

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ГЛИНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ СОЗДАНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

С. Г. Марьинских^{1,2}, В. В. Жигарев¹, О. А. Ильина³, В. В. Крупская^{4,5}

¹ООО «Компания Бентонит», Москва

²ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Тюменская область

³ООО «Бентонит Хакасии», Черногорск, Республика Хакасия

⁴Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

⁵Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 19 июля 2021 г.

Проведение масштабных работ по реализации мероприятий в рамках создания Единой государственной системы обращения с РАО, в том числе в части сооружения ППЗРО 3 и 4 класса, а также обеспечения долгосрочной безопасности объектов ядерного наследия, требует научной разработки системы защитных инженерных барьеров, предотвращающих поступление радионуклидов в окружающую среду. Уже в ближайшем будущем потребуются сооружение барьерных систем для не менее 70 пунктов хранения особых РАО. Оценка характеристик барьерных материалов, входящих в систему инженерных барьеров безопасности (ИББ), в том числе способность равномерно заполнять полости внутри конструкций, является важным технологическим параметром, который необходимо оценивать как в рамках производственного контроля материалов, так и для соблюдения качества создаваемых ИББ, в том числе в полевых условиях.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, барьерный глинистый материал, вывод из эксплуатации, консервация ЯРОО, ПУГР, ПРОРАО, текучесть, сыпучесть, объемная подвижность, глинопорошок, бентонит, угол естественного откоса, инженерный барьер безопасности.

Введение

В настоящее время широко распространен способ создания ИББ методом засыпки шахт реакторов и вне реакторных помещений при выводе из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР), межконтейнерных пространств пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) барьерными материалами [1] на основе глинопорошков разного состава и характеристик.

Важными технологическими факторами, при проведении работ по засыпке барьерных материалов, являются: низкий уровень пыления при растарке и засыпке и отсутствие сегрегации по гранулометрическому составу. Способность материала во время засыпки равномерно распределяться и заполнять внутреннее пространство полостей без образования пустот является одной из ключевых характеристик барьерных

материалов при изоляции РАО. Эту характеристику можно назвать объемной подвижностью глинопорошка.

В последние годы в технических требованиях к барьерным материалам и смесям стали применять показатель «функция текучести» с целью описания способности материала к бесполостному заполнению внутренних пространств различной геометрии и объема [2]. «Функцию текучести» определяют по результатам испытаний на одноосное неограниченное сжатие, при котором измеряется сопротивление свободно стоящего столбика порошка.

Надо отметить, что в российской нормативно-технической и методической документации, руководствах по эксплуатации средств измерения, включенных в Государственный реестр средств измерения (Госреестр СИ), показатель «функция текучести» не упоминается. На данный момент по этому показателю отсутствуют методики измерения, нет возможности провести поверку приборов, замеряющих «функцию текучести», в региональном отделении Государственного центра стандартизации, метрологии и испытаний (ЦСМ) или ином аккредитованном в установленном порядке юридическом лице, отсутствуют в продаже государственные стандартные образцы (ГСО).

Целью настоящей статьи является обзор применяемых способов определения объемной подвижности глинопорошков, а также оценка степени влияния на этот параметр минерального и фракционного составов и влажности барьерных материалов.

Анализ существующих методов оценки подвижности порошков

Объемная подвижность глинопорошков зависит от плотности, размера и формы частиц, состояния их поверхности, влажности и других свойств. Например, повышение дисперсности приводит к уменьшению объемной подвижности вследствие роста общей поверхности контакта. Увеличение влажности также снижает подвижность глинопорошка. Ни один из методов определения не может полностью охарактеризовать все свойства подвижности порошковой массы, тем не менее изучение данного показателя является важным при планировании работ по созданию внутренних ИББ методом бесполостного заполнения пространства реакторов, приреакторных пространств, емкостей, зданий и сооружений при консервации пунктов размещения особых радиоактивных отходов (ПРОАО) и межконтейнерного

пространства хранилищ и пунктов захоронения РАО.

Поскольку основу барьерных материалов составляют глинопорошки, в первую очередь обратимся к определению показателя текучести грунтов по п. А.18 приложения А ГОСТ 25100 [3], в соответствии с которым под ним понимают показатель состояния (консистенции) глинистых грунтов, равный отношению разности между естественной влажностью и влажностью на границе раскатывания к числу пластичности. Данный показатель является расчетным, при этом пределы пластичности определяются с некоторой лабораторной погрешностью, что влечет за собой неправильное представление о нем [4].

Широкое использование порошков в различных отраслях производства привело к возникновению множества методов для характеризования их подвижности. На сегодняшний день на производствах используются 4 основных метода:

- контроль скорости вытекания [5];
- определение коэффициента сжимаемости и отношение Хауснера;
- метод сдвиговой ячейки;
- определение угла естественного откоса.

В зависимости от объекта испытания и отрасли промышленности встречается один из этих методов или их многочисленные разновидности.

Рассмотрим подробнее существующие способы определения объемной подвижности, области их применения и необходимое оборудование.

Скорость вытекания

Контроль скорости вытекания материала через отверстие наглядно демонстрирует подвижность порошков. Однако важно, чтобы поток прохождения был непрерывным.

