

Осуществимость безопасного окончательного захоронения отработанного ядерного топлива

Б. Нильсон и Т. Папш

ПРЕДЫСТОРИЯ ВОПРОСА

На раннем этапе развития ядерной энергетики существовало общераспространенное мнение, что отработанное ядерное топливо следует перерабатывать с тем, чтобы оставшийся в этом топливе уран можно было использовать для выработки электроэнергии. Плутоний, выделенный из отработанного топлива, также рассматривался как представляющий ценность с точки зрения его использования в качестве топлива для реакторов-размножителей на быстрых нейтронах. Под влиянием ряда сопутствующих факторов появились более разнообразные точки зрения, и в настоящее время серьезно обсуждается другая концепция, согласно которой отработанное ядерное топливо следует считать отходами. Единодушного, разделяемого во всем мире мнения относительно того, какой из двух вариантов следует предпочесть: переработку и окончательное захоронение образующихся отходов или прямое захоронение отработанного топлива, не существует. Выбор подхода зависит от ответов на следующие вопросы:

- Какие опасности с военной и политической точек зрения, а также с точки зрения здоровья людей связаны с выделением чистого плутония ?
- Каковы потенциальные возможности технологии быстрых реакторов ?

Г-н Нильсон является руководителем проекта KBS; г-н Папш осуществляет руководство программой анализа безопасности в рамках этого проекта.

- Каковы ожидаемые изменения расходов по переработке и цен на природный уран?
- Насколько технически и экономически осуществимо безопасное окончательное хранение отработанного ядерного топлива?

В статье будет рассмотрен лишь последний из упомянутых вопросов.

СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ

Основные предварительные условия для осуществления окончательного хранения высокоактивных отходов переработки, с одной стороны, и отработанного топлива, с другой стороны, различны. Это различие обусловлено главным образом значительно более высоким содержанием в отработанном топливе долгоживущих тяжелых радиоизотопов, особенно нептуния-237, плутония-239 и плутония-240, америция-241 и америция-243, а также продуктов распада радия-226 и тория-229.

Рис. 1 и 2 иллюстрируют, как изменяется во времени "коэффициент опасности" для указанных отходов двух типов. Кривые приведены для топлива легководных реакторов с глубиной выгорания 33 000 тепловых мегаватт в сутки на тонну урана ($\text{МВт(т.)} \cdot \text{сут./т урана}$), плотностью энерговыделения $34,4 \text{ МВт(т.)} \cdot \text{сут./т урана}$ и обогащением 3,1% по урану-235. Кроме того, как видно из рис. 3, скорость тепловыделения падает в отработанном топливе более медленно, чем в отходах переработки.

Таким образом, очевидно, что безопасное захоронение отработанного топлива требует принятия мер в более крупных масштабах, чем захоронение высокоактивных отходов переработки.

КОНЦЕПЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ БАРЬЕРОВ

В апреле 1977 года шведский парламент принял закон, требующий, чтобы владельцы новых реакторов до того, как им будет разрешено загрузить в реактор топливо, предоставляли убедительные доказательства возможнос-

