D. V., Vedernikova M. V., Biryukov D. V. Materials and technologies providing radical improvement of RW storage facility waterproofing capacities. *Radioactive Waste*, 2021, no. 1 (14), pp. 51—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-51-62. (In Russian).