

Обращение с высокоактивными отходами

В.Л. Леннеманн

ЧТО ТАКОЕ ВЫСОКОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

В настоящее время специалисты широко пользуются терминами: низкоактивные отходы, отходы средней или промежуточной активности и высокоактивные отходы, подразумевая при этом различные концентрации радиоизотопов или радиоактивности в отходах. Эти термины стали использоваться в 1950-х годах для целей эксплуатации и обычно указывали на то, каким образом осуществляется обращение с отходами или их обработка и что делается с ними в данных эксплуатационных условиях на конкретной площадке, а не служили для точного определения концентрации радиоактивности или загрязнения. Такое их значение справедливо и в наше время, когда принципиальное и (или) количественное подразделение на три указанные категории в разных странах и даже в отдельных организациях одной и той же страны различно [1, 2].

Для того чтобы избежать путаницы, в течение последних 10 лет активно пропагандируется идея количественного определения низкоактивных отходов, отходов средней активности и высокоактивных отходов с точки зрения радиоактивности. С другой стороны, наблюдается значительное сопротивление количественному определению этих терминов, поскольку обращение с одним кюри и эффекты одного кюри радиоактивного стронция не идентичны эффектам одного кюри плутония и обращению с ним и, в свою очередь, не идентичны эффекту одного кюри трития и обращению с ним и т.д. для различных радиоизотопов. Кроме того, определения низкоактивных, среднеактивных и высокоактивных отходов не будут одинаковыми с точки зрения физических основ радиационной безопасности, с эксплуатационной точки зрения, с точки зрения транспортировки, с точки зрения сброса отходов в море и т.д.. Однако термины "низкоактивные", "среднеактивные" или "промежуточной активности" и "высокоактивные" в своих широких и перекрывающихся диапазонах обычно понятны тем, кто связан с обращением с радиоактивными отходами и с технологией такого обращения.

Отходы высокого уровня, естественно, характеризуются высокими уровнями излучения, но, пожалуй, их наиболее яркой отличительной чертой является то, что они требуют специального обращения и мер, таких, как мощная биологическая защита и специальная система охлаждения, что связано с тепловыделением при радиоактивном распаде. Термин "высокоактивные отходы" обычно подразумевает очищенный раствор (жидкий эфлуент) после первого цикла операций переработки топлива, в ходе которых восстанавливаются плутоний и невыгоревший уран. Этот термин так-

Г-н Леннеманн является руководителем Секции обращения с отходами, Отдел ядерной безопасности и защиты окружающей среды, МАГАТЭ.

же распространяется на любую матрицу, которая содержит достаточно высокую требующую охлаждения концентрацию продуктов деления, которые, если они не отделены от отходов, включают актиниды (альфа-излучающие трансурановые элементы). Примерами таких отходов являются отвержденные высокоактивные отходы и "негодное"отработанное топливо и, возможно, корпуса оболочек. В качестве других примеров того, что иногда считается высокоактивными отходами, можно привести демонтированные высокооблученные реакторные узлы, такие, как управляющие стержни, трубопроводы или дроссели потока, и контейнер с несколькими миллионными кюри газообразного продукта деления, криптона-85.

Настоящая статья посвящена в основном обращению с высокоактивными ядерными отходами, образованными в ядерном топливе во время его выгорания (облучение) в реакторе. Кроме того, если не указано иначе, приведенные в ней обобщения относятся к топливу легководных реакторов, хотя в принципе они справедливы и для ядерных отходов, образованных в других типах реакторного топлива.

Основное внимание при обращении с высокоактивными отходами направлено на обеспечение их изоляции от биосферы и исключение любого значительного выброса радиоизотопов, по крайней мере в опасных для человека концентрациях на протяжении длительных периодов времени, когда такая возможность существует. Эксперты по обращению с ядерными отходами в целом согласны с тем, что удовлетворительная схема обращения с высокоактивными отходами может быть основана на такой последовательности операций:

- промежуточное хранение в жидкой форме (если отходы жидкие) ;
- отверждение (если отходы жидкие) и упаковка отходов;
- хранение твердых отходов с помощью технических средств;
- захоронение твердых отходов в геологических формациях (на суше или под дном океана) .

Эта последовательность показана на рис. 1. Представление материала в настоящей статье будет вестись в соответствии с последовательностью операций, указанной на рис. 1. Возможны также альтернативные стратегии, которые будут упомянуты ниже. За исключением процесса остекловывания, который недавно начал применяться в полном масштабе в Маркуле (Франция) , существующие в настоящее время промышленные методы для топлива энергетических реакторов не продвинулись дальше первого этапа последовательности, однако проводятся широкие научно-исследовательские и конструкторские работы, направленные на создание процессов отверждения и технических средств для промежуточного хранения. Кроме того, проводится значительная деятельность по оценке потенциальных площадок для захоронения или хранилищ отходов в геологических формациях. Эти аспекты будут рассмотрены ниже.

ПЕРЕРАБОТКА ТОПЛИВА И ВЫСОКОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

Схема последовательности операций переработки топлива в энергетических реакторах, которая используется в настоящее время и, по-видимому, будет использоваться в течение определенного времени в будущем, состоит из измельчения или разрезания топливных элементов на короткие отрезки или, в другом случае, из удаления оболочки и растворения топлива в водном растворе азотной кислоты. (Остающаяся или удаленная оболочка топлива обычно называется "очехловкой"). Плутоний и невыгоревший уран (расщепляющиеся материалы) восстанавливаются методом химического разделения. Остальной раствор азотной кислоты, который содер-

