

УДК 69.035.4:622.349.5

**Д.Ю. Обливанцев, Е.П. Щербакова**

**ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕНТОНИТА  
В КАЧЕСТВЕ ЗАЩИТНОГО БАРЬЕРА ХРАНИЛИЩ  
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

---

**В**опросы создания хранилищ и могильников с высокой экологической надежностью, в свете ужесточившихся требований ядерной энергетики, являются весьма актуальными. В последние годы разрабатываются методы захоронения отработанного ядерного топлива или радиоактивных отходов (РАО) в приповерхностные или глубинные геологические формации с целью предотвращения неконтролируемого распространения радионуклидов в окружающую среду. Эта концепция основывается на многобарьерной системе, которая включает как инженерные, так и природные, геомеханические барьеры. Минакомиссия Европы призван определить региональные концептуальные схемы обращения с РАО, создание хранилищ и могильников, и до 2025 гг. должно быть обеспечено введение их в эксплуатацию [1-3]. Россия, с широким спектром геологических условий, обладает достаточной возможностью решать вопросы захоронения РАО в зависимости от степени радиоактивности по различным технологиям. Широкомасштабные исследования в области обеспечения безопасности захоронения РАО проводятся ведущими российскими и зарубежными учеными.

На сегодняшний день разрабатывается несколько концепций захоронения НАО и САО:

1. Концепция приповерхностного захоронения – вблизи дневной поверхности (выше или ниже ее) – на глубине до 30-50 м;

2. Концепция подземного захоронения:

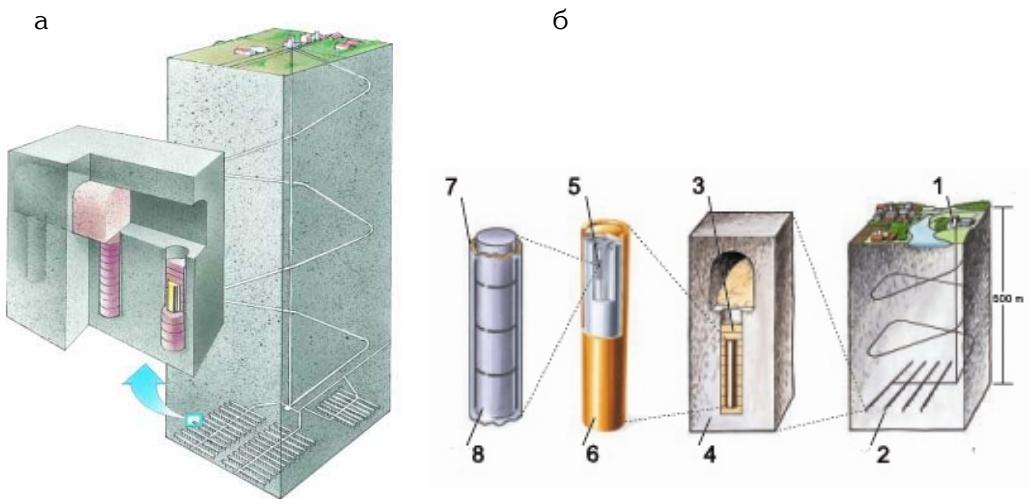
- захоронение на промежуточной (средней) глубине – 50-300 м;

- захоронение в стабильных геологических формациях – на глубине более 300 м.

Примером надежной конструкции для изоляции отходов любых типов и категорий (особенно высокой активности) является подземное сооружение, состоящее из шахтных стволов, транспортных, вентиляционных и других обслуживающих выработок, камер или скважин для размещения отходов.

Существуют технологии размещения отходов низкой и средней степени активности (НАО и САО) в специально создаваемых камерах (страны западной Европы), в траншеях, колодезях и хранилищах, оборудованных в поверхностных слоях. Все виды хранилищ нашли применение в тех или иных масштабах для хранения отходов различной степени радиоактивности.

