© В.М. Фридкин, С.А. Чесноков, О.В. Малькова, А.Э. Кокосадзе, И.Л. Писарев, 2007

УДК 502/504.002.68

В.М. Фридкин, С.А. Чесноков, О.В. Малькова, А.Э. Кокосадзе, И.Л. Писарев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В выступлении Президента Российской Федерации В.В. Путина 16 декабря 2004 г. отмечалось [1], что давно назревшей и неотложной задачей ядерной энергетики является внедрение современных технологий утилизации ядерных материалов, инфраструктура переработки которых развита пока недостаточно, а абсолютные темпы утилизации все еще крайне низки. Президент обратил внимание на возможность использования для решения этой задачи как собственных ресурсов, так и международного сотрудничества.

Реализация Экологических программ Российской Федерации, разрабатываемых в соответствии с Федеральным законом № 7-ФЗ от 10.01.2002 г. «Об охране окружающей среды» / глава IV, ст.14, 15 в частности, Экологической программы Минатома РФ, Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2010 года и дальнейшую перспективу, утверждённых Президентом РФ В.В. Путиным 4.12.2003 г. Пр-2196, и участие России в создании Международной системы коллективной экологической безопасности требуют как технологии утилизации радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива, снятия атомных станций с эксплуатации и принципов проектирования новых станций в условиях всё возрастающих экологических требований, так и повышенного внимания к распространению террористической угрозы [2].

На современном этапе развития науки и техники и в перспективе одним их наиболее реальных пути переработки и изоляции высокоактивных отходов (ВАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) является их захоронение в глубинных геоформациях [2], [3].

Для оценки возможности размещения в недрах Земли хранилищ ВАО и ОЯТ следует принять во внимание как мобилистическую концепцию тектогенеза, так и результаты новейших теоретических исследований по обоснованию особого перколяционного механизма гравитационной дифференциации связной области трещин в твердой литосфере, приводящего к проявлению сейсмоактивности региона в отдаленной перспективе практически в любой части Земного шара [6]. Это, возможно, заставит по-новому взглянуть на тенденции захоронения ВАО и ОЯТ в недрах Земли: основной акцент следует сделать именно на совершенствовании инженерных барьеров [3] как на обязательные элементы мультибарьерной систе-

мы изоляции долгоживущих радионуклидов. Под инженерными барьерами подразумеваются искусственные сооружения, создаваемые и изменяемые в процессе эксплуатации хранилищ человеком.

На современной стадии решения проблемы надежной изоляции ВАО и ОЯТ технически осуществимыми, экономически обоснованными и экологически и антитеррористически безопасными следует признать и практически рассматривать технологии, основанные на использовании глубинных геоформаций в сочетании с инженерными барьерами в течение о нескольких десятков тысяч до миллиона и более лет [4].

В настоящее время практически отсутствуют действующие подземные долговременные хранилища в глубинных геологических формациях.

При оценке эффективности естественных геоформаций и инженерных барьеров необходимо учитывать такие важнейшие аспекты, как гидрогеология, геохимия, физическая изоляция, антитеррористическая защищенность с учетом возможности применения новейших образцов оружия. Кроме того, в оценку обязательно должен быть включен учет поведения высокоактивных радионуклидов в биосфере, например, их разбавление и диспергирование в почве, в приповерхностных водоносных горизонтах и в поверхностных водах, в атмосфере, в пищевых цепочках [5].

Хранилища в глубинных геоформациях позволяют в максимальной степени использовать окружающую среду в роли радиационного экрана и одновременно приемника радиогенного тепла. С современных позиций к таким породам относят, в первую очередь, ненарушенные соляные отложения (Испания, Нидерланды, США, Франция) и массивы глинистых пород (Бельгия, Италия, Франция и Япония). Продолжаются исследования по использованию для хранилищ как скальных пород (Аргентина, Великобритания, Индия, Испания, Россия, Канада, США, Финляндия, Франция, Швейцария, Швеция и Япония), так и заброшенных горных выработок и шахт (Бельгия, Германия, Россия и США).

В любых глубинных геоформациях следует рассматривать и возможность использования уже отработанных горных выработок горнорудных предприятий или соляных пластов, которые по своим параметрам подходят для захоронения ВАО и ОЯТ. В этом случае достигается не только снижение стоимости хранилища за счет исключения основных дорогостоящих подземных работ, но и создается возможность использования существующей поверхностной инфраструктуры, а также всего шахтного и прочего оборудования, применяемого на подземных работах. Кроме того, для выбора мест непосредственного захоронения ВАО и ОЯТ и прогноза безопасности эксплуатации хранилища важнейшее значение имеет детальный анализ геодезических, геологических и гидрохимических данных существующего длительного мониторинга подземных выработок, проводимого при отработке месторождения. Естественно, что такая информация более достоверна, чем данные геологических изысканий, получаемые на базе результатов бурения скважин с поверхности.

На предварительном этапе уже пройденные выработки могут быть успешно использованы для создания научно-исследовательской лаборатории, обязательной для обоснования выбора наиболее подходящего места захоронения ВАО и ОЯТ. Однако во всех случаях сохраняется необходимость применения специальных инженерных барьеров по-

вышенной надежности для исключения как опасных последствий актов терроризма, так и маловероятных катаклизмов земной коры в зоне отработанных горных выработок. Следует учитывать также, что нередко крепи очистных выработок находятся на пределе исчерпания своей несущей способности.

Новейшие исследования по использованию глубинных геоформаций были доложены на представительном геологическом симпозиуме Сергеевские чтения 2005 «Инженерно-геоло-гические и геоэкологические проблемы утилизации отходов» и показали явную недостаточную надёжность в длительной перспективе практически всех геоформаций под воздействием температурных и прочих полей.

Миграция радионуклидов в потоке подземных вод, фильтрующихся в трещиновато-пористой среде кристаллических пород типа гранитов, включает в себя такие непростые процессы, как адвекция, матричная диффузия, дисперсия, сорбция, коллоидный перенос, радиоактивный распад, химико-биологические изменения флюидов и пород. Моделирование в пространстве и во времени комплексного влияния перечисленных процессов на безопасность функционирования хранилищ представляет сегодня еще окончательно не решенную задачу [4].

С учетом этих факторов «сухопородные» месторождения соли и глинистые массивы имеют неоспоримые преимущества перед массивами кристаллических скальных пород, например, гранитов или гранито-гнейсов. Любые горные породы теоретически содержат некоторое количество воды, но в солях и глинах ранее не обнаруживались явные, соединенные между собой и заполненные водой поры, способные образовать пути для переноса растворенных долгоживущих радионуклидов, что нельзя сказать о массивах кристаллических пород типа гранитов или гранито-гнейсов.

Мощные отложения каменной соли единодушно признавались подходящей геологической средой для длительного хранения РАО и ОЯТ. Нарушение сплошности соляного массива считалось возможным лишь вследствие непредсказуемых тектонических процессов в земной коре и затопления выработок хранилища.

Широкомасштабные зарубежные исследования за последние более чем 20 лет по геомеханическому поведению массива каменной соли и динамике ее проницаемости в окрестности ликвидируемых каверн показали, что при высоких давлениях нагнетания насыщенного рассола в закрепленную обсадной колонной скважину, пробуренную в массиве каменной соли, происходит медленное поглощение рассола соляным массивом по многочисленным микротрещинам в области подбашмачного пространства открытой части скважины, то есть своего рода пропитывание пласта соли рассолом [4]. Кроме того, выяснилось, что свойством структуры любой каменной соли является наличие исходных трещины с величиной раскрытия около 2-3 мк. При практически постоянном давлении нагнетания, не превышающем давления обычного гидроразрыва покрывающей толщи горных пород, в соляном массиве прогрессирует сеть микротрещин по границам кристаллов и зерен соли. Такая сеть представляет, по сути, совокупность множественных микроскопических гидроразрывов, сопровождающихся нарушением исходной структуры соли, увеличением ее объема (дилатансией), развитием гидравлической связи ранее замкнутых пор и нерастворимых включений. Как результат, локальная проницаемость со-

ляного массива лавинообразно возрастает в тысячи раз, при увеличении пористости всего на 0,2%. Этот фактор необходимо учитывать, в частности, при проектировании шахтных выработок в каменной соли для хранения РАО, где из-за достаточно вероятного развития проницаемости массива необходимо создание специальных инженерных барьеров повышенной надежности между солью и контейнерами с ВАО и ОЯТ.

Что касается массивов так называемых «синих глин», то исследования воздействия на глину низкоактивных отходов (НАО), проводящиеся уже в течение 50 лет, выявили наличие процессов расшатывания кристаллической решетки, дегидратации глинистых минералов с выделением в свободной форме конституционной и кристаллизационной воды, а также снижение у глин параметров их механических свойств.

Высокие температурные воздействия, неизбежные для захоронений ВАО, приводят к дополнительной деградации глин, сопровождающаяся изменением их минерального состава и развитием трещин усадки и усыхания. Кроме того, в результате низкоактивного облучения в глинах активизируются микробиологические процессы, приводящие к накоплению бактериальной массы, снижению длительной прочности и деформационной способности массива. Одновременно нарастает агрессивность среды по отношению к материалам контейнеров, происходит деградация отходов и провоцируется биохимическое газообразование [4].

Поэтому следует признать недостаточно обоснованным предлагавшееся ранее рассмотрение глинистых толщ как квазиоднородных нетрещиноватых массивов, обладающих необходимой долговременной устойчивостью к техногенным воздействиям и имеющих постоянно высокую сорб-ционную способность. Отечественные исследователи [4] пришли к однозначному выводу о необходимости при создании хранилищ РАО в синих нижнекембрийских глинах использовать многослойные инженерные барь-еры повышенной надежности, тем более, когда речь идет об окончательном захоронении ВАО и ОЯТ.

В процессе строительства подземного хранилища глубокого заложения неизбежно формирование путей миграций жидких включений – как в результате механических разрушений от ведения буровзрывных работ, а в меньшей степени при использовании тоннелепроходческих буровых машин [3, 6], так и в результате развития радиогенных тепловых полей.

В ряде стран, например, в Канаде, Швеции и Швейцарии развернуты широкомасштабные программы опытно-конструкторских работ по созданию НИЛ для сооружения подземных хранилищ ВАО и ОЯТ в глубинных геоформациях. Эти программы включают как исследования на наружной поверхности предполагаемой площадки, так и непосредственно на отметках расположения хранилища. В Канаде подземная исследовательская лаборатория Уайтшелл Пинава (провинция Манитоба) предполагает широчайшие исследования на двух подземных уровнях: отметках (-240 м) и (-420 м) при размещении промежуточных испытательных шахтных станций на горизонтах (-130 м) и (-300 м).

При проектировании всех типов подземных хранилищ необходимо тщательно учитывать возможные сценарии проникновения в них человека. Естественно, что выбор площадки подземного хранилища ОЯТ вдали от месторождений полезных ископаемых должен максимально уменьшить риск таких «посещений» в будущем.

Что касается физической изоляции, то обычно наибольший интерес представляют зависящие от геотектоники и климата процессы эрозии, которые воздействуют как на гидрогеологию, так и на геохимию системы.

Учитывая вышеизложенные аспекты современных знаний о поведении геоформаций и возможную уязвимость геомассивов от сложно прогнозируемых техногенных воздействий, представляется целесообразным усилить внимание к инженерным барьерам, создаваемым или совершенствуемым человеком – из конструкционных материалов, свойства которых уже хорошо известны или интенсивно изучаются для новых перспективных материалов с позиций тепло- и радиационной стойкости и долговечности.

Инженерные барьеры выполняют в подземном хранилище целый ряд функций, значение которых меняется в зависимости от типа ВАО и ОЯТ и концепций хранилища. Основное назначение матриц ВАО и ОЯТ заключается в удержании или в ограничении скорости выхода, а в ряде случаев и полном исключении миграции содержащихся в них долгоживущих радионуклидов на уровне, определяемом медленным разрушением матрицы. Для ВАО роль матрицы, как правило, выполняет сама двуокись урана, для ВАО, получаемых в процессе переработки ОЯТ, матрицей обычно служит боросиликатное стекло, хотя в дополнение к этому в сейчас интенсивно изучается ряд других форм кондиционирования отходов и использования в этих целях, например, керамики и материалов вида «синрок (synrock)» [2].

Природно-техническая система «геомассив – инженерный барьер» (или «мультибарьер») в обязательном порядке должна иметь необходимую и достаточную прочность и устойчивость для восприятия современных ударно-динамических воздействий, включая и нагрузки от потенциально возможных террористических угроз.

Непосредственное проектирование и последующее строительство инженерных сооружений для временного и окончательного захоронения ВАО и ОЯТ в России должно быть регламентировано в соответствии с требованиями Федерального закона «О техническом регулировании» от 27.12.2002 г. №184-ФЗ. Такой регламентации должна предшествовать разработка и принятие соответствующей концепции создания системы технического регулирования, опирающейся на национальные стандарты риска в специфической области ядерных технологий. Перед геомеханикой возникает по существу новая задача разработки и регламентации логико-информационных, математических и вычислительных моделей анализа «мультибарьеров» как в детерминистической, так и в стохастической постановках.

Поскольку полная система инженерных барьеров состоит из целого ряда компонентов, часть из которых выполняет одновременно несколько функций, необходимо и обязательно проводить оценку взаимодействия различных барьеров. Для хранения в глубинных геоформациях особую озабоченность вызывают поверхности раздела, в частности, между инженерными конструкциями и окружающей средой, а также выбор заполняющих и герметизирующих материалов, так как для окончательной изоляции хранилища от биосферы необходимо заполнить и герметизировать целый ряд различных проходов, включая подходные тоннели, шахтные ство-

лы и исследовательские буровые скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *В центре* внимания – атомная энергетика. Росэнергоатом. – 2005 №1 – С. 5
2. *Кедровский О.Л., Чесноков С.А., Фридкин В.М.* Инженерные барьеры повышенной надёжности для захоронения отработавшего ядерного топлива в недрах Земли // Обзорная информация. Экологическая экспертиза: ВИНИТИ – РАН 2005 г. №4 – с.70-96.
3. *Кедровский О.Л., Чесноков С.А., Фридкин В.М, Архипенко Ю.В. , Цернант А.А., Носарев А.В., Кузьменко И.М, Максименко Л.Б., Писарев И.Л., Кокосадзе А.Э.* Инжерно-экологические конструктивно-технологические проблемы создания инженерных барьеров при долговременном хранении и окончательном захоронении отработавшего ядерного топлива в недрах земли // Горный информационно-аналити-ческий бюллетень, М., 2005 №4. – С. 88-94.
4. *Кедровский О.Л., Чесноков С.А., Фридкин В.М, Малькова О.В.* Современные аспекты подземной изоляции высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Наука и технология в промышленности. Конгресс по безопасности. Спецвыпуск. 2005 г. №3 - с.52-61.
5. *Чесноков С.А., Носарев А.В., Фридкин В.М., Карманова О.В., Кокосадзе А.Э.* Новые возможности создания инженерных сооружений для обеспечения экологической и антитеррористической безопасности, промышленной утилизации некоторых видов технической продукции // Сборник докладов на тематических научно-практических конференциях на круглых столах Международного научно-технического конгресса «Безопасность – основа устойчивого развития регионов и мегаполисов», Россия, Москва, октябрь-ноябрь 2005 г., Россия, М., 2005, с.57-61.
6. *Кедровский О.Л., Чесноков С.А., Фридкин В.М., Кокосадзе А.Э.* // Подземное пространство мира. 2005 г. – с.3-8.
7. *Чесноков С.А., Фридкин В.М., Малькова О.В., Кокосадзе А.Э., Писарев И.Л.* Геомеханические аспекты конструирования хранилищ высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива в глубинных геоформациях с инженерными барьереми повышенной надёжности // Известия ТулГУ, серия «Геомеханика. Механика подземных сооружений», вып. 4, - Тула: издТулГУ, 2006 – 267 с. – С. 211-218.

ГИАБ

Коротко об авторах

Фридкин В.М. – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, МИИТ,
Чесноков С.А. – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, ЗАО «Институт «ОРГЭНЕРГОСТРОЙ»,
Малькова О.В. – МИИТ,
Кокосадзе А.Э. – ЗАО «Институт «ОРГЭНЕРГОСТРОЙ»,
Писарев И.Л. – Тоннельная Ассоциация России.

Статья представлена ЗАО «Институт «ОРГЭНЕРГОСТРОЙ».