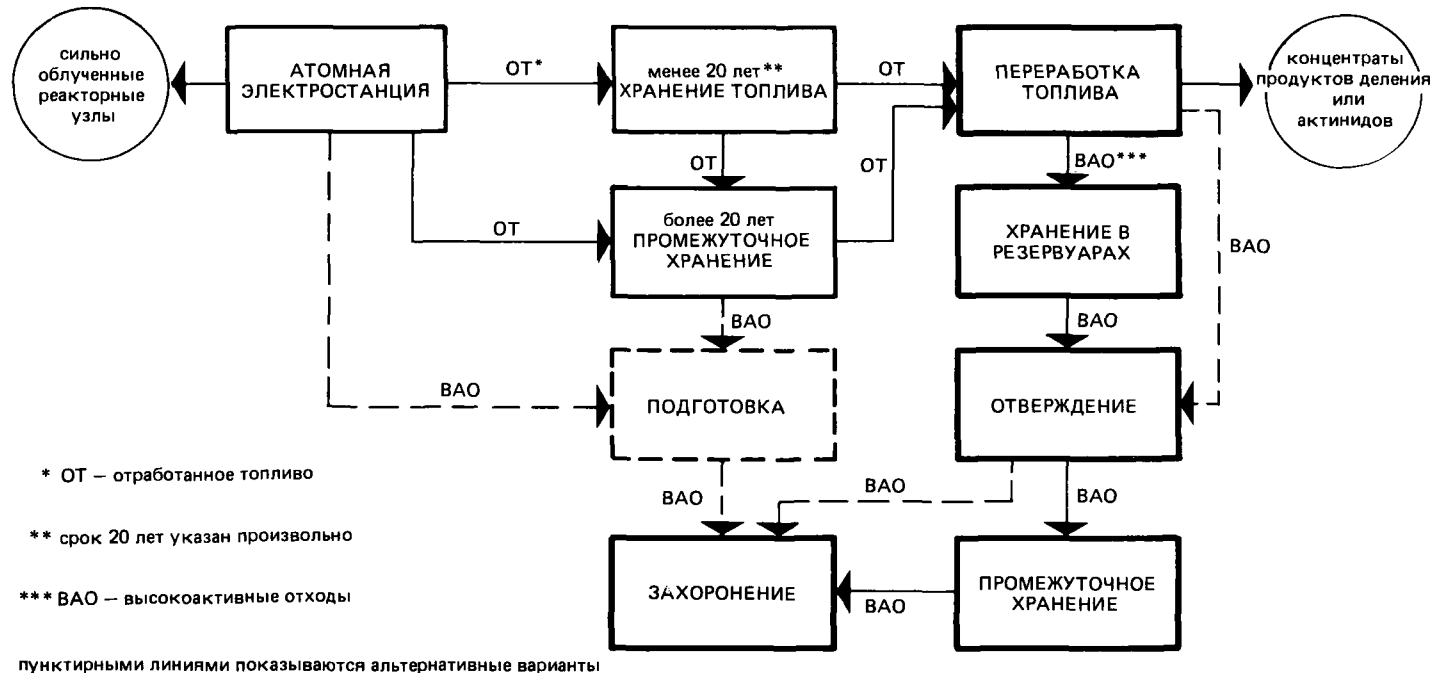


Рис. 1. Обработка высокоактивных отходов

жит химические вещества, добавленные во время технологического процесса, свыше 99% нелетучих продуктов деления вместе с загрязнениями от материалов оболочки, продукты коррозии, несколько десятых процента первоначально растворенного плутония и урана и большая часть актинидных элементов представляют собой так называемые высокоактивные отходы. В зависимости от типа топлива и последовательности операций переработки, на каждую тонну переработанного топлива образуется около 5-10 кубических метров таких высокоактивных жидких отходов. Отходы подвергаются обработке с целью удаления оставшихся органических растворителей и, в конце концов, концентрируются путем выпаривания приблизительно до 5-15% первоначального объема с целью последующего хранения в специально сконструированных баках для отходов, причем степень концентрации зависит от характера отходов, образования осадков и возможностей охлаждения баков с отходами. Конечный результат переработки топлива легководных реакторов представляет собой приблизительно 15 м³ хранимых высокоактивных жидких отходов на каждые вырабатываемые ежегодно 1000 МВт (эл).

В таблице 1 перечислены высокоактивные отходы для различных типов реакторов и различных методов переработки топлива. Обращение с этими отходами должно быть объединено с эксплуатацией установки по переработке топлива и не может быть организовано на кратковременной основе. Оно должно предусматриваться, анализироваться и планироваться заблаговременно на много лет вперед. Существует общее мнение, что в будущем высокоактивные жидкие отходы следует отверждать в менее подвижную форму.

ХРАНЕНИЕ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ЖИДКИХ ОТХОДОВ

Согласно существующему в настоящее время общепринятому мнению концентрации высокоактивных жидких отходов, появляющиеся в результате переработки топлива энергетических реакторов, должны храниться в кислотном виде в высокопрочных баках из нержавеющей стали. (Нейтрализация кислотных отходов каустической содой и хранение их в баках из углеродистой стали не считается лучшим методом, поскольку при этом значительно возрастает объем, образуются осадки и шламы и ограничиваются возможности всей последующей переработки отходов).

Контейнеры для отходов (баки) располагаются в толстостенных бетонных ячеях или подземных камерах, обеспечивающих необходимую защиту, и имеют либо двойные стенки, либо внутреннюю стальную оболочку для исключения каких-либо утечек из основных контейнеров (контейнера). Емкость такого наружного контейнера должна быть достаточной для помещения всего содержимого внутреннего контейнера. Используемые баки из нержавеющей стали имеют емкость от 70 до 1000 кубических метров. Для отвода выделяющегося при распаде тепла предусмотрены системы охлаждения (водяные) с резервными установками аварийного охлаждения, причем для уменьшения коррозии нержавеющей стали температуру раствора обычно поддерживают ниже 65°С. Системы баков для хранения (баковые хранилища) должны также предусматривать перемешивание в баках, вентиляцию, контроль, перекачку раствора как из внутренних, так и из наружных контейнеров, конденсацию паров, удаление газов, образующихся при радиоллизе, и фильтрацию выходящего газа.