Так, например, в Швеции разработана и принята технология глубокого



**Рис. 1. а. Схема глубокого захоронения РАО методом KBS;**

**б. Многобарьерная противофильтрационная защитная конструкция от «выпуска» радионуклидов в окружающую среду:** 1 – поверхность хранилища глубокого заложения; 2 – подземная часть хранилища; 3 – бентонит; 4 – вмещающая порода; 5 – ядерные отходы; 6 – медная оболочка со стальной капсулой внутри; 7, 8 – изолирующий цилиндр

захоронения РАО [4]. Отработанное ядерное топливо помещается во внутреннюю стальную, а затем медную наружную капсулы. Капсула помещается в бентонитовый блок, который опускается в буровую скважину первичных горных пород на глубину 500 м, после чего скважина заполняется бентонитом (так называемый KBS-3-метод захоронения) (рис. 1). Компания SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co) уже в течение многих лет проводит крупномасштабные испытания KBS-3 метода вблизи города Оскарсхамн, юг Швеции. Используемый в этих испытаниях Na- бентонит показал лучшие результаты при испытаниях по сравнению с другими видами бентонита, и закупается сегодня в США.

В России нашли опытное применение могильники скважинного типа НАО и САО в МосНПО «Радон» в Сергиево-Посадском районе Москов-

ской области. Пункт захоронения РАО представляет собой систему из девяти скважин, сооружаемых в плотных моренных суглинках методом бурения по квадратной сетке размерами  $7,2 \times 7,2$  м с применением глинистого бурового раствора плотностью  $1,2 \text{ т}/\text{м}^3$ .

Монтмориллонитовые глины (например, бентонит) удовлетворяют этим требованиям и во многих странах рассматриваются как основной материал для создания изолирующих притивомиграционных барьера. Многочисленные исследования бентонита указывают на его высокую сорбционную способность по отношению к катионам в широком диапазоне pH.

Исходя из актуальности проблемы, в Московском Геологоразведочном университете им. Орджоникидзе были проведены исследования по оптимизации состава бентонит–кварцевых смесей, используемых в качестве за-

щитных барьеров приповерхностных хранилищ низких и среднерадиоактивных отходов. В рамках исследований были установлены зависимости проницаемости бентонит-кварцевых смесей от содержания в них кварца, и обоснована возможность использования инженерных барьеров в качестве основных защитных сооружений, а также установлены рекомендуемые мощности для хранилищ РАО низкой и средней степеней активности.

Важно отметить, что конструктивные особенности инженерных контуров хранилищ и могильников РАО в идеале должны обеспечивать их герметичность и не допускать проникновения содержащихся в них веществ в окружающее пространство. Выбор места расположения хранилища связан со структурно-технологической оценкой участка земной коры, а именно сейсмичности района и тектонической нарушенности (разрывных нарушений и трещинноватости), гидрогеологией. На технологию строительства оказывают первоочередное влияние условия залегания горных пород в исследуемом районе. Необходимо учитывать следующие характеристики как отходов, так и окружающей среды: изотопный состав отходов, механизм миграции вещества, комплекс сорбционных свойств вмещающих пород ( $K_d$ ,  $K_p$ , фактор задержки и т.д.), водно-физические и реологические свойства пород ( $K_f$ , трещиноватость, пористость и т.п.), физико-химические и биохимические характеристики среды вмещающих пород и подземных вод (рН, Eh, бактериальный состав, давление, температура и т.п.), теплофизические свойства пород, воздействие радиоактивного излучения на физико-механические свойства пород и прочие параметры.

Применение новых видов гидроизоляционных и геосинтетических материалов делает захоронение НАО и САО в хранилищах поверхностного или приповерхностного типов более безопасным и надежным. Характерным примером может являться полигон радиоактивных отходов «Миронова гора» близ города Северодвинска Архангельской области. Площадь хранилища около 1000 м<sup>2</sup> заизолировано BENTOMAT ASL100 фирмы «СЕТСО».

Несмотря на ряд недостатков хранилищ неглубокого заложения, к основным из которых следует отнести сложность обеспечения внутренней безопасности и контроля за поведением РАО, трудности перехвата радионуклидов при их выходе за пределы хранилища и т. п., такие схемы захоронения имеют перспективы. Создание новых видов надежных искусственных инженерных барьеров может обеспечить безопасность сооружения на все время существования объекта.