Даже среди свободно текучих материалов встречаются образцы, вытекающие с пульсацией потока. Скорость потока может изменяться по мере того, как опустошается контейнер. При этом определение скорости вытекания через отверстие используется для легко текучих материалов, например металлических порошков и их смесей, с содержанием неметаллических компонентов. В таком случае определяют показатель текучести с помощью калиброванной воронки (прибор Холла) по ГОСТ 20899-98 (ИСО 4490-78) [6].

В отличие от металлических порошков, определение текучести которых регламентировано ГОСТ 20899, для порошков, изготовленных из других материалов, существует ряд факторов, существенно влияющих на результат измерения, в том числе:

- диаметр и форма отверстия;
- тип материала, из которого сделан контейнер (металл, стекло, пластмасса);
- диаметр и высота порошкового слоя.

В литературе приводится множество разнообразных методик определения скорости вытекания через отверстие. Например, для фармацевтических порошков их способность вытекать из отверстия с определенной скоростью называется «сыпучестью» и выражается числом секунд, за которое 50 г порошка вытекает через калиброванное отверстие конусной воронки диаметром 2,5 мм [7].

В целом методики можно классифицировать по трем основным признакам [8]:

- тип контейнера для порошка;
- размер и форма используемого отверстия;
- способ измерения скорости вытекания порошка.

Общей шкалы для определения подвижности в зависимости от скорости вытекания не существует, т. к. она в значительной степени зависит от используемого метода измерения.

Данная методика неприменима для материалов, обладающих когезией, т. е. для барьерных материалов на основе глинистых минералов.

Коэффициент сжимаемости и отношение Хауснера

Определение коэффициента сжимаемости и близко связанного с ним отношения Хауснера считается простым, быстрым и популярным методом получения характеристик подвижности порошков в фармацевтической отрасли. Коэффициент сжимаемости представляет собой косвенный показатель насыпной массы, размера и формы, площади поверхности, когезионной способности и содержания влаги в материале. Коэффициент сжимаемости и отношение Хауснера определяются путем измерения объемов порошка при свободной засыпке и при его уплотнении [8, 9].

Хотя существует несколько методик определения коэффициента сжимаемости и отношения Хауснера, основное испытание заключается в измерении объема порошка до усадки (V_0) и конечного объема порошка после усадки или уплотнения (V_k). Их рассчитывают по следующим формулам:

$$\text{Коэффициент сжимаемости} = 100 \times (V_0 - V_k) / V_0, \quad (1)$$

$$\text{Отношение Хауснера} = V_k / V_0. \quad (2)$$

Шкала сыпучести, определенная Карром и представленная в табл. 1 [8], определяет качественный показатель степень сыпучести в зависимости от значения отношения Хауснера.

Таблица 1. Степень сыпучести и отношение Хауснера

Степень сыпучести	Отношение Хауснера
Очень хорошая	1,00–1,11
Хорошая	1,12–1,18
Удовлетворительная	1,19–1,25
Посредственная	1,26–1,34
Неудовлетворительная	1,35–1,45
Плохая	1,46–1,59
Очень плохая	>1,6

На определение объемов порошка до и после усадки или плотности при свободной засыпке и усадке оказывают влияние:

- диаметр используемого цилиндра;
- количество ударов до достижения плотности после усадки;
- масса материала, используемого в испытании;
- вращение образца во время его уплотнения.

Метод сдвиговой ячейки

Чтобы поставить на фундаментальную основу изучение подвижности порошков и проектирование загрузочных воронок, для разных видов порошков были разработаны специальные приборы, использующие метод сдвига. При его применении свойство подвижности определяют как функцию нагрузки при уплотнении, времени и других условий внешней среды. Подробно механизм определения подвижности методом сдвиговой ячейки представлен в публикациях Д. Шульце [10, 11]. Одним из типов сдвиговой ячейки является цилиндрическая, которая в горизонтальном разрезе формирует плоскость смещения между нижним неподвижным основанием и верхней подвижной частью кольца. После уплотнения слоя порошка на сдвиговой ячейке определяют силу, необходимую для сдвига слоя порошка движением верхнего кольца. Недостатком, обусловленным конфигурацией ячейки, является то, что слой порошка смещается неоднородно, так как частицы материала на внешней части кольца сдвигаются больше, чем частицы внутренней области. Д. Шульце ввел классификацию подвижности порошков в зависимости от значения показателя «функции текучести» — ff . Показатель определяется как отношение напряжения, с которым производится первичное уплотнение образца в цилиндрической ячейке — σ_1 , Па, к напряжению при котором происходит разрушение образца — σ_c , Па:

$$ff = \sigma_1 / \sigma_c. \quad (3)$$

Чем больше показатель «функции текучести» ff , тем лучше течет материал (табл. 2).