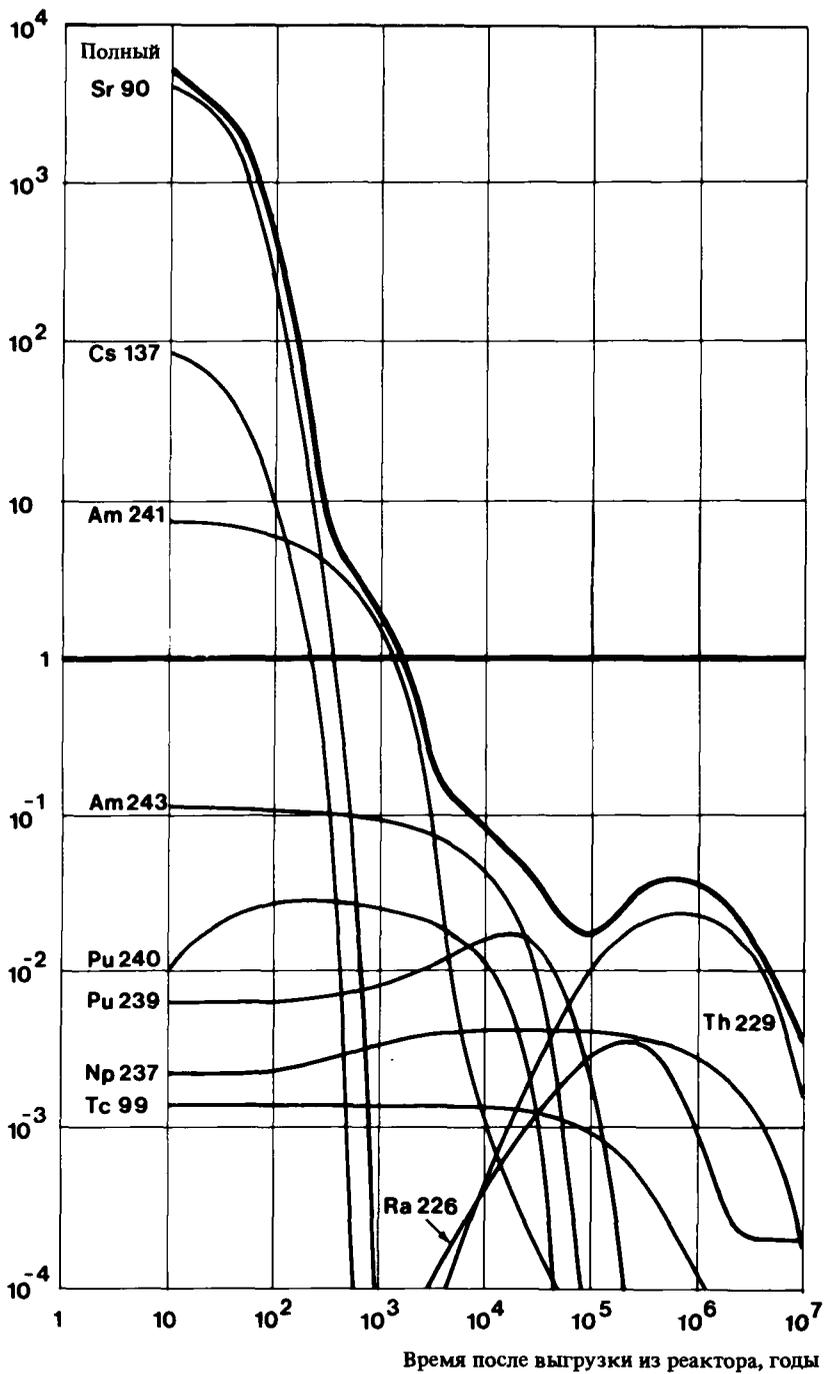


Рис. 1. Возможный коэффициент опасности для различных изотопов в высокоактивных отходах одной тонны отработанного топлива.