При проектировании и сооружении системы баковых хранилищ для хранения жидких высокоактивных отходов необходимо помнить о том, что должна быть предусмотрена возможность многократного заполнения и опорожнения баков, должно быть минимальное количество препятствий, которые могли бы создать помехи

Таблица 1. Характер радиоактивных жидких отходов для различных типов реакторов

Тип реактора	Топливо				Характеристики раствора отходов, поступающего в выпарной аппарат				Начальные характеристики концентрата, подлежащего хранению			
	Тип топлива	Тип оболочки	Типичное выгорание МВт/Т	Минимальное время охлаждения перед переработкой "Т"	Объем А/Т тяжелого металла	Активность в момент "Т" кюри/л	Теплосодержание в момент времени "Т" Вт/л	Вероятный коэффициент концентрации	Объем (после выпаривания) л/т	Активность в момент времени "Т" кюри/л	Содержание тепла в момент времени "Т" Вт/л	Кислотное число N
ЛВР (США)	UO ₂	Циркалой 2 или 4	29 000*	3 года*	5200	150	0,6	14	380		8,3	4-7
ЛВР (Франция)	UO ₂	Цирконий	33 000	1 год	9800	230	0,93	20	540	4100	18,5	2,5
ЛВР (СК)	UO ₂	Циркалой	33 000	150 дней	6250	860	3,2	16,5	400		5,3	0,5-1,0
ЛВР (Индия)	UO ₂	Циркалой	15 000	150 дней	7200	300	9,0	9	800	3000	0,9	2-3
ЛВР (Япония)	UO ₂	Циркалой	28 000	180 дней	5500	210	0,59	16	350	3100	9,3	2,5
ВВЭР (СССР)	UO ₂	Цирконий	28 000	3 года	5500	60	0,27	13	420	730	3,3	4-6
С газовым охлаждением (Франция)	U-Mo	Mg	3 000	1 год	7600	70	0,24	70	110	4800	17	0,8
С газовым охлаждением (Франция)	U/Si/Al	Mg	5 000	1 год	5400	100	0,34	50	100	5400	18	2,5
Магноксовый	U (Nat.)	Магнокс	1 300 3 500	125 дней	4500	460	0,25	50 100	90 45		12	3
AGR	UO ₂	Нержавеющая сталь	37 000 18 000	1 год	5000	600	0,33	20	100		16	
Канду	Переработка не планируется											
HTGR	UC ₂ /ThC ₂	Графит, SiC	100 000	180 дней	5700	1700	7,5		3600			
PFR	(U,Pu)O ₂	Нержавеющая сталь	60 000	180 дней	9100	900 (A) 1200 (B)	4 (A) 5 (B)	2,5	3600		10 (C) 12 (C)	3
MTR	U-Al	Al	200 000	~1 год	400 000	200	0,8	1,3	300 000		1	-1

* Вероятные равновесные значения для США (в настоящее время не производится переработка промышленного ядерного реакторного топлива)

Примечания: (A) 1-ый цикл, среднее значение из внешнего и внутреннего

(B) 6-ой цикл, среднее значение из внешнего и внутреннего

(C) Для случая немедленного выпаривания (на практике выпаривание осуществляется с задержкой).

опорожнению или обеззараживанию как внутренних и наружных контейнеров, так и камеры, и между внутренним и наружным контейнерами и камерой должно быть оставлено достаточное пространство для соответствующего осмотра и любого обслуживания. Должны в избытке иметься устройства для контроля баков и контрольно-измерительная аппаратура для регистрации уровней растворов в баках, температуры баков и жидкости и возможных утечек. При перемещении жидкости предпочтительно использовать естественное перетекание, а не перекачку. На случай аварии необходимо постоянно иметь достаточный резервный объем, предпочтительно пустой бак. Сооружение баков для отходов должно планироваться и осуществляться достаточно заблаговременно, с тем чтобы они имелись в распоряжении, когда в них возникнет необходимость. Организация бакового хранилища для жидких радиоактивных отходов требует тщательного планирования на несколько лет вперед.

Технология безопасного хранения высокоактивных жидких отходов в баках на протяжении нескольких лет была продемонстрирована в нескольких странах. В США имели место случаи утечки из баков. Однако это происходило с баками из низкоуглеродистой стали ранней конструкции. При хранении кислотных отходов в баках из нержавеющей стали, которые считаются в настоящее время безопасными и удобными, не возникало утечек или других серьезных проблем. Это обеспечивает гибкость при эксплуатации и открывает на будущее широкий диапазон возможных вариантов переработки отходов. Такие баки могут также оказаться удовлетворительными в течение длительных периодов времени. Однако баки для отходов в действительности имеют ограниченный срок службы и требуют работы систем отвода тепла и других вспомогательных систем. В этой связи должно обеспечиваться необходимое наблюдение и предусматриваться наличие резервных баков для случаев неожиданных отказов. В случае продолжительного использования баков их в конечном счете необходимо будет заменять.

Однако обычно подразумевается, что хранение высокоактивных отходов в жидкой форме должно представлять собой лишь промежуточную меру и что там, где это практически осуществимо, должно производиться отверждение отходов. Отверждение снизит подвижность отходов и возможность их рассеяния. Кроме того, твердая форма более удобна для транспортировки, хранения и (или) захоронения.

ОТВЕРЖДЕНИЕ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Как отмечено выше, основная цель любого процесса отверждения состоит в преобразовании раствора высокоактивных отходов в твердую форму, с тем чтобы они стали менее подвижными, более устойчивыми, требовали меньше наблюдения и были более пригодны для транспортировки, хранения и захоронения. В идеальном случае готовая твердая форма должна удовлетворять определенным критериям: например, она должна иметь высокую термическую и радиационную устойчивости в сочетании с хорошей теплопроводностью и высокой точкой плавления. Она должна сохранять механическую целостность, быть устойчивой к ударам и иметь весьма низкую скорость выщелачивания водой. Однако в зависимости от того, какие операции производятся над ней, твердая форма не обязательно должна удовлетворять всем перечисленным выше критериям и не все формы должны удовлетворять одним и тем же требованиям.

Разработано несколько подходов к отверждению высокоактивных жидких отходов, включая использование жидкостных подложек, вращающихся подложек, вращающихся печей, тиглей и смесительных камер [3]. В основном они предусматри-

вают обезвреживание и денитрирование отходов с последующим нагреванием остатка до температуры в диапазоне от 400 до 1200⁰С и удалением всех летучих компонентов, в результате чего остается прокаленное твердое вещество. Однако большинство прокаленных отходов умеренно растворимо в воде и обычно не рассматривается как предпочтительная форма для хранения или же захоронения. В связи с этим в большинстве случаев на этапе прокаливания или на втором этапе процесса отверждения добавляются боросиликатные или фосфатные стеклообразующие компоненты, заключающие продукты деления и актинидные окислы в расплав стекла, превращающиеся при охлаждении в стекловидный продукт, скорости выщелачивания которого такие же, как и у пирексного стекла. Основные процессы остекловывания обычно приводят к получению монолитных блоков стекла в контейнерах из нержавеющей стали. Объем отходов, эквивалентный ежегодной выработке 1000 МВт (эл) на ЛВР, колеблется от 2 до 4 м³ с содержанием окислов отходов от 20 до 30% в зависимости от допускаемой тепловой нагрузки радиоактивного распада. Последняя в свою очередь зависит от заданных температур в центре и на поверхности заполненных контейнеров.

