



Долговременное хранение и захоронение отработавшего топлива

Александр Нечаев, Владимир Онуфриев
и К.Т. Томас

Хорошо известно, что отработавшее топливо и высокоактивные отходы (ВАО) являются источниками высокой радиоактивности и тепла в результате ядерного распада. Следовательно, отработавшие топливные сборки должны храниться в охлаждающей среде до последующей обработки. Со временем количество тепла от радиоактивного распада уменьшается (быстрее, чем наведенная активность), а большая часть продуктов деления в отработавшем топливе распадается до приемлемых уровней через 300–1000 лет*.

Большинство изотопов дочерних продуктов распада плутония, америция, нептуния, йода, технеция и урана остаются радиоактивными в течение нескольких миллионов лет. С точки зрения радиотоксичности наибольшую озабоченность вызывает период примерно в 10 000 лет.

Г-н Нечаев — руководитель Секции ядерных материалов и технологии топливного цикла, а г-н Онуфриев — сотрудник этой Секции. Г-н Томас — сотрудник Отдела ядерного топливного цикла.

* Дополнительные технические данные см. *Guidebook on Spent Fuel Storage*, IAEA (Руководство по хранению отработавшего топлива), Серия технических отчетов МАГАТЭ № 240, Вена (1984 г.) и *Characterisation of Long-lived Radioactive Wastes to be Disposed in Geological Formations*, В. Бозола, Рабочий документ SCK, Центр ядерных исследований в Моле, Бельгия (1983 г.).

Регламентация использования искусственных наземных сооружений не может рассчитываться на столь длительную перспективу, тогда как геологические процессы вполне могут иметь такую продолжительность. Именно это соображение делает привлекательным захоронение отработавшего топлива в геологических формациях.

Для любой стратегии, избранной в отношении последних стадий ядерного топливного цикла, долговременное хранение отработавшего топлива является важнейшей частью интегрированной системы по обращению с отходами. В долговременных хранилищах предполагаются не только операции по обработке отработавшего топлива, но также упаковка и, возможно, уплотнение стержней. Не исключается и возможность захоронения отработавшего топлива в контейнерах после долговременного хранения и без переупаковки*.

Проблемы хранения

В настоящее время рассматриваются только два определенных решения по конечным стадиям ядер-

* См. в журнале *Nuclear Fuel* (28 января 1985 г.) доклад с предложением Министерства энергетики США относительно роли в будущем контролируемых хранилищ с возможностью извлечения отходов в системе обращения с отходами.

ного топливного цикла: переработка (ранняя или с временной выдержкой) и непосредственное захоронение (отработавшего топлива или радиоактивных отходов). Для реализации любого из этих решений требуется кратковременное или долговременное хранение (см. прилагаемую диаграмму возможных решений).

Проведенные МАГАТЭ и Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ/ОЭСР) исследования показали, что к 2000 г. во всем мире аккумулируется около 200 000 метрических тонн тяжелого металла от водных реакторов. Переработано будет не более одной четвертой этого количества*

В 90-х годах некоторые энергетические фирмы будут испытывать нехватку в хранилищах, хотя вместимость имеющихся в настоящее время, создаваемых и планируемых во всем мире соответствующих хранилищ (приреакторных и внестанционных) превышает ежегодное увеличение непереработанного топлива**.

Эта проблема возникает в связи с тем, что существующие атомные электростанции рассчитаны на хранение своего отработавшего топлива от 3 до 5 лет с целью его охлаждения до транспортирования на завод по переработке. Страны ищут теперь наилучший путь увеличения возможностей хранения ввиду отсрочки в коммерческом строительстве реакторов-бридеров, высоких цен на переработку и излишков урана.

Возможные решения проблемы хранения

Имеется несколько путей решения этой проблемы или отсрочки ее решения:

- *Перевозить отработавшее топливо* из приреакторного бассейнового хранилища в другое место в пределах одной энергетической системы, где имеются свободные территории. В Соединенных Штатах Америки это может сократить (примерно на 43 %) кумулятивные дополнительные мощности, которые потребуются к 1998 г.*** Однако это может повлечь за собой дополнительные затраты на транспортные контейнеры и некоторые регламентационные и лицензионные трудности. Это решение может лишь отодвинуть время принятия окончательного решения.

* См. „Final Report of the Expert Group on International Spent-Fuel Management” (Заключительный отчет группы экспертов по международным аспектам обращения с отработавшим топливом) IAEA Reg. ISFM/EG/26 (1982) и Summary of Nuclear Power and Fuel Cycle Data (Сводные данные по ядерной энергетике и топливному циклу) OECD (1985 г.).