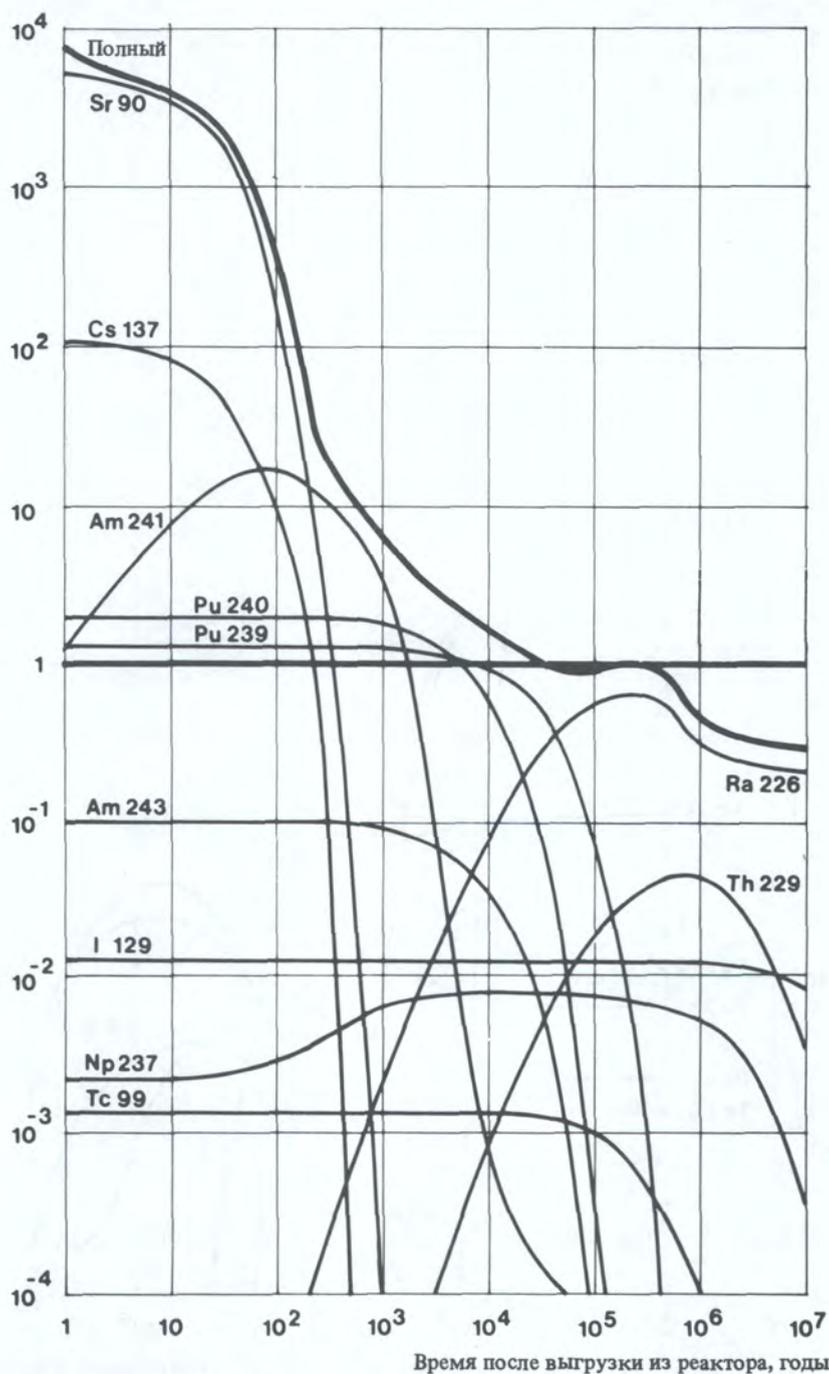


Рис. 2. Возможный коэффициент опасности для различных изотопов в одной тонне отработанного топлива.