Хотя отверждение высокоактивных жидких отходов исследуется в течение приблизительно 20 лет в нескольких странах, занимающихся переработкой облученного топлива, лишь два технологических процесса доведены до уровня регулярного использования. На установке химической переработки в Айдахо (ICPP) в течение приблизительно 15 лет используется в промышленных масштабах технологический процесс кальцинирования на жидкостной подложке, а в Маркуле (Франция) недавно запущена в промышленную эксплуатацию установка по остекловыванию с использованием вращающейся барабанной печи для обжига, продукция которой направляется в плавильную печь для получения боросиликатного стекла (технологический процесс AVM) .

Помимо основных процессов кальцинирования и остекловывания, новые, более совершенные технологические процессы включают в себя изготовление кальцинированных или стеклянных шариков и покрытие их слоями пиролитического углерода, карбида кремния и тонкого металла. Разработаны процессы, включающие в себя введение гранулированных кальцинированных или остеклованных материалов в различного рода матрицы, например металлические, из металлических сплавов и графитовые. Среди других методов, которые исследованы или исследуются, следует отметить экзотермические реакции, которые ведут к образованию практически нерастворимых радионуклидных продуктов в металлической или керамической фазах, получение кристаллических и синтетических минералов, которые включают радионуклиды в малорастворимых кристаллических решетках, спрессованные и спеченные керамические материалы, и сорбцию на цеолитные или глинопоподобные пористые материалы с последующей высокотемпературной обработкой с целью получения керамического материала. Хотя многие из указанных технологических процессов могут привести к получению готовых твердых форм, превосходящих продукцию простого процесса остекловывания, они могут оказаться гораздо более сложными с эксплуатационной точки зрения, и многие из них приводят к получению значительно больших объемов окончательной твердой формы на единицу выработанного электричества.

Независимо от прочих факторов, большинство высокотемпературных процессов отверждения, особенно кальцинирование и денитрирование, включают в себя выпаривание и денитрирование жидких отходов до получения твердого остатка. При этом возникает проблема обработки отходящих газов, о которой необходимо упомянуть. Помимо пара и окислов азота, газовые отходы обычно содержат неко-

торые радиоактивные и другие мелкодисперсные переносимые и летучие радионуклиды, такие, как рутений. Обработка газовых отходов должна предусматривать захват и удаление радиоактивных компонентов газовых отходов и гарантировать, что любые выбросы в атмосферу находятся в допустимых пределах.

Основное количество технологического оборудования установки по отверждению высокоактивных отходов представляет собой систему обработки газовых отходов, которая может быть наиболее сложной и чувствительной частью установки по отверждению. Система обработки обычно состоит из сложной совокупности последовательно включенных фильтров, конденсаторов, газоочистителей, ректификационных колонн и даже сухих поглотителей. Большая часть потока конденсата и промышленного потока может использоваться повторно, а другие могут сбрасываться после обработки с целью снижения радиоактивности до приемлемых уровней.

ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ХРАНЕНИЕ ОТВЕРЖДЕННЫХ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

В настоящее время оцениваются концепции захоронения отвержденных высокоактивных отходов. Реализация наиболее пригодной концепции или концепций даже для демонстрационных целей может потребовать до 10 или более лет. В течение этого времени предполагается осуществлять хранение любых отвержденных высокоактивных отходов каким-либо способом, обеспечивающим легкий доступ и безопасность. Кроме того, может считаться желательным даже более длительное хранение, с тем чтобы дополнительно охладить (путем радиоактивного распада) отходы и снизить уровень тепловыделения в отходах перед их захоронением, особенно в случае захоронения в геологических хранилищах. Хотя некоторые специалисты являются сторонниками захоронения высокоактивных отходов непосредственно после их отверждения, все же, по-видимому, потребуются определенные средства для хранения отходов в течение промежуточного времени между отверждением и передачей на площадку для захоронения.

Необходимо провести четкое различие между хранением и захоронением. Хранением является размещение отходов с целью их последующего извлечения. В связи с этим установки по хранению размещаются, проектируются и эксплуатируются таким образом, чтобы в конечном итоге облегчить перемещение отходов в какое-либо другое место. Захоронение же представляет собой размещение отходов без намерения их последующего извлечения, по крайней мере не ранее завершения начальной демонстрации концепции захоронения, когда должна быть исключена всякая возможность легкого доступа к отходам.

Рассматриваемые в настоящее время установки по хранению отвержденных высокоактивных отходов делятся на три категории: а) водные бассейны, б) камеры с воздушным охлаждением и в) экранированные контейнеры или баки с воздушным охлаждением. Водные бассейны и камеры с воздушным охлаждением могут располагаться на поверхности земли, ниже поверхности и могут быть помещены в подземные полости. Хотя использование каждого из перечисленных выше способов имеет явные преимущества и недостатки, все же в случае каждого из них может быть обеспечена удовлетворительная степень безопасности. Выбор определяется местными условиями окружающей среды и соображениями, связанными с персоналом. Использование снабженных защитой контейнеров или баков с воздушным охлаждением представляет собой наземное хранение и требует значительно больших земельных площадей, чем два других типа хранения.

Опыт, накопленный при хранении облученных топливных элементов в водных бассейнах или камерах с воздушным охлаждением, применим к хранению высокоак-

тивных отходов, причем наибольший опыт накоплен для водных бассейнов. Хотя изучено несколько вариаций каждой концепции, в настоящее время в реальной эксплуатации находится лишь установка по хранению в Маркуле, где используется камера с воздушным охлаждением для хранения выходной продукции технологического процесса AVM. Поступили сообщения о строительстве в Индии аналогичной камеры с воздушным охлаждением для остеклованных высокоактивных отходов. Кроме того, готовые гранулы из обжигательной установки с жидкостной подложкой для связывания отходов в ICPP хранятся в крупных (диаметр — 3,7 м, высота — 14 м) бункерах в камере с воздушным охлаждением. Однако это представляет собой особый случай относительно низкого содержания продуктов деления (уровня тепловыделения) в кальцинированных гранулах. В связи с наличием многих конструктивных вариантов реализации трех основных концепций хранения ниже дается общее описание каждой из них.