Таблица 2. Классификация текучести порошков [10]

«Функция текучести»	Характеристика материала
$ff < 1$	Нетекучий
$1 < ff < 2$	Очень липкий
$2 < ff < 4$	Липкий
$4 < ff < 10$	Легко текучий
$10 < ff$	Свободно текучий

Существенное преимущество метода сдвиговой ячейки заключается в возможности в значительной степени контролировать процесс проведения испытаний. В то же время этот метод требует дорогостоящего оборудования, разработки и аттестации методик. В мировой практике метод широко востребован в фармацевтической индустрии, т. к. именно в этой области объемная подвижность порошка является одним из важнейших технологических параметров и определяется в связи с необходимостью расфасовки медицинских препаратов и лекарственных средств в саше, капсулы и пр.

Существуют работы [2, 12], в которых предлагается определять «функцию текучести» барьерных материалов методом сдвиговой ячейки, описанным Д. Шульце. В испытаниях применяют анализатор текучести порошков фирмы BROOKFIELD, предназначенный для описания процесса при перемещении в бункерах, хопперах, устройствах подачи, заполняющих машинах и в другом сходном оборудовании в фармацевтической промышленности. Однако для ИББ важна оценка поведения порошка при распределении в полостях различной конфигурации в момент засыпки, а не их способность высыпаться из бункера. Таким образом, «функция текучести» не может служить критерием для определения качества выбранных барьерных материалов для использования их для создания ИББ при изоляции РАО.

Угол естественного откоса

Угол естественного откоса используется для описания объемной подвижности потока твердых тел. Определяется как величина угла наклона поверхности свободно насыпанного грунта к горизонтальной плоскости. Он формируется за счет сил трения частиц, уравнивающих их гравитационную составляющую [13]. Чем меньше угол естественного откоса, тем больше объемная подвижность порошка [14].

Метод широко применяется в различных отраслях. Например, для грунтов известны

методики, описанные в РСН 51-84 [15] (для песков) и ГОСТ 27802 [16] (для глиноземов).

Измерение угла естественного откоса также применимо в фармацевтике. Метод приведен в ОФС.1.4.2.0016.15 «Степень сыпучести порошков» [17]. Однако, в данной фармакопейной статье углом естественного откоса называют угол, сформированный конусообразной пирамидкой материала, полученной в определенных условиях эксперимента, относительно горизонтальной поверхности. Т. е. «фармакопейный» угол естественного откоса равен 180° минус величина угла естественного откоса, детерминированного в грунтоведении. Далее будем называть угол естественного откоса, определенный в соответствии с фармакопейной статьей, «угол естественного конуса порошка».

В ОФС.1.4.2.0016.15 вводится шкала сыпучести порошков, выраженная в зависимости качественного показателя степень сыпучести от значения угла естественного конуса порошка (табл. 3). Степень сыпучести — это комплексная технологическая характеристика, определяемая дисперсностью и формой частиц, остаточной влажностью и гранулометрическим составом порошкообразной системы.

Таблица 3. Степень сыпучести порошков и угол естественного конуса порошка [17]

Степень сыпучести	Угол естественного конуса, градус
Очень хорошая	25–30
Хорошая	31–35
Удовлетворительная	36–45
Неудовлетворительная	46–55
Плохая	56–65
Очень плохая	более 66

Для определения угла естественного откоса не требуются наличие сложных технических устройств (приборов). Испытания может проводить специалист отдела технического контроля (ОТК) при приемо-сдаточных испытаниях барьерного материала или инженерно-технический работник (ИТР) на месте производства работ по созданию внутренних ИББ.

Таким образом, из рассмотренных способов определения объемной подвижности для барьерных смесей разумным представляется использование метода, характеризующего поведение порошка на плоскости при высыпании. В связи с этим был выбран метод угла естественного откоса как единственный, оценивающий распределение частиц по поверхности и применимый для глинопорошков.

Экспериментальная часть

По результатам обзора существующих методов определения объемной подвижности порошков было установлено, что для характеристики растекаемости барьерных материалов при создании внутренних инженерных барьеров и оценки возможности бесполостного заполнения внутренних пространств наиболее подходящим является нахождение угла естественного конуса. В работе были оценены углы естественного откоса для глинопорошков различной минеральной природы, рассматриваемых для применения в качестве барьерных материалов при консервации и захоронении РАО. Выбор для измерения показателя угла естественного конуса порошка был связан с использованным оборудованием и возможностью качественно оценить степень сыпучести по результатам определения.

Материалы и методы

Объектом исследования стали восемь образцов: вермикулитоподобный материал, бентонитовая и каолиновая глины, а также смеси на их основе с заданными характеристиками, представленными в табл. 4.

Таблица 4. Виды испытываемых материалов и их исходные характеристики

№ образца	Глина	Тип материала	Класс частиц, мм
1	Бентонит, месторождение 10-й Хутор	Глинопорошок	$\leq 0,16$
2		Гранулы	0,63–2,0
3		Крупка	0–1,0
4	Вермикулитоподобный материал*, Ковдорское месторождение	Глинопорошок	$\leq 0,16$
5	Каолин, месторождение Б. Мурта	Глинопорошок	$\leq 0,16$
6	Смесь каолина (67%), бентонита (29 %) и вермикулитоподобного материала (4 %)	Глинопорошок	$\leq 0,16$
7	Смесь каолина (70%) и бентонита (30 %)	Глинопорошок	$\leq 0,16$
8	Смесь каолина (30%) и бентонита (70 %)	Глинопорошок	$\leq 0,16$

* Данный материал не может быть назван «вермикулитом» согласно детальным минералогическим исследованиям, приведенным в [18].