Основными природными (геологическими) факторами, влияющими на выбор хранилища, являются способность геологической формации локализовать и изолировать РАО в установленных границах горного отвода на весь срок сохранения отходами потенциальной опасности. Это свойство геологической формации определяется проницаемостью слагающих формацию пород, их обводненностью, скоростью и характером движения подземных вод, изолированностью от поверхности неглубоко залегающих горизонтов подземных вод.

Данные проведенных исследований [5] показывают, что при захоронении НАО и САО инженерные барьеры из бентонито-кварцевых смесей, мощность и конструкция которых устанавливается расчетами, могут вы-

Таблица 1

Материа-лы	Подвержен-ность разруше-нию бактериями	Деформа-ционные свойства	Самозале-чивание	Сорбцион-ные свойст-ва	Долговеч-ность
Цемент	-	-	-	-	-
Битум	+	+	+	+	+
Глина	-	+	+	+	+

Обозначения: «+» – обладают свойством;  
«-» – не обладают указанным свойством.

полнять главную изолирующую роль в течение 300-500 лет.

Используемые для герметизации материалы или различные их комбинации должны выполнять следующие функции:

1) заполнение выработок во вмещающей породе;

2) снижение гидравлических и миграционных характеристик окружающей среды измененной в результате создания хранилища.

Выполнение каждой из этих функций является важным качеством инженерных барьеров. Герметизирующие материалы должны иметь следующие свойства:

1) низкую гидравлическую проводимость (фильтрационные свойства);

2) способность сорбировать нуклиды, то есть иметь достаточную сорбционную емкость;

3) достаточную жесткость и одновременно достаточную ползучесть;

4) способность набухать и быть пластичными, что способствует герметизации трещин;

5) обладать долговечностью, то есть сохранять свойства в течение предусмотренного времени под действием давления и геохимических условий во вмещающей окружающей среде.

На сегодняшний день наибольшее применение в качестве инженерных барьеров нашли следующие природные и искусственные материалы:

а) на основе глин;

б) на основе цемента;

в) прочие материалы (на основе битума, каменной соли и прочее).

Сравнительный анализ вышеперечисленных материалов представлен в табл. 1.

Принимая во внимание данные таблицы можем прийти к выводу, что наибольшим количеством необходимых свойств обладают глины.

Наибольшей набухаемостью и наименьшей гидравлической проводимостью обладают бентонитовые глины. Наличие монтмориллонита придает бентонитовой глине свойства, необходимые инженерному барьеру.

Для низко- и среднерадиоактивных отходов со сравнительно короткоживущими радионуклидами ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) наиболее перспективным и надежным природным защитным барьером могут служить глинистые породы. Они обладают низкой водопроницаемостью ( $K_{\phi} < 1 \cdot 10^{-10}$  м/с) и высокими сорбционными свойствами по отношению к большинству радионуклидов, что обуславливает их надежные изоляционные свойства. Поэтому идея создания техногенных защитных барьеров из глин достаточно широко и подробно исследовалась как зарубежными, так и отечественными учеными. Отмечено, что основным недостатком применения чистого бентонита является отвод тепла, что приводит к разогреву складируемого материала и нарушению целостности инженерных

Таблица 2  
**Химический состав глины**

<b>Соединения</b>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ППП
<b>Содержание, (%)</b>	54,81	16,12	6,26	0,14	0,93	2,20	1,56	0,07	0,69	0,38	16,82

барьеров [6]. Было установлено, что смесь бентонит-кварц имеет необходимую теплопроводность, но это ухудшает защитные свойства бентонита: низкую проницаемость и высокие ионообменные и абсорбционные емкости. С другой стороны, соответствующий гранулярный состав обеспечивает высокую плотность массы и довольно низкую проницаемость.

Для определения оптимального состава смеси, которую можно будет использовать при создании инженерного барьера для могильника низкоактивных отходов, автором были проведены лабораторные эксперименты по определению фильтрационных свойств получаемого материала.

Для исследования был взят сухой порошок бентонитовой глины «Зырянского» месторождения (Южное Зауралье, близ г. Курган). Свойства исследуемой глинистой породы приведены в табл. 2. и 3.

Таблица 3  
**Минеральный состав глины**

<b>Минерал</b>	<b>Содержание, (%)</b>
1. Монтмориллонит	80
2. Лимонит	2
3. Слюдя	10
4. Кварц	5,1
5. Кальцит	2-3

Лабораторные исследования состояли из двух этапов: подготовки образцов и фильтрации через них жидкости. Исследования проводились с использованием фильтрационной

установки конструкции В.М. Павловского.

Фильтрационные исследования производились по методике, разработанной с учетом реальных условий эксплуатации экрана.

Лабораторные исследования производились с целью оценки возможности использования бентонито-кварцевых смесей для создания инженерных барьеров и определения их параметров.

Испытания образцов чистого бентонита проводились для определения фильтрационных свойствах чистых бентонитов в зависимости от их плотности и градиента напора. Данные, полученные в результате исследования промышленного бентонита «Гранулированная глина Волклей MX-80 (Volclay MX-80) компании American Colloid Co», и российского бентонита «Компания Бентонит» (при градиенте напора I=70), хорошо коррелируют. Значения коэффициента фильтрации, полученные при испытаниях образцов бентонитовых глин Зырянского месторождения, хорошо корреспондируют со значениями коэффициента фильтрации глины Volclay MX-80. Данные компании НПК «Бентонит» об испытаниях глин месторождений «10 Хутор» и «Зырянское» также показывают коэффициент фильтрации бентонитов - менее  $5 \cdot 10^{-11}$  м/с ( $4,3 \cdot 10^{-6}$  м/дюйм). Глины традиционно считаются надежными противофильтрационным барьером. Однако процесс фильтрации в глинах отличается сложностью и часто трудно предсказуем. Тонко-

дисперсная пористая глинистая среда с огромной поверхностью частиц размерами до коллоидного состояния характеризуется наличием межмолекулярных сил и поверхностных процессов. Особую роль в формировании проницаемости глин свободной гравитационной водой принадлежит фильтрации по наиболее крупным порам, не полностью занятых связанной водой. Мелкие поры, занятые связанной водой, практического влияния на фильтрацию не оказывают. Необходимо отметить, что с увеличением минерализации фильтрующегося раствора проницаемость глин в общем случае увеличивается [7, 8].

Гораздо большее влияние на водупорные свойства глин оказывает температура раствора, которая изменяет вязкость воды [7]. Рост температуры увеличивает энергию теплового движения, снижает прочность связанной воды, вследствие чего она переходит в свободную.

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что при увеличении температуры от 20 °C до 40-50 °C проницаемость глин возрастает весьма медленно, основной рост проницаемости наблюдается с температуры более 50 °C. Максимальный рост не превышает одного-двух порядков, что позволяет судить о высокой степени надежности глинистых экранов. Опыт захоронения НАО и САО свидетельствует, что достижения столь высоких температур практически нереально.

**Рис. 2. Зависимость водопроницаемости бентонит-кварцевой смеси от величины гидравлического градиента:**  
1 - при среднем значении коэффициента фильтрации; 2 - при установившемся значении коэффициента фильтрации ( $B:K = 1:0,3$ ); 3 - при установившемся значении коэффициента фильтрации ( $B:K = 1:0,5$ )

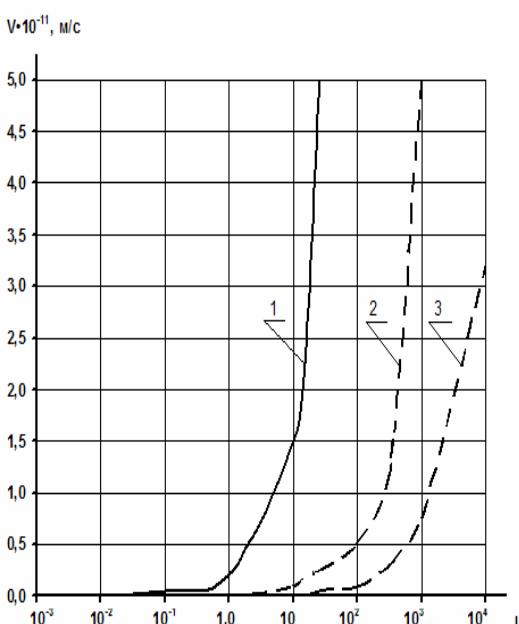
Добавление кварцевой составляющей в бентониты позволяют значительно повысить теплопроводность инженерного барьера, что позволит еще более увеличить его надежность.

Кроме того, многочисленные исследования показывают, что проницаемость бентонита значительно снижается при его уплотнении.

Смоделированные условия фильтрации через бентонит и бентонит-кварцевые смеси показывают, что максимальные скорости фильтрации соответствуют установившимся скоростям при  $I = 70$ .

Так, средняя установившаяся скорость фильтрации бентонит-кварцевой смеси 1:0,3 при  $I=70$  составляет  $7,4 \cdot 10^{-10}$  м/с, а средняя скорость при  $I=20$   $k=6,3 \cdot 10^{-10}$  м/с. Для смеси с отношением 1:0,5 эти значения соответственно составляют  $6,2 \cdot 10^{-10}$  м/с и  $5,1 \cdot 10^{-10}$  м/с.

Полученные значения и произведенные расчеты позволили определить скорости фильтрации воды через



бентонит-кварцевые смеси. На основании расчетов были получены зависимости водопроницаемости бентонит-кварцевых смесей от величины гидравлического градиента при установленных и средних значениях коэффициента фильтрации (рис. 2). Из графика видно, что максимальные скорости фильтрации даже при высоких градиентах составляют тысячные и сотые доли сантиметров.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- коэффициенты фильтрации бентонит-кварцевых смесей достигают минимальных величин и впоследствии стабилизируются, или имеют незначительные снижения.
- При снижении напора происходит резкое снижение значений коэффициента фильтрации, а при градиентах менее 20 коэффициент фильтрации стремится к нулю.
- Проницаемость бентонитовых глин и смесей на их основе не является постоянной величиной; она может изменяться в зависимости от гидроди-

намических, гидрохимических и термодинамических условий. Причем повышение температуры до 40...50°C незначительно влияет на водоупорные свойства бентонитовых глин и бентонит-кварцевых смесей.

• Добавление в бентонитовую глину кварца в весовых пропорциях до 1:0,5 благоприятно влияет на коэффициент фильтрации, по сравнению с чистой бентонитовой глиной, уплотненной до плотности бентонит-кварцевой смесей.

• Применение бентонит-кварцевой смеси соотношением 1:1 в роли противофильтрационного экрана может быть обосновано с экономической точки зрения в конструкциях, где применяется бентонит плотностью не выше 1100 кг/м<sup>3</sup>.

Учитывая значительные объемы накопленных радиоактивных отходов, жесткие требования и международные стандарты в вопросах экологии, применение бентонита в целях изоляции является перспективным и экономически оправданным направлением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сб. Экологическая безопасность России. М.: Юридическая литература, 1994 В.1.
2. Принципы, технические критерии и требования безопасности при захоронении радиоактивных отходов. – М.: Госатомнадзор России, 1996.
3. Концепция обращения с радиоактивными отходами в Российской Федерации. М.: Госатомнадзор России, 1996.
4. Final report of the TRUE Block Scale project. Tracer tests in the block scale Peter Andersson, Johan Byegerd Geosigma AB Anders Winberg. May 2002 Technical Report TR-02-14. SKB, Stockholm, Sweden.
5. Кедровский О.Л., Абдульманов И.Г., Авдеев О.К. Захоронение радиоактивных отходов. – М.: МГТРУ, 2002, 198 с.
6. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Исследование влияния физико-химических условий и температур на начальный градиент и режим фильтрации в глинах. – Водные ресурсы, 1981, №6, с. 110-119.
7. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. – М.: Недра, 1986.
8. Обливанцев Д.Ю. Оптимизация состава бентонит-кварцевых смесей, используемых в качестве защитных барьеров приповерхностных хранилищ низко- и среднерадиоактивных отходов. М. 2007. ГИАБ

## Коротко об авторах

*Обливанцев Д.Ю.* – аспирант Российского государственного геологоразведочного университета,  
*Шербакова Е.П.* – профессор кафедры ИЗОС, Московский государственный горный университет.

Рецензент доцент *И.Г. Берова*, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М.Губкина.