а) Водные бассейны: контейнеры с отходами, обычно, но не обязательно, заключенные в герметические оболочки из нержавеющей стали, которые затем хранятся в бетонных бассейнах, облицованных нержавеющей сталью и заполненных деминерализованной водой. Вода представляет собой охлаждающую среду и прозрачную радиационную защиту. Тепло распада, снимаемое при циркуляции воды, переносится во вторичный контур охлаждения, где оно либо отбирается в градирнях, либо переносится в бассейн или какой-либо другой теплоотвод. Система охлаждения требует резервирования, достаточного запаса охлаждающей воды, непрерывного наблюдения и эксплуатации и жесткого контроля химического состава воды для сведения к минимуму коррозии, особенно при долгосрочном хранении. Однако вода не обеспечивает дополнительного барьера загрязнения при каких-либо утечках из контейнера с отходами и его оболочки, а также из рассеивателя тепла в случае кратковременного отказа системы охлаждения.

б) Камеры с воздушным охлаждением: контейнеры с отходами, заключенные в герметичные оболочки из углеродистой стали, которые помещаются в бетонные камеры и окружаются либо стальными кожухами, либо экранами для направления потока охлаждающего воздуха. Отфильтрованный охлаждающий воздух из нижней распределительной нагнетательной системы вентиляции либо проходит вверх через кольцевые зазоры между оболочками и стальными корпусами, либо соответствующим образом распределяется вокруг оболочек экранами и собирается в верхнем распределителе вентиляции. Пройдя через высокоэффективный фильтр, теплый воздух выбрасывается через выводную трубу. Перепады давления и хорошая охлаждающая способность (эффективность) требуют применения принудительной циркуляции воздуха. Вместе с тем, если требования к охлаждению достаточно низки, нет причин, по которым нельзя было бы эксплуатировать камеры с воздушным охлаждением, используя охлаждение при естественной тяге. Радиационная защита обеспечивается либо конструкцией с толстыми бетонными стенками, либо соответствующим размещением камеры. Эта концепция предусматривает высокую целостность оболочек, постоянный контроль за циркуляцией воздуха и, в случае необходимости принудительной циркуляции воздуха, надежную резервную систему. Одним из недостатков является возможность загрязнения воздуха в случае разрушения как контейнера с отходами, так и оболочки.

в) Экранированные контейнеры с воздушным охлаждением: одна или несколько емкостей с отходами, изолированных в стальном контейнере. Контейнер окружа-

ется кольцевым бетонным гамма-нейтронным экраном, причем вокруг него остается воздушный зазор, и транспортируется в зону хранения на открытом воздухе, где он вертикально монтируется на бетонном основании таким образом, что выделяющееся тепло отводится естественным конвекционным потоком воздуха через кольцевой зазор между стальным контейнером и бетонным экраном. Привлекательной чертой этой концепции является гибкость, поскольку установки можно легко модифицировать в соответствии с характером отходов, размерами емкостей с отходами и их количеством. Система практически невосприимчива к повреждениям благодаря наличию массивного бетонного экрана и требует минимальных усилий по эксплуатации и эксплуатационного наблюдения, но, как и другие концепции хранения, требует непрерывного контроля с целью обнаружения утечки радионуклидов. Дефектные контейнеры или бетонные экраны можно легко обнаружить и отремонтировать либо заменить. Как уже было отмечено, недостатком этой концепции является необходимость в больших земельных участках, которые по оценке на порядок величины больше, чем для двух других концепций.

Выбор соответствующей концепции хранения для конкретной установки по хранению высокоактивных природных отходов зависит от площадки, аспектов охраны окружающей среды, затрат и долгосрочной надежности материалов. Еще одним важным соображением является расчетное время промежуточного хранения или продолжительность эксплуатации установки по хранению. Согласно оценкам суммарные затраты на строительство и эксплуатацию оборудованной установки по хранению, включая наблюдение в течение 100 лет после последней доставки отходов, сравнимы для двух концепций установок с воздушным охлаждением, но приблизительно на 50% больше для случая концепции с водяным бассейном вследствие дополнительных расходов на электроэнергию и воду и дополнительный персонал. Имеющиеся в настоящее время технические средства и технология должны быть в состоянии обеспечить создание установки и системы хранения, которые, в случае необходимости, будут удовлетворительно работать по крайней мере в течение 100 лет. Однако ожидается, что в течение последующих 30 лет, а по более оптимистичным оценкам — до конца нашего столетия, будут разработаны соответствующие методы захоронения высокоактивных отходов. С другой стороны, как отмечено выше, возможны технические и экономические преимущества продолжительного промежуточного хранения с целью радиоактивного распада, в результате чего уменьшатся сложности и эффекты в хранилище отходов, связанные как с температурой отходов, так и с теплоотводом.

ЗАХОРОНЕНИЕ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Захоронение высокоактивных ядерных отходов, включая долгоживущие трансурановые радиоизотопы, является в настоящее время одним из наиболее популярных и волнующих общественность вопросов. Это трудный с точки зрения подведения итогов или обсуждения вопрос, поскольку, по мнению автора настоящей статьи, ему придана чрезмерно эмоциональная окраска. Основная причина отсутствия в настоящее время используемого на практике метода захоронения высокоактивных отходов заключается в том, что не было качественной необходимости в таком методе, и, по-видимому, эта необходимость не возникнет еще приблизительно в течение десятилетия. Тем не менее многие настаивают на том, чтобы в качестве одного из условий принятия ядерной энергетики имелась проверенная и продемонстрированная в работе система захоронения ядерных отходов.

Благодаря его доступности захоронение радиоактивных отходов в оборудованных установках на уровне поверхности земли и несколько ниже ее может рассматри-

ваться скорее всего как режим хранения. Для более удаленной изоляции от человека и окружающей его среды предложено несколько концепций захоронения высокоактивных отходов и содержащих трансурановые элементы отходов [4]. В основном они квалифицируются следующим образом:

- а) Наземное захоронение (на суше)
 - i) в глубоких геологических формациях ниже поверхности земли [5, 6] или под дном океана
 - ii) на дне океана
 - iii) в ледниковых зонах
- б) Захоронение в космосе
- в) Захоронение путем ядерных превращений.

Все концепции захоронения радиоактивных отходов на суше направлены на изоляцию отходов или их радиоизотопов от биосферы в такой степени, чтобы не возникало недопустимых уровней облучения человека или других биологических видов. Эта цель может быть достигнута путем обеспечения защиты с достаточной степенью надежности в течение соответствующего периода времени или надлежащего механизма удержания или задержки и наличия рассеивающей среды для разбавления до допустимых уровней любых радиоизотопов, которые попадают в биосферу.

Согласно общему мнению, в случае захоронения в наземной окружающей среде опасность уменьшается, если высокоактивные отходы существуют в твердой, устойчивой к выщелачиванию форме. Однако Советский Союз продемонстрировал возможность инъекции жидких высокоактивных отходов непосредственно в пористые водосодержащие пласты, имеющие соответствующую изоляцию, хотя в настоящее время он осуществляет весьма активную программу по разработке технологии захоронения остеклованных отходов в геологическое хранилище. В настоящей статье рассматривается захоронение лишь отвержденных высокоактивных отходов.

К счастью, опасность радиоактивного источника, в отличие от многих опасных нерadioактивных элементов, таких, как ртуть, кадмий и свинец, со временем снижается. Необходимые периоды изоляции или ограничения для радиоизотопов зависят от соответствующих начальных концентраций радиоизотопов и их периода полураспада, если необходимо, чтобы концентрации снизились до приемлемого уровня. "Эмпирическое правило" при оценке времени, в течение которого высокая концентрация радиоизотопа в фиксированном радиоактивном источнике может снизиться до приемлемого неопасного уровня, состоит в том, что это время принимается равным 20 периодам полураспада радиоизотопа.

Предложенные периоды целостности для изоляции высокоактивных отходов основаны на относительных концентрациях в высокоактивных отходах радиоактивных продуктов деления и остаточных актинидов. При этом подразумевалось то допущение, что определяющими продуктами деления являются цезий-137 и стронций-90, период полураспада каждого из которых составляет около 30 лет, тогда как определяющим актинидом является плутоний-239 с периодом полураспада около 25000 лет. Следовательно, когда рассматривается требуемый период изоляции, его продолжительность составляет около 1000 лет для продуктов деления и порядка 100000 лет для трансурановых актинидов в высокоактивных отходах. Хотя проекты изоляции на упомянутый последний период времени могут показаться до некоторой степени претенциозными, он находится в рамках периодов времени, для

которых геологические события должны предсказываться с достаточной определенностью для многих мест расположения.

Основное требование при оценке пригодности любой геологической формации в качестве хранилища для захоронения радиоактивных отходов заключается в ее способности содержать и изолировать радионуклиды от биосферы до тех пор, пока они не распадутся до неопасных уровней. Основным природным механизмом, ответственным за вынос радионуклидов из отходов в тщательно выбранном глубоком хранилище в биосферу, является воздействие грунтовых вод. Поэтому очень важным аспектом становится защита отходов от циркулирующих грунтовых вод. Следовательно, сухая геологическая формация, пока она остается таковой, должна обеспечивать достаточную защиту. Устойчивость геологической формации по отношению к циркулирующим грунтовым водам может быть дополнительно повышена окружающими геологическими барьерами. Другие барьеры, которые могут содействовать сохранению радионуклидов, не обязательно должны ограничивать типы хранилищ случаем совершенно сухой формации, если скорости миграции грунтовых вод формации на больших расстояниях нулевые или весьма малые. Этими другими барьерами являются:

- форма отходов, например относительно нерастворимый продукт;
- контейнер высокой прочности;
- состав и химия грунтовых вод;
- целостность окружающих геологических барьеров по отношению к миграции грунтовых вод;
- сдерживание миграции радионуклидов из зоны захоронения благодаря различным механизмам в окружающих геологических слоях, таким, как ионообменные реакции, фильтрация, поверхностная адсорбция и осаждение. Величина эффекта задерживания может значительно изменяться в зависимости от характера геологической формации или слоя и в зависимости от радионуклидов. Этот эффект следует тщательно изучить, прежде чем рассматривать его как значимый фактор безопасности;
- искусственные механизмы и (или) технические устройства для сдерживания миграции грунтовых вод и снижения скоростей растворения отходов.

Независимый характер каждого из описанных выше барьеров иллюстрирует значительную степень избыточности, которая может быть введена в схемы изоляции отходов в геологической формации.

Толстые пласты или диапитритные включения **каменной соли** считаются в настоящее время одной из наиболее многообещающих геологических сред для захоронения высокоактивных отходов и отходов, которые преимущественно загрязнены весьма долгоживущими трансурановыми изотопами. Такое мнение является в основном результатом широких исследований, которые были проведены в Соединенных Штатах и в Федеративной Республике Германии. Основными преимуществами каменной соли в качестве среды для захоронения отходов являются легкость горно-рудной разработки, весьма низкое содержание воды, относительно хорошие термические свойства и пластические характеристики, обеспечивающие перетекание и герметизацию созданных человеком внедрений или любых повреждений, которые могут возникнуть. С другой стороны, каменная соль растворима в воде, растрескивается при относительно умеренных температурах и в определенной степени вызывает коррозию большинства металлов.

В некоторых странах изучаются определенные **глинистые формации** (глины), обладающие высокой пластичностью. Пластичность глин приблизительно пропорциональна содержанию в них воды. Для того чтобы быть достаточно пластичными, соответствующие глины, по-видимому, должны содержать 15-20% воды, которая, однако, перемещается с относительно низкими скоростями или не перемещается вообще. Хотя глины имеют значительно более низкую теплопроводность, чем каменная соль, и могут вызвать трудности при выемке (выработке), они, с другой стороны, представляют определенные преимущества, такие, как высокая сорбционная способность, нерастворимость и незначительная коррозия в них контейнеров с отходами.

Проводятся также исследования в отношении возможности размещения хранилищ радиоактивных отходов в **кристаллических** или так называемых **“твердых скальных породах”**, включая гранит, базальт, известняк и метаморфические породы. Такие породы в случае их монолитности непроницаемы, но зачастую пересекаются сетью трещин или изломов, которые способны пропускать значительное количество грунтовых вод. Однако все же существуют твердые горные породы, содержащие весьма незначительное количество циркулирующих грунтовых вод или совсем не содержащие их, что является результатом определенных геологических ситуаций, таких, как вторичная герметизация (осаждение минералов) разломов, или изоляция от водоносных горизонтов водонепроницаемыми формациями. Даже если образование разрывов в конце концов приведет к ограниченному контакту между отходами и грунтовыми водами, это не обязательно обусловит собой значительную потерю изоляции, поскольку контейнер, форма отходов и замедленная миграция радионуклидов через окружающие слои могут обеспечить дополнительные барьеры.