Испытания проводились на базе аттестованной лаборатории ООО «Бентонит Хакасии» с применением средств измерения, внесенных в Госреестр СИ и проходящих регулярную поверку. Угол естественного конуса определялся двумя способами:

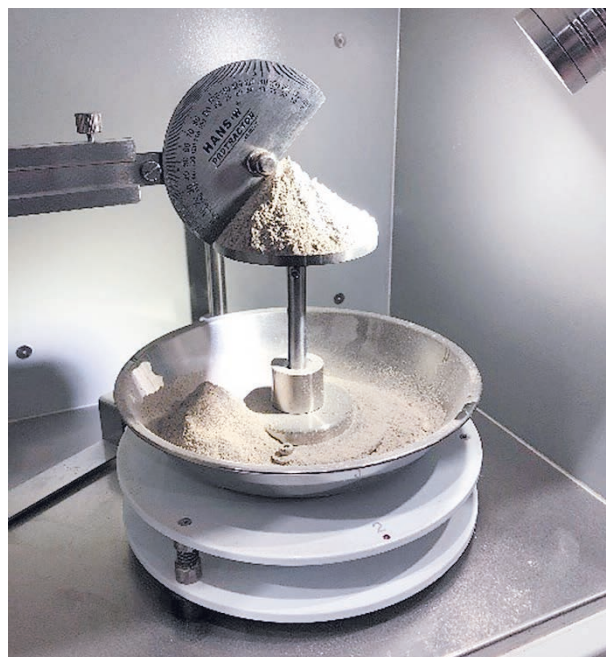


Рис. 1. Определение угла естественного конуса образца №6 на универсальном анализаторе порошков PowderPro M1

1) механизированным — по ГОСТ 27802, 2) с использованием универсального анализатора порошков PowderPro M1 (внесен в Госреестр СИ) (рис. 1). Пробоподготовка проводилась по ГОСТ 25389 [19]. Массовую долю влаги определяли в соответствии с ГОСТ 28177 [20]. При выполнении испытаний дополнительно оценивался гранулометрический состав каждого материала в соответствии с ГОСТ 28177.

Всего было приведено три серии экспериментов для определения зависимости угла естественного конуса от минерального состава, содержания влаги в материале, гранулометрического состава.

Результаты исследований и их обсуждение

В первом эксперименте были задействованы образцы 1, 4–8 (табл. 4) в виде глинопорошков одинакового гранулометрического состава. Влажность образцов была приведена к значению 4 ± 1 %.

Анализ полученных данных по углу естественного конуса глинопорошков исходных глинистых материалов (рис. 2) показывает, что его значения находятся в диапазоне 46,1–50,6 град. Если классифицировать по углу естественного конуса степень сыпучести согласно ОФС.1.4.2.0016.15 (табл. 3), то все испытанные глинопорошки демонстрируют неудовлетворительную степень сыпучести. Анализ этих значений для глинистых смесей также показывает неудовлетворительную степень сыпучести, однако они ниже, чем для исходных компонентов. Следует также отметить

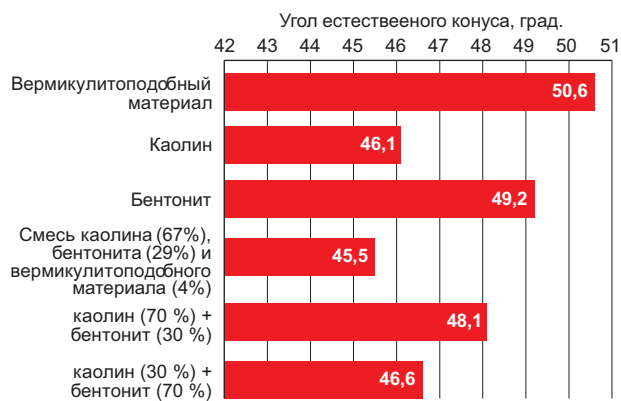


Рис. 2. Значения угла естественного конуса для образцов различного минерального состава

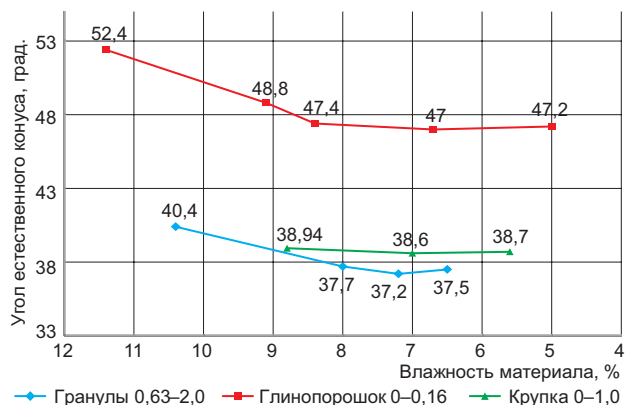


Рис. 3. Зависимость угла естественного конуса от влажности и крупности материала

отсутствие аддитивности угла естественного конуса для глинистых смесей.