** Это показано в исследовании, проведенном в 1982 г. Группой экспертов МАГАТЭ по международным аспектам обращения с отработавшим топливом, и подтверждено затем в докладе „Положение дел с обращением с отработавшим топливом в Канаде” (Д.Р. Маклин, Ф.М. Макдонелл и др.), представленном на заседании Консультативной группы МАГАТЭ по обращению с отработавшим

*** См. статью Э. Андерсона „Фирмы испытывают недостаток в площадях для хранения отработавшего топлива” в журнале Chemical and Engineering News (1 апреля 1985 г.)

Предположительные расходы — 10–40 долл. США на килограмм урана в зависимости от расстояния*.

- *Расширить вместимость существующих приреакторных бассейнов* путем использования компактных стеллажей, двойных ярусов и уплотнения стержней. Компактные стеллажи и двойные ярусы — испытанная технология, но в отношении уплотнения стержней требуются дополнительные исследования и разработки для того, чтобы сделать эту операцию полностью лицензионной. Стоимость изменения стеллажей и уплотнения стержней оценивается примерно в 10 долл. на килограмм урана**. Это решение также отодвигает время принятия окончательного решения по долговременному хранению.

- *Строить новые внестанционные хранилища* для централизованного хранения отработавшего топлива сроком на 50 и более лет при наличии возможностей непосредственного захоронения или переработки. Предполагается, что это — единственная возможность хранения отработавшего топлива после полного заполнения приреакторных бассейнов и до транспортировки для переработки или прямого захоронения. Однако сооружение таких хранилищ — дело, требующее времени (не менее 10 лет) и средств.

Опыт долговременного хранения

Имеется два способа долговременного хранения отработавшего топлива:

- *Хранение в водных бассейнах*, являющееся испытанной технологией для долговременного хранения окисного топлива. В оболочках из циркония и нержавеющей стали топливо водных реакторов успешно хранится (без существенной коррозии и выброса газообразных продуктов деления) в водных бассейнах более 20 лет. Предполагается, что увеличение хранения до 50 лет не должно вызвать серьезных проблем.

- *Сухое хранение* предполагает хранение отработавшего топлива в воздушной среде, в инертном газе или в двуокиси углерода. Это — утверждающаяся технология. Хотя примеров сухого хранения отработавшего топлива немного, проведенные в Федеративной Республике Германии расчеты по безопасности показали возможность его безопасного хранения в среде инертного газа в течение 40–50 лет. Такой же срок хранения допускает и разработанная в Канаде и США концепция хранения отработавшего топлива в свободной атмосферной среде. (Однако максимальная температура оболочек топливных стержней в момент помещения их на хранение не должна превышать 175 °C. Допускаемая температура оболочек из циркония при хранении в атмосфере инерт-

* См. статью Э.Р. Джонсона „Выбор технологии хранения отработавшего топлива” в журнале „Nuclear Engineering International” (сентябрь 1984 г.)

** См. Status of Spent-Fuel Dry Storage Concepts: Concerns, Issues, and Developments (Концепции сухого хранения отработавшего топлива: тревоги, проблемы и разработки), TECDOC-359 (1985).