Обсуждение сравнительных достоинств различных типов геологических формаций, включая окружающие пласты, с точки зрения размещения в них хранилища радиоактивных отходов может продолжаться и в будущем. Важным является то, что должны существовать различные приемлемые места для размещения хранилищ отходов в глубоких скальных породах.

Захоронение в геологических формациях под дном океана принципиально не отличается от захоронения в геологических формациях ниже поверхности земли. Основное различие заключается в технологии размещения отходов и в легкости их извлечения, если таковое когда-либо потребуется. Несмотря на наличие технологии подземных операций, подробности размещения отходов под дном океана все еще носят концептуальный характер, хотя аналогичная деятельность уже осуществляется в ходе проведения подводной геологической разведки. Однако захоронение отходов в формациях под дном океана имеет характерные для него преимущества удаленности от сфер предполагаемой деятельности человека, высокой ионообменной способности любых расположенных выше осадочных пород, и весьма высокой степени разбавления любых радионуклидов, которые могут покинуть хранилище.

Некоторые специалисты предлагают помещать тщательно обработанные высокоактивные отходы, содержащие трансурановые элементы, на дно океана. Техническая осуществимость этой концепции зависит от возможности изготовления твердых матриц и (или) контейнеров, обеспечивающих требуемое долгосрочное сохранение с необходимой надежностью. Привлекательной особенностью этого подхода является возможность охлаждения с помощью окружающей водной среды.

Предложены различные концепции захоронения отходов в континентальных ледяных массивах, особенно в ледяной шапке Антарктики, которая несомненно существует уже в течение нескольких миллионов лет. Теоретически предполагается, что разогретые контейнеры с отходами будут проплаиваться через лед до границы льда со скальными массивами и будут герметизироваться в результате смерзания над ними расплавленного льда. Надежность сохранения будет дополнительно повышена помещением отходов в коренные породы, расположенные под слоем льда, что в определенном смысле будет представлять собой захоронение в геологической формации. В настоящее время интерес к возможному использованию областей оледенения незначителен, что обусловлено подвижностью ледяных шапок, недостаточным знанием механизмов, управляющих долгосрочным климатом земного шара, и более благоприятными аспектами доступных геологических формаций.

Захоронение высокоактивных отходов в космическое пространство обеспечит наиболее полную их изоляцию от окружающей человека среды. Однако стоимость запуска в космос ограничивает в настоящее время практическую ценность этой концепции, делая ее привлекательной лишь для небольших специальных объемов. Нерешенными проблемами являются также надежность при запуске и последствия повторного входа в атмосферу капсулы, содержащей отходы.

Изотопное превращение рассматривается некоторыми специалистами как в принципе идеальное решение проблемы захоронения долгоживущих радионуклидов, содержащихся в высокоактивных отходах. Оно предусматривает их конверсию в гораздо более короткоживущие или даже стабильные изотопы. Превращение долгоживущих продуктов деления не считается осуществимым в рамках обозримой технологии, хотя превращение трансурановых актинидов может быть осуществлено. Одна из привлекательных идей заключается в извлечении трансурановых альфа-излучателей (актинидов) с весьма большими периодами полураспада из всего объема отходов, особенно из высокоактивных отходов. Оставшийся материал, загрязненный продуктами деления, потребует в этом случае, как предполагают, изоляции на период приблизительно лишь до 1000 лет. Без продуктов деления с высоким тепловыделением трансурановые элементы с низким выделением можно будет подвергать захоронению каким-либо более удобным способом или возвращать для переработки в ядерные реакторы для выгорания (превращения) с образованием более короткоживущих продуктов деления и стабильных элементов.

Хотя с технической точки зрения, по-видимому, можно удалять трансурановые элементы до ничтожно малых концентраций их в высокоактивных отходах, остаются также некоторые долгоживущие продукты деления, которые необходимо оценить с точки зрения их биологического воздействия. Кроме того, очищенные растворы высокой активности, получаемые после переработки топлива, содержат менее половины количества трансурановых элементов в отходах ядерного топливного цикла, и, по-видимому, будут представлять еще меньшие дозы, если трансурановые элементы будут возвращаться для дожигаания в реакторах. В настоящее время существуют значительные сомнения в отношении преимуществ обращения с большой циркулирующей нагрузкой трансурановых элементов в ядерном топливном цикле.

Захоронение высокоактивных отходов в геологических формациях является в настоящее время, по-видимому, единственной осуществимой в рамках нынешней технологии концепцией, которая предоставляет возможность потенциального извлечения отходов во время начального периода, если это кажется необходимым [7]. По-видимому, основная область неопределенности касается влияния температуры высокоактивных отходов на окружающую среду хранилища. Это влияние, безусловно,

вно, может быть различным в зависимости от концентрации тепловыделяющих продуктов деления в отходах, соответствующего периода выдержки перед захоронением отходов и плотности размещения отходов.

ОБЛУЧЕННЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

За последнее время специалисты уделяют значительное внимание возможности не перерабатывать отработанное ядерное топливо с целью восстановления и повторного использования расщепляющегося и неиспользованного материала (плутония и невыгоревшего урана), а осуществлять захоронение отработанных топливных элементов в виде отходов. Масштабы будущего осуществления подобного рода захоронения потенциальных национальных ресурсов носят скорее теоретический характер, по крайней мере до тех пор, пока не гарантирован приемлемый источник энергии, заменяющий ядерную. Тем не менее, при существующей обстановке необходимо рассмотреть захоронение отработанных топливных элементов в качестве отходов. В дополнение к продуктам деления и трансплутониевым элементам, обычно образующим высокоактивные отходы, отработанные топливные элементы содержат приблизительно в 99 раз больше плутония и урана, чем эквивалентные высокоактивные отходы, которые получились бы в результате переработки. Объем материала в отработанном топливном элементе, подлежащем захоронению, также в 7-10 раз больше.