Для оценки влияния влажности сыпучего материала были подготовлены образцы продукции 1–3 из бентонитовой глины (табл. 4) с содержанием массовой доли влаги 6–10% с шагом в 2%. Поскольку снижение влажности достигалось при помощи сушильного шкафа при температуре $(100 \pm 10)^\circ\text{C}$, шаг в 2% был условным, поэтому перед проведением испытаний для каждого образца проводился контроль показателей влажности.

Анализ полученных результатов (рис. 3) показал, что, вне зависимости от гранулометрического состава материала (глинопорошок, крупка, гранулы), влажность образцов оказывает значительное влияние на величину угла естественного конуса. При этом было установлено максимальное значение влажности, обеспечивающее минимальный угол естественного конуса. Последующее снижение содержания влаги не оказывало на него значимого влияния. Удовлетворительную степень сыпучести, согласно классификации в табл. 3, продемонстрировали

гранулы и крупка с влажностью менее 8%. Порошки с такой влажностью дали неудовлетворительную степень сыпучести, но значения были пограничными, т. е. для улучшения процесса распределения порошков требуется дополнительное воздействие — перемешивание или вибрация.

Для оценки влияния гранулометрического состава на показатели угла естественного конуса был взят образец 3 (крупка из бентонитовой глины с влажностью 6%, классом частиц 0–1 мм) и разделен на разные фракции. Из них было сформировано 10 испытательных образцов с различным соотношением частиц разного размера. Результаты экспериментов показали, что крупка обладает удовлетворительной степенью сыпучести при любых параметрах гранулометрического состава, а для достижения наименьших значений угла естественного конуса необходимо преобладание в составе материала фракций классом 1 мм и более (рис. 4). При этом существенное снижение значений угла естественного конуса наблюдается в случае, если гранул класса 1 мм будет не менее 25%. Равновесное количество классов в смеси не оказывает влияния на уменьшение его.

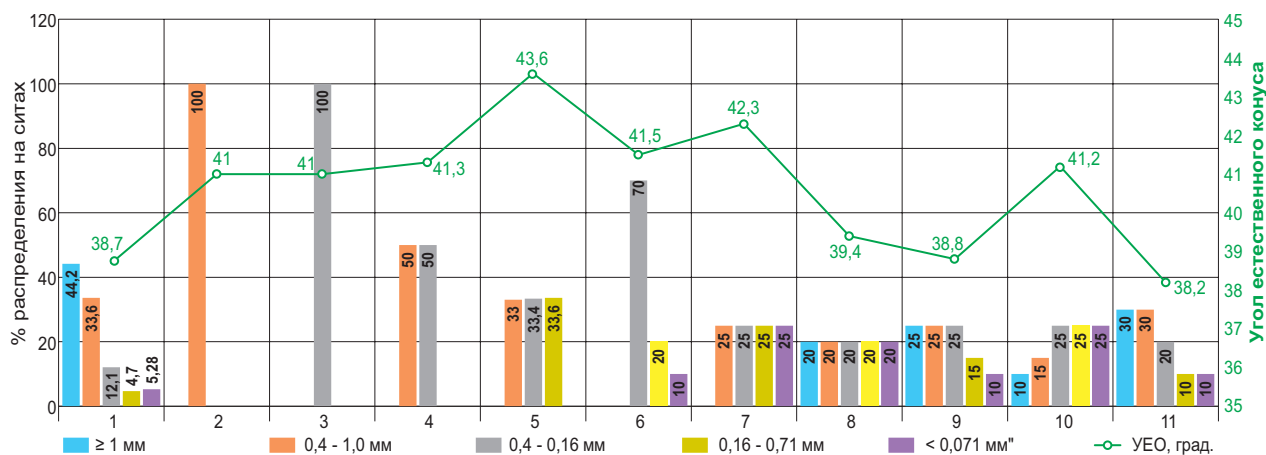


Рис. 4. Зависимость угла естественного конуса от гранулометрического состава

Также было показано, что чем больше в смеси частиц класса 0,4 мм, тем больше значения величины угла естественного конуса.

Заключение

Определение объемной подвижности сыпучих материалов, в том числе для создания внутренних ИББ для ПУГР, ПРОРАО и ПЗРО, востребовано в технологическом процессе их разработки и производства, а также при выполнении работ по созданию барьеров. Методики определения, а также влажность, грансостав, особенности поверхности и другие свойства материалов оказывают влияние на результаты.

Используемый в настоящее время в технических требованиях к барьерным материалам показатель «функция текучести» определяется методом сдвиговой ячейки и характеризует способность глинопорошка вытекать из силоса за счет силы тяжести. Измерение «функции текучести» затруднено отсутствием аккредитованных методик испытаний и приборов, включенных в Госреестр СИ.

Наиболее простым и эффективным способом оценки способности смеси распределяться по поверхности при засыпке является угол естественного откоса. Замеры данного показателя можно проводить при помощи доступных на рынке приборов отечественного и иностранного производства, внесенных в Госреестр СИ.

Чем больше угол естественного откоса для барьерного материала, тем меньше будет незаполненных пространств при создании внутренних инженерных барьеров ПУГР, ПРОРАО, ПЗРО и др. Значение этого показателя, требуемого для достижения необходимого качества заполнения пустот, подлежит обсуждению.

Полученные экспериментальные данные для угла естественного конуса применяемых в настоящее время порошков для создания инженерных барьеров на основе глины составляют 46,1–50,6 град., независимо от минерального состава. Такие значения характеризуют неудовлетворительные (угол естественного откоса составляет 129,4–138,4 град. соответственно) степени сыпучести и требуют дополнительного перемешивания и использования вибрационных технологий, согласно классификации ОФС.1.4.2.0016.15.

Для бентонитовых гранул (размер частиц 0,63–2,0 мм) и крупки (размер частиц 0–1 мм) значения величины угла естественного конуса лежат в интервале 37,2–40,4 град. (угол естественного откоса составляет 139,6–142,8 град.), что существенно ниже значений, получаемых для глинопорошков. Согласно классификации материалов по

степени сыпучести результат для гранул и крупки относится к категории удовлетворительной.

Однако нельзя утверждать, что указанная классификация степени сыпучести применима для объектов консервации и захоронения РАО. Каким бы высоким ни было значение величины угла естественного откоса (низким значение угла естественного конуса), при заполнении барьерным материалом самотеком неизбежно будут оставаться незаполненные полости по бокам от конуса. В настоящее время нашли широкое применение технологии более эффективного принудительного заполнения внутренних пространств ПУГР, ПРОРАО и ПЗРО: пневматическое заполнение и механическое рассеивание. Для данных способов заполнения значение объемной подвижности порошков не критично, т.к. бесполостное заполнение обеспечивается используемым оборудованием.

Определение показателя угла естественного откоса может быть рекомендовано для включения в объем приемо-сдаточного и входного контроля качества барьерных материалов, предназначенных для заполнения внутренних пространств ПУГР, ПРОРАО и ПЗРО самотеком, взамен показателя «функция текучести». Для барьерных материалов, засыпаемых с применением пневмотранспорта, шнеков, распылителей, виброуплотнителей, представляется достаточно нормировать только показатели гранулометрического состава и влажности.

Вопросы выбора показателей качества барьерных глинистых материалов, обеспечивающих выполнение ИББ своих изолирующих функций, стандартизация и аттестация методик их определения является частью комплексного подхода к научно-технологическому обеспечению работ по обоснованию выбора глинистых материалов для целей вывода из эксплуатации ЯРОО, консервации и захоронения РАО.

Благодарность

Работа частично выполнена в рамках темы Государственного задания ИГЕМ РАН (тема НИР 121041500220-0).

Литература

1. 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.
2. 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.

3. ГОСТ 25100. Грунты. Классификация.

4. *Здобин Д. Ю., Семенова Л. К.* Показатель текучести консистенция — основные физико-химические показатели состояния грунтов // Электронный журнал Теория и практика изысканий. 2018. URL: <https://www.geoinfo.ru/product/zdobin-dmitrij-yurevich/pokazatel-tekuchesti-i-konsistenciya-osnovnyye-fiziko-himicheskie-pokazateli-sostoyaniya-gruntov-37957.shtml> (дата обращения: 16.12.2020).

5. *Фролов Ю. Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. — М.: Химия, 1982. 400 с.

6. ГОСТ 20899-98 (ИСО 4490-78). Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла). — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 9 с.

7. *Гаврилов А. С.* Изготовление лекарственных препаратов: Учебник. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. 624 с.

8. Государственная фармакопея Республики Беларусь. Т. 2. Контроль качества вспомогательных веществ и лекарственного растительного сырья / УП Центр экспертиз и испытаний в здравоохранении; под общ. ред. А. А. Шерякова. — Молодечно: Типография «Победа», 2008. 472 с.

9. *Шимко О. М., Хишова О. М.* Влияние концентрации лактозы на технологические свойства травы лапчатки белой // Вестник фармации. 2010. № 3 (49). С. 85—91.

10. *Schulze D.* Flow properties of powders and bulk solids (fundamentals) // Powder Technol. 2010. No. 65. Pp. 321—333.

11. *Schulze D.* Fließt nicht gibt's nicht // Kunststoffe International. 2012. Vol. 102. No. 1S. Pp. 19—21.

12. *Захарова Е. В., Мартынов К. В.* Требования к барьерным глинистым материалам для захоронения и консервации радиационно-опасных объектов / В кн.: 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. 257—259.

13. *Трофимов В. Т., Королев В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р. С.* Под ред. Трофимова В. Т. Грунтоведение 6-е изд., переработ. и доп. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с.

14. *Каганер М. Г.* Тепловая изоляция в технике высоких температур. — М.: Машиностроение, 1966. 85 с.

15. РСН 51-84. Инженерные изыскания для строительства. Производство лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов. — М.: МосЦТИСИЗ, 1984. 38 с.

16. ГОСТ 27802-93 (ИСО 902-76). Глинозем. Метод определения угла естественного откоса. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1995. 6 с.

17. Государственная фармакопея Российской Федерации. XIV издание. В 4 т. Т. 2. — Москва, 2018.

18. *Семенкова А. С., Ильина О. А., Крупская В. В., Закусин С. В., Доржиева О. В., Покидько Б. В., Романчук А. Ю., Калмыков С. Н.* Сорбция радионуклидов на глинистых минералах — компонентах инженерных барьеров безопасности // Вестник Московского Университета. Серия 2. Химия. 2021. Том 62. № 5. С. 425—434.

19. ГОСТ 25389-93 (ИСО 802-76) с изм. № 1. Глинозем. Подготовка пробы к испытанию. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. 8 с.

20. ГОСТ 28177-89. Глины формовочные бентонитовые. Общие технические условия. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 22 с.

Информация об авторах

Марьинских Светлана Георгиевна, кандидат биологических наук, руководитель проекта «Бентонит в экологии», ООО «Компания Бентонит» (125009, Москва, ул. Тверская, д. 12, стр. 1, офис 24). Доцент кафедры общей и специальной химии, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (625000, Тюмень, ул. Володарского, д. 38), e-mail: marinskikh@bentonit.ru.

Жигарев Василий Валерьевич, директор по качеству, ООО «Компания Бентонит» (125009, Москва, ул. Тверская, д. 12, стр. 1, офис 24), e-mail: zhigarev@bentonit.ru.

Ильина Ольга Александровна, консультант, ООО «Бентонит Хакасии» (655162, Республика Хакасия, Черногорск, ул. Максима Горького, д. 11А), e-mail: ilina@b-kh.ru.

Крупская Виктория Валерьевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: krupskaya@ruclay.com. Старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35).

Библиографическое описание статьи

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.

ASSESSING THE MOBILITY OF CLAY MATERIALS USED IN THE CONSTRUCTION OF ENGINEERED SAFETY BARRIERS FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

Maryinskikh S. G.^{1,2}, Zhigarev V. V.¹, Ilyina O. A.³, Krupskaya V. V.^{4,5}

¹“Bentonite Company” Ltd, Moscow, Russia

²FSBEI of HE “Industrial University of Tyumen”, Tyumen, Russia

³“Bentonite of Khakassia” Ltd, Chernogorsk, Republic of Khakassia, Russia

⁴Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on July 19, 2021

Large-scale efforts implemented under the Unified State System for RW Management including the construction of near-surface disposal facilities for RW Class 3 and 4, as well as provision of long-term safety at nuclear legacy facilities require the scientific community to develop systems of engineered safety barriers preventing radionuclide releases into the environment. In the near future, at least 70 storage facilities for non-retrievable RW will require the installation of such barrier systems. The quality of barrier materials constituting to the system of engineered safety barriers (EBS), including their ability of providing a uniform backfilling of cavities inside the structures, is viewed as an important design parameter requiring proper assessment both under the production control of materials and quality control of designed EBS, including relevant in situ testing.

Keywords: radioactive waste, barrier clay material, decommissioning, conservation of NRHF, PUGR, CFNRW, fluidity, flowability, clay powder, bentonite, angle of repose, engineered safety barrier.

Acknowledgment

The study was partially performed under the IREM RAS's State Assignment (research topic 121041500220-0).

References

1. Ilyina O. A., Lundin D. S., Proskurin D. V., Vedernikova M. V., Biryukov D. V. Materialy i tekhnologii dlya radikal'nogo uluchsheniya gidroizoliruyushchikh kharakteristik khranilishch RAO [Materials and Technologies Providing Radical Improvement of RW Storage Facility Waterproofing Capacities]. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2021, no. 1 (14), pp. 51–62. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-51-62.
2. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. Use of Clay Materials in the Construction of Protective Barriers at Radiation Hazardous Facilities. *Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 39–53.
3. GOST 25100. *Grunty. Klassifikatsiya* [Soils. Classification].
4. Zdobin D. Yu. Semenova L. K. Pokazatel' tekuchesti konsistentsiya – osnovnyye fiziko-khimicheskiye pokazateli sostoyaniya gruntov [Indicator of fluidity consistency – the main physical and chemical indicators of the soils state]. *Elektronnyy zhurnal Teoriya i praktika izyskaniy – Electronic journal Theory and Practice of Research*, 2018. URL: <https://www.geoinfo.ru/product/zdobin-dmitrij-yurevich/pokazatel-tekuchesti-i-konsistenciya-osnovnye-fiziko-imicheskie-pokazateli-sostoyaniya-gruntov-37957.shtml> (accessed 16.12.2020).

5. Frolov Yu. G. *Kurs kolloidnoy khimii. Poverkhnostnyye yavleniya i dispersnyye sistemy. Uchebnik dlya vuzov* [Colloidal Chemistry Course. Surface Phenomena and Dispersed Systems. Textbook for universities]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 400 p.

6. GOST 20899-98 (ISO 4490-78). *Poroshki metallicheskiye. Opredeleniye tekuchesti s pomoshch'yu kalibrovannoy voronki (pribora Kholla)* [Metal powders. Fluidity measurements using a calibrated funnel (Hall device)]. Moscow, IPK Publishing house of standards Publ., 2001. 9 p.

7. Gavrilov A. S. *Izgotovleniye lekarstvennykh preparatov. Uchebnik* [Drugs Manufacturing. Textbook]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2010. 624 p.

8. *Gosudarstvennaya farmakopeya Respubliki Belarus'. T. 2. Kontrol' kachestva vspomogatel'nykh veshchestv i lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya / UP Tsentr ekspertiz i ispytaniy v zdravookhraneni* [State Pharmacopoeia of the Republic of Belarus. Volume 2. Quality control of excipients and medicinal plant materials / UE Center for Expertise and Testing in Health Care]. Under general ed. of A. A. Sheryakov. – Molodechno, Printing House Pobeda Publ., 2008. 472 p.

9. Shimko O. M., Khishova O. M. Vliyaniye kontsentratsii laktozy na tekhnologicheskiye svoystva travy

- lapchatki beloy [Influence of lactose concentration on the process properties of the Potentilla white herb]. *Vestnik farmatsii — Bulletin of Pharmacy*, 2010, no. 3 (49), pp. 85–91.
10. Schulze D. Flow properties of powders and bulk solids (fundamentals). *Powder Technol.*, 2010, no. 65, pp. 321–333.
11. Schulze D. Fliesst nicht gibt's nicht. *Kunststoffe International*, 2012, vol. 102, no. 1S, pp. 19–21.
12. Zakharova E. V., Martynov K. V. Trebovaniya k bar'yernym glinistym materialam dlya zakhroneniya i konservatsii radiatsionno-opasnykh ob'yektov [Requirements for Barrier Clay Materials Intended for the Disposal and Conservation of Radiation Hazardous 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. 257–259.
13. Trofimov V. T., Korolev V. A., Voznesensky E. A., Golodkovskaya G. A., Vasilchuk Yu. K., Ziangirov R. S. / Edited by Trofimov V. T. / *Gruntovedeniye [Soil science]* 6th ed., revised and enlarged — M.: Publishing house of Moscow State University, 2005. — 1024 p.
14. Kaganer M. G. *Teplovaya izolatsiya v tekhnike vysokikh temperatur [Thermal Insulation in High Temperature Engineering]*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1966. 85 p.
15. RSN 51-84. *Inzhenernyye izyskaniya dlya stroitel'stva. Proizvodstvo laboratornykh issledovaniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov [Engineering Surveys for Construction. Laboratory studies of physical and mechanical soil properties]*. Moscow, MosCTISIZ Publ., 1984. 38 p.
16. GOST 27802-93 (ISO 902-76). *Glinozem. Metod opredeleniya ugla yestestvennogo otkosa [Alumina. Measurement method for the angle of repose]*. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1995. 6 p.
17. *Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii [State Pharmacopoeia of the Russian Federation]*. In 4 volumes. XIV edition. Vol. 2. Moscow, 2018. Pp. 2188–2194.
18. Semenkov A. S., Ilyina O. A., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Dorzhieva O. V., Pokidko B. V., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. Sorbtsiya radionuklidov na glinistykh mineralakh — komponentakh inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti [Sorption of radionuclides on clay minerals — components of engineered safety barriers]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2. Khimiya — Moscow University Bulletin. Series 2. Chemistry*, 2021, vol. 62, no. 5, pp. 425–434.
19. GOST 25389-93 (ISO 802-76) as amended. No. 1. *Glinozem. Podgotovka probe k ispytaniyu [Alumina. Sample preparation for testing]*. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1998. 8 p.
20. GOST 28177-89. *Gliny formovochnyye bentonitovyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Bentonite molding clays. General technical specifications]*. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 2003. 22 p.

Information about the authors

Maryinskikh Svetlana Georgievna, Ph.D. in Biology, Head of the Bentonite in Ecology project, “Bentonite Company” Ltd (office 24, 12/1, Tverskaya st., Moscow, 125009, Russia), Associate Professor of the General and Special Chemistry Department, FSBEI of HE “Industrial University of Tyumen” (38, Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russia), e-mail: marinskikh@bentonit.ru.

Zhigarev Vasily Valerievich, Quality Director, “Bentonite Company” Ltd (office 24, 12/1, Tverskaya st., Moscow, 125009, Russia), e-mail: zhigarev@bentonit.ru.

Ilyina Olga Aleksandrovna, Consultant, “Bentonite of Khakassia” Ltd (11A, Maxim Gorky st., Chernogorsk, Republic of Khakassia, 655162, Russia), e-mail: ilina@b-kh.ru.

Krupskaya Victoria Valerievna, Ph.D. in Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: krupskaya@ruclay.com. Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia).

Bibliographic description

Maryinskikh S. G., Zhigarev V. V., Ilyina O. A., Krupskaya V. V. Assessing the mobility of clay materials used in the construction of engineered safety barriers for radioactive waste disposal. *Radioactive Waste*, 2021, no. 3 (16), pp. 51–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-51-60. (In Russian).