Тепловыделение при радиоактивном распаде, Вт/г урана

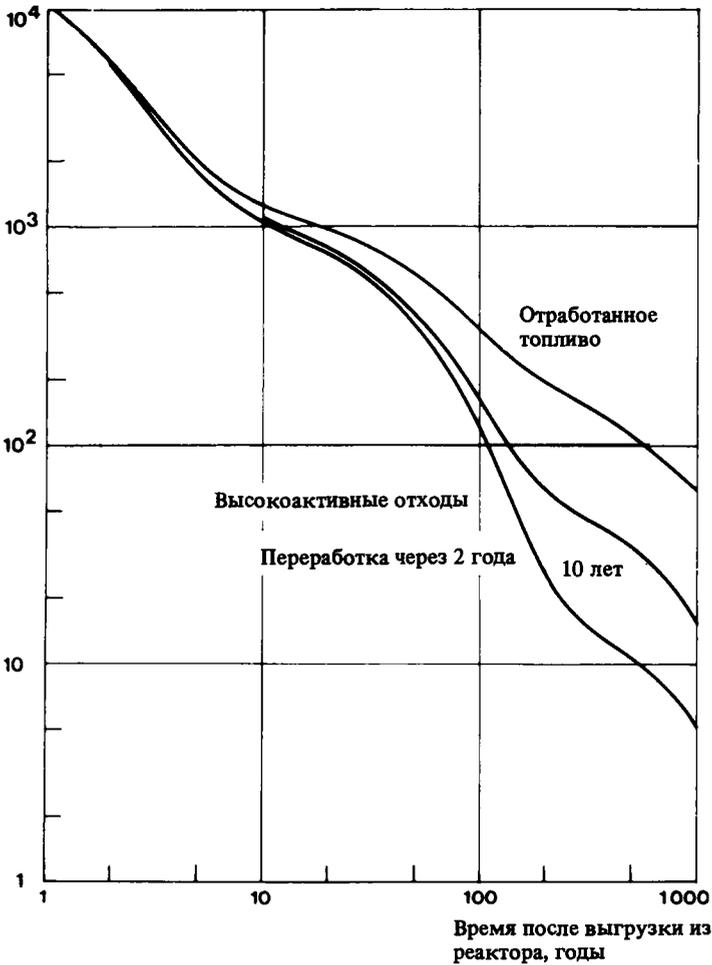


Рис. 3. Тепловыделение при радиоактивном распаде отработанного топлива и высокоактивных отходов реактора, охлаждаемого водой под давлением.

ти реализации абсолютно безопасных методов окончательного захоронения отработанного топлива или высокоактивных отходов переработки ядерного топлива. После принятия этого закона шведские атомные энергетические компании общего пользования организовали группу, названную "проект KBS", с целью изучения данного вопроса. В декабре 1977 года был опубликован

доклад о безопасном захоронении остеклованных высокоактивных отходов переработки отработанного топлива [1], а в сентябре 1978 года был издан второй доклад об окончательном захоронении отработанного не подвергнутого переработке топлива [2]. В основу докладов положено рассмотрение системы нескольких барьеров, как технических, так и естественных, которые предназначены для изоляции отходов и отработанного топлива от биосферы в достаточно высокой степени, обеспечивающей снижение воздействия на окружающую среду до приемлемых уровней. Эти барьеры имеют различные защитные свойства и функции, которые усиливают и дополняют друг друга.

Оценка безопасности была основана на анализе наиболее неблагоприятного случая последствий разрушения или нарушения функционирования различных барьеров.

Настоящее обсуждение преимущественно основывается на опыте, приобретенном в ходе подготовки упомянутых выше докладов. Поскольку на территории Швеции преобладают кристаллические горные породы, использование для захоронения отходов других типов пород не рассматривается. Следует иметь в виду, что доклады были подготовлены лишь с целью показать, что безопасное окончательное захоронение осуществимо в рамках ограничений современной технологии. Ни доклады, ни настоящая статья не претендуют на то, что представленная концепция является единственным или даже оптимальным решением с точки зрения технологии или экономики.

Общие требования

Для того чтобы ограничить последствия утечек радиоактивных веществ в биосферу, необходимо ограничить уровень концентраций, которые могут создаваться в различных природных сферах. Такое ограничение может быть достигнуто либо путем изоляции отходов в течение достаточно продолжительного времени с тем, чтобы их радиоактивность уменьшилась до приемлемых уровней, либо путем распределения выбросов во времени или в пространстве такой величины, при которой не будут соз-

даваться неприемлемые концентрации. В исследованиях, проведенных в рамках проекта KBS, используется комбинация указанных методов.

Как следует из рис. 2, цикл распада можно разделить на две фазы. В течение первой фазы, длящейся приблизительно первую тысячу лет, относительная опасность отходов весьма высока и определяется в основном теми продуктами деления, содержащимися в топливе, которые испускают бета- и гамма-излучение. Вторая фаза имеет с практической точки зрения почти бесконечную длительность, поскольку опасность в основном определяется весьма долгоживущими альфа-излучающими актинидами или продуктами их распада. Относительный уровень опасности в период второй фазы в 1000 раз ниже, чем в период первой фазы. После первого миллиона лет коэффициент опасности отработанного топлива определяется в основном радием-226, дочерним продуктом урана-238.

Следствием этого является, безусловно, то, что в период второй фазы абсолютную изоляцию гарантировать невозможно, в то время как в период первой фазы она вполне осуществима. Защита окружающей среды во втором периоде должна гарантироваться путем ограничения интенсивности утечек.

Барьеры, используемые для ограничения интенсивности утечек во второй фазе, должны быть такими, чтобы функционирование этих барьеров можно было прогнозировать на периоды, равные геологическим. Очевидно, подобные прогнозы в отношении искусственных барьеров невозможны, поскольку наш опыт изучения воздействия различных условий природной окружающей среды на материалы слишком невелик во временном плане и не позволяет экстраполировать их поведение в пределах периодов такой величины. Таким образом, естественные барьеры должны характеризоваться высокой степенью надежности и прогнозируемости во второй фазе.

Концепция проекта KBS

Описанная ниже система барьеров основана на концепции проекта KBS согласно которой отработанное топливо, содержащееся в медных контейнерах, закладыва-

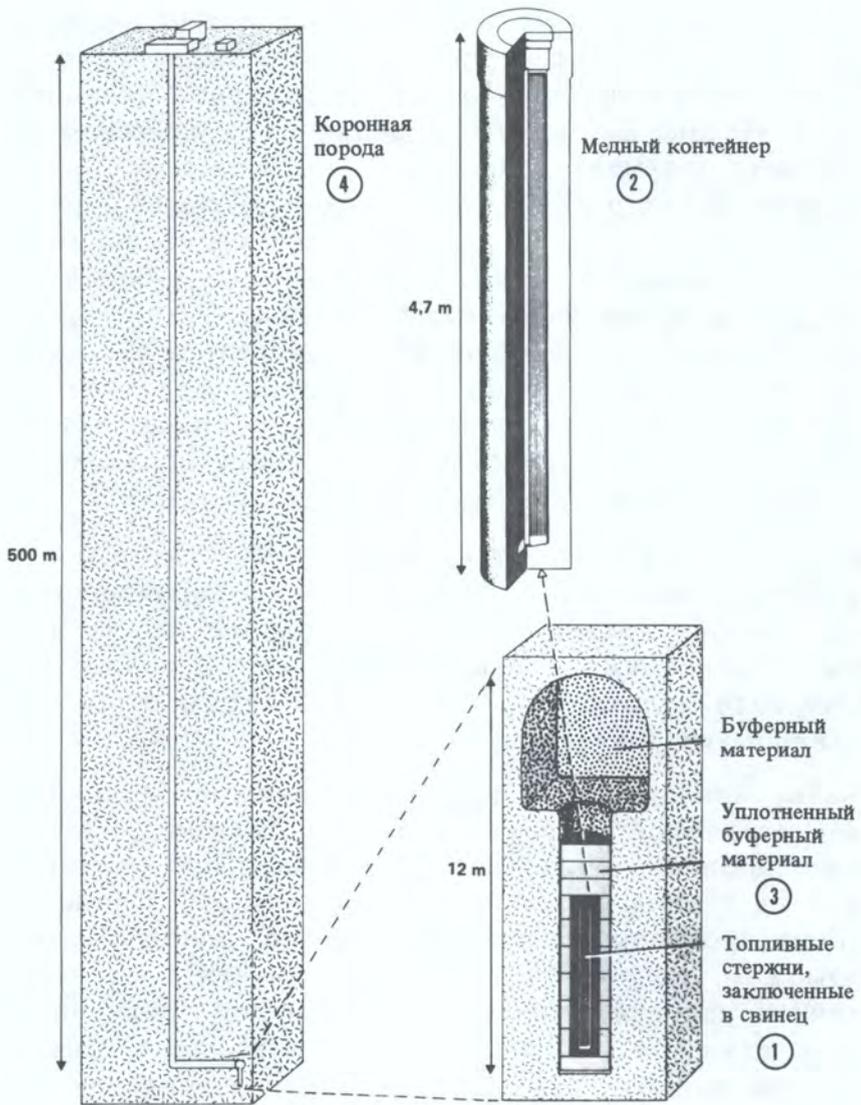


Рис. 4. Схематическое изображение предлагаемого хранилища для окончательного захоронения. Ряд барьеров предотвращает или сдерживает рассеивание радиоактивных элементов из отходов.

ется в индивидуальные скважины на дне системы туннелей, созданной на глубине 500 м, в кристаллических горных породах хорошего качества. Кольцевое пространство между контейнером и стенками скважин из скальной породы заполняется уплотненной глиной (бентонитом), которая сильно разбухает при поглощении воды.

Рис. 4 иллюстрирует различные барьеры

- ① барьер, обеспечиваемый низкой растворимостью топливной матрицы;
- ② контейнер;
- ③ буферный материал;
- ④ коренная порода, имеющая определенные физические и химические свойства.

Кристаллическая порода

Под "кристаллической породой хорошего качества" в настоящей работе понимается порода, имеющая приемлемые механические характеристики, редко встречающиеся незначительные трещины и потому обладающая низкой водопроницаемостью в пределах достаточно больших объемов. Объем горной породы хорошего качества должен располагаться в зоне с низкой тектонической активностью и должен быть окружен обозначенными зонами ослабления, в которых может произойти сброс напряжений, не затрагивающий породу в непосредственном окружении хранилища. Зона хранения должна также иметь равнинный, поверхностный рельеф, который ограничивает гидравлический градиент. Низкая водопроницаемость и малый градиент будут ограничивать потоки грунтовых вод и препятствовать переносу вызывающих коррозию агентов, которые могли бы воздействовать на материал контейнера. На более позднем этапе хранения низкая транспортирующая способность грунтовых вод будет ограничивать скорость растворения радиоактивного вещества.

Еще одним важным аспектом является химия глубинных грунтовых вод. В концепции проекта KBS восстановительные свойства грунтовых вод, которыми, как показали

проведенные исследования, обладают глубинные воды в коренных породах Швеции, рассматриваются в качестве необходимой характеристики. Наличие окислителей является критическим фактором развития коррозии, и растворимость актинидов сильно различается при разных валентных состояниях, преобладающих в водах с окислительными и восстановительными свойствами.

Пятисотметровая толща породы, располагающаяся над хранилищем, также обеспечит защиту от таких событий на поверхности, как оледенение и военные действия.

Топливная матрица

UO₂-матрица характеризуется весьма низкой скоростью выщелачивания, хотя некоторые продукты деления накапливаются в зазорах облицовки топливных стержней. Скорость растворения отходов, однако, не определяется скоростью выщелачивания, а зависит от присутствующего количества воды и от массопередачи через среду, непосредственно окружающую топливо.

Контейнер

В проекте KBS для герметизации топлива предлагается использовать медный контейнер, показанный на рис. 5. Медь создает абсолютно непроницаемый для утечек топлива барьер, который действует в течение весьма продолжительного времени. Наличие незначительных начальных дефектов в одном или нескольких контейнерах существенно не влияет на их эффективность. Медь также обеспечивает защиту от излучения. Срок службы контейнера определяется концентрацией окисляющих агентов в грунтовых водах и количеством воды, вступающим в контакт с поверхностью меди.

Буферный материал и заполнение им скважины

Кольцевое пространство между контейнером и стенкой скважины хранилища в горной породе будет заполняться сильно уплотненными блоками бентонита. При поглоще-

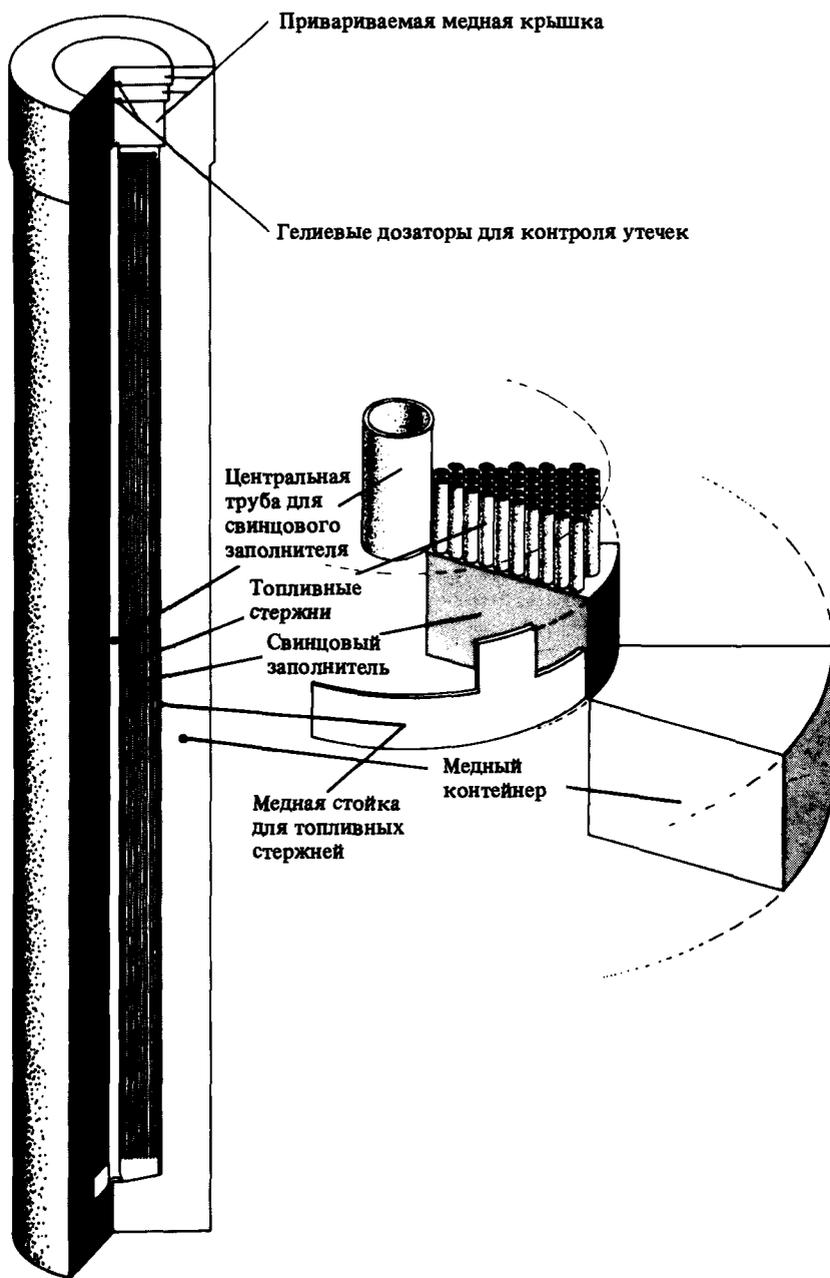


Рис.5. Отходы, заключенные в контейнер. Медный контейнер имеет длину 4,7 м и диаметр 0,8 м.

нии бентонитом грунтовых вод, просачивающихся в скважины хранилища, будет происходить его разбухание, и в результате все трещины и полости будут заполнены пластичной глиной, имеющей весьма низкую водопроницаемость (10^{-12} - 10^{-13} м/с). Это означает, что массопередача может происходить только путем диффузии. Бентонит обеспечит также высокую ионообменную способность и тем самым будет в значительной степени сдерживать миграцию веществ через буферную зону.

Буферный материал, который можно рассматривать как полустественный барьер, будет также стабилизировать химическую среду вокруг контейнера и обеспечивать механическую защиту от незначительных перемещений породы.

Геохимический барьер, образуемый горной породой

Если вследствие коррозии целостность медного контейнера нарушится и радиоактивные вещества растворятся и начнут мигрировать через буферную массу, то в конечном счете они достигнут грунтовых вод трещиноватой породы. Время переноса грунтовых вод из хранилища, можно рассчитать, если достаточно хорошо известны характеристики породообразующей массы. Вещества отходов, однако, будут перемещаться гораздо более медленно, чем грунтовые воды, вследствие эффектов сорбции и осаждения на поверхность трещин и на материал, заполняющий эти трещины. Весьма вероятно, что будет также происходить значительная диффузия в породообразующие массы, которые окружают водоносные трещины. Степень удерживания зависит от характеристик различных веществ отходов в условиях преобладающей химической среды.

Какие функции барьеров достижимы?

При проведении исследований в рамках проекта KBS в качестве входных данных для анализа безопасности был использован ряд весьма неблагоприятных допущений. Тем не менее можно показать, что барьеры обеспечивают поддержание доз для наиболее подверженной облуче-

нию группы на уровнях ниже пределов, рекомендованных МКРЗ, а также ниже предельных доз, являющихся следствием нормального естественного облучения в условиях окружающей среды.

Исследования, выполненные в ходе работы над проектом KBS, показали, что:

- в Швеции имеются достаточно крупные массивы породы с гидравлической проницаемостью менее 10^{-9} м/с;
- медный контейнер с толщиной стенки 20 см мог бы обеспечивать абсолютную изоляцию отходов в течение по меньшей мере нескольких сотен тысяч лет при имеющейся в местах хранения химии грунтовых вод;
- минимальное время, необходимое для растворения и прохождения всех хранимых отходов через буферный слой, может составить 500 000 лет;
- время переноса растворенных веществ грунтовыми водами с глубины 500 метров на поверхность может составить приблизительно 3000 лет, если выбранные породообразующие массы будут иметь низкую проницаемость и пологий топографический профиль;
- химическое удержание важных радиоактивных веществ при прохождении потоков через коренную породу может обеспечить настолько длительные задержки этих веществ, что максимальные дозы будут достигнуты не ранее чем через миллион лет.

ЗАТРАТЫ

Рассмотрение технико-экономического обоснования осуществимости проекта нельзя было бы считать полным, если бы мы не упомянули об оценке предполагаемых расходов. Была произведена первая приблизительная оценка капитальных и эксплуатационных затрат на осуществление всей последовательности операций по обращению с отходами, начиная от выгрузки топлива из реактора,

включая промежуточное хранение в течение 40 лет и кончая окончательным захоронением отходов и закрытием хранилища. Согласно оценкам, полные расходы, включая проценты, составят 5-10% от затрат на производство электроэнергии системой, состоящей из 12 реакторов.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований по проекту KBS ясно показывают, что безопасное окончательное захоронение отработанного ядерного топлива в кристаллической породе осуществимо при имеющейся в настоящее время технологии и с уровнем безопасности, который вполне соответствует пределам, рекомендованным МКРЗ. Этот вывод основан не только на том, что дозы, рассчитанные в ходе исследований по проекту KBS оказались приемлемо низкими, но в большей степени на возможности выбора соответствующих размеров искусственных барьеров, а также глубины хранилища и в некоторой степени качества породы на месте захоронения.

Доклад группы KBS по отработанному топливу был разослан шведским правительством нескольким шведским и зарубежным организациям и экспертам для научного рассмотрения. Подавляющее большинство специалистов, проанализировавших доклад, констатировало, что, по их мнению, проект KBS указывает технически осуществимый путь реализации безопасного окончательного захоронения отработанного ядерного топлива. Учитывая осторожные допущения, использованные в исследованиях по проекту KBS, а также постоянно проводимые комплексные научные исследования в ряде стран, можно предполагать, что, по-видимому, в ближайшем будущем будут предложены более оптимальные решения рассматриваемой проблемы.

В настоящей работе не обсуждается вопрос о том, следует ли считать отработанное ядерное топливо отходами и помещать его без возможности последующего извлечения в глубокие подземные хранилища. Цель статьи состояла лишь в том, чтобы обосновать наш вывод о том,

что безопасное окончательное захоронение отработанного топлива в кристаллической горной породе технически осуществимо при использовании имеющихся в настоящее время методов.

Литература

- [1] Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High-Level Reprocessing Waste, KBS Project, Stockholm (1977).
- [2] Handling and Final Storage of Unreprocessed Spent Nuclear Fuel, KBS Project, Stockholm (1978).