Все, что говорилось в отношении хранения и захоронения отвержденных высокоактивных отходов, относится также к хранению и захоронению отработанных топливных элементов. Как отмечено выше, предлагаемые режимы хранения отвержденных высокоактивных отходов экстраполированы на основе технологии, опыта и концепций хранения облученного реакторного топлива, то есть предусматривают использование водных бассейнов, камер с воздушным охлаждением и отдельных контейнеров с воздушным охлаждением. По существу нет сомнения в том,

Таблица 1. Сравнение тепловой энергии и радиоактивности отработанного топлива (ОТ) и высокоактивных отходов (ВАО)

Время с момента выгрузки отработанного топлива, годы	Тепловая энергия, Вт/МТТМ		Радиоактивность, кюри/МТТМ	
	ОТ	ВАО	ОТ	ВАО
10	1200	1000	410000	320000
100	290	110	42000	35000
1000	55	3,3	1800	130
10000	14	0,47	480	42
100000	1,1	0,11	58	21
1000000	0,39	0,15	21	10

МТТМ — метрические тонны тяжелого металла, первоначально загруженного в реактор.

что соответствующим образом упакованное облученное реакторное топливо может храниться в течение длительных периодов наблюдения, причем концепции хранения с воздушным охлаждением, по-видимому, предпочтительны в случае, когда топливо достаточно охлаждено.

Хотя, по-видимому, технически разумно осуществлять захоронение отработанного топлива или топлива, которое упаковано, непосредственно в геологическую формацию, полагаясь на геологическое сохранение, утверждение о том, что с точки зрения обращения с отходами такое захоронение будет когда-либо приемлемо как сводящее риск к разумному минимуму, является спорным. Во-первых, следует признать то обстоятельство, что ядерное топливо создается в настоящее время для оптимальной работы в реакторе, а не для того, чтобы оно удовлетворяло каким-либо критериям захоронения. Кроме того, газообразные продукты деления находятся в топливном элементе под значительным давлением, и необходимо учитывать радиологические последствия выхода их наружу при обращении с топливным элементом или при нахождении твэлов в среде для захоронения, по крайней мере до тех пор, пока радиоактивный распад снизит их концентрации до биологически приемлемых уровней. С другой стороны, существует возможность того, что топливные элементы могут быть заключены или захоронены в соответствующим образом сконструированных корпусах или тяжелых экранированных контейнерах, которые, как можно ожидать, сохраняют целостность в течение приблизительно 100 тысяч лет или в течение того промежутка времени, пока их содержимое будет оставаться опасным. Фактически содержание плутония в отработанном топливе, по-видимому, значительно продлевает этот период времени. В долгосрочном плане может быть желательным осуществление дегазации и переработки облученного топлива в некоторую форму для захоронения, например, путем измельчения или разрезания топливных элементов на мелкие части и заключения их в относительно нерастворимую матрицу. Методы, пригодные для захоронения отработанных топливных элементов, пока еще не достаточно изучены и не согласованы.

ДРУГИЕ ВЫСОКОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

В таблице на рис. 1 перечислены высокооблученные реакторные узлы и концентрации продуктов деления как возможные высокоактивные отходы. Они вкратце рассматриваются ниже.

Подвергшиеся сильному облучению реакторные узлы могут рассматриваться как высокоактивные отходы вследствие наведенной в них радиоактивности. Вначале они требуют сильного экранирования для радиационной защиты, однако обычно достаточно охлаждения окружающим воздухом. Основные тепловыделяющие радионуклиды не имеют относительно больших периодов полураспада и со временем распадаются до уровней, которые могут потребовать мер предосторожности, однако не вызовут проблем при захоронении этих узлов как в подземных хранилищах, так и в хранилищах других видов. Существующий метод обращения с такими активными в радиологическом отношении узлами заключается в том, что в течение определенного периода охлаждения их хранят в снабженной мощной защитой, хорошо вентилируемой зоне, по крайней мере до тех пор, пока уровень тепловыделения не станет достаточно низким и при подготовке к захоронению и захоронении тепловыделением можно будет пренебречь.

Продукты деления или актинидные концентраты возникают в результате извлечения по каким-либо причинам отдельных фракций продуктов деления или определенных актинидных фракций из потоков при переработке топлива или из потока высоко-

активных отходов. Они также могут представлять собой отстой из выпарного аппарата или концентратора, возникающий в результате испарения и концентрации потока среднеактивных жидких отходов. Если они не потребуются для некоторых полезных целей, эти жидкие концентраты могут поступать в баки для хранения высокоактивных жидких отходов. В данном случае необходимо гарантировать, что эти потоки отходов, особенно отстой из выпарного аппарата, не внесут какого-либо компонента, несовместимого с запланированным процессом отверждения. Может оказаться желательным или необходимым отверждать эти высокоактивные жидкие отходы с использованием отдельного процесса.

Настоящая статья написана на основе лекции, прочитанной г-ном Леннеманном на учебных курсах МАГАТЭ "Планирование и осуществление ядерных энергетических проектов", состоявшихся в Карлсруэ, Федеративная Республика Германии, с 4 сентября по 24 ноября 1978 года.

Литература

- [1] "Standardization of Radioactive Waste Categories", Technical Reports Series No.101, IAEA, Vienna, (1970).
- [2] "Progress Report on the Results of the Inquiry on Classification of Radioactive Wastes", Working Document RWM (77)1, September 1977, Radioactive Waste Management Committee, NEA/OECD, Paris.
- [3] "Techniques for Solidification of High-level Wastes", Technical Reports Series No.176, IAEA, Vienna, (1977).
- [4] Round Table 3.1. "Solid High-level and Long-lived (Alpha-contaminated) Radioactive Waste Disposal Options and Their Availability", Reprint from "Nuclear Power and Its Fuel Cycle", Vol.4, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1977).
- [5] "Site Selection Factors for Repositories of Solid High-level and Alpha-bearing Wastes in Geological Formations", Technical Reports Series No.177, IAEA, Vienna, (1977).
- [6] "International Aspects in Geological Disposal of Nuclear Waste", D. Richter & Wm. L. Lennemann, Proceedings of the First International Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns (Rockstore 77) Stockholm, Sept. 1977 (Pergamon Press).
- [7] "Storage and Disposal of High-level and Alpha-bearing Wastes", an excerpt from "Management of Radioactive Wastes", Wm. L. Lennemann, H.E. Parker and P.J. West, A paper presented at the European Nuclear Conference, Paris, April 1975.