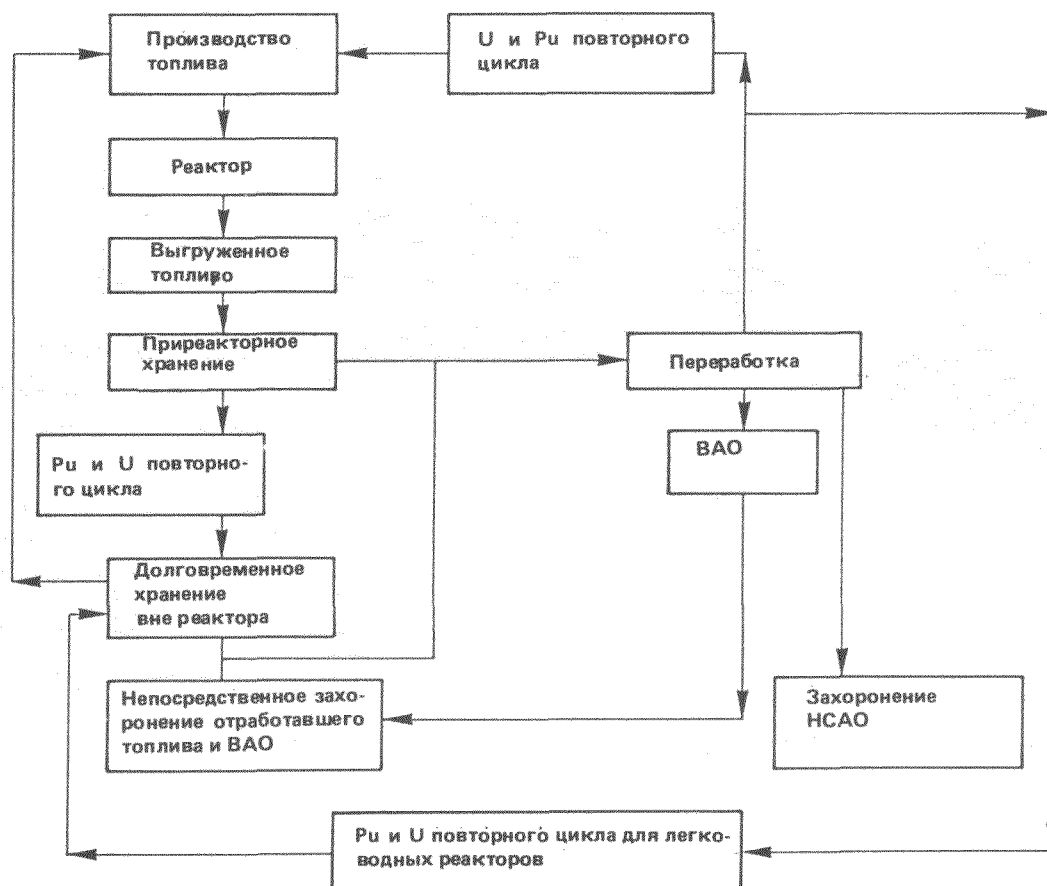
Обращение с радиоактивными отходами

Внестанционные хранилища отработавшего топлива: хранение 40 лет или более

Страна	Хранилище	Тип	Вместимость*	Состояние
Федеративная Республика Германии	Горлебен Ахаус	Сухое хранение в контейнерах (типа Castor)	1500 (420 контейнеров или более)	Горлебен: разрешение на эксплуатацию получено в сентябре 1983 г. Ахаус: в стадии строительства
Швеция	CLAB	Водные бассейны в подземной полости	3000 в 4-х бассейнах (возможно увеличение)	Работает с 11 июля 1985 г. (принято 6,5 мтУ)
Финляндия	TVO-KPA-STORE	Подземные водные бассейны	600 в 3-х бассейнах (будет увеличено до 1270)	В стадии строительства (будут введены в эксплуатацию в 1987–1988 гг.)
США	MRS	Сухое хранение в герметизированных канистрах, в контейнерах или сухих скважинах	15 000	Определение площадки (будет введено в эксплуатацию в 1996 г.)

* в метрических тоннах урана (мтУ).

Схема решений для конечных этапов топливного ядерного цикла



ного газа определена примерно в 400 °С*. Это означает, что для хранения в свободной атмосферной воздушной среде отработавшее топливо должно сначала храниться в водном бассейне или в атмосфере инертного газа для того, чтобы понизить температуру оболочек топливных стержней до требуемых уровней.)

Принципиальное различие между водно-бассейновыми и сухими хранилищами заключается в том, что последние носят модульный характер и при необходимости могут расширяться.

Во многих странах (включая Канаду, Финляндию, Италию, Швецию, Великобританию, США и СССР) ведутся исследования и разработки по конструированию, строительству и лицензированию вне реакторных хранилищ. В Швеции и Федеративной Республике Германии функционируют централизованные хранилища для долговременного хранения отработавшего топлива. Некоторые страны имеют планы строительства таких установок (см. прилагаемую таблицу).

Стоимостные сравнения различных способов долговременного хранения (бассейновых и сухих — металлические бочки, бетонные герметизированные контейнеры, камеры, сухие скважины) затруднительны ввиду различия в странах одних и тех же факторов. Для хранения отработавшего топлива в течение 40 лет оценки стоимости меняются от 45 до 220 долларов для бассейновых хранилищ и от 33 до 83 долларов для сухого хранения (оценки в долларах 1984 г. на килограмм урана)**.

Помимо опыта, приобретенного в конструировании, лицензировании и строительстве первых вне реакторных хранилищ, учитывались также следующие факторы: общий объем отработавшего топлива и динамика его поступления, климатические и сейсмические условия, наличие промышленных мощностей и инфраструктуры национальной индустрии, принятие общественностью и наличие данных для отчетов по безопасности.

Захоронение в геологические формации

При выборе подходящей среды для такого захоронения изучались гидрогеологические, геохимические,

* См. доклады: Б. Дросте „Опыт по оценке безопасности контейнеров для сухого хранения отработавшего топлива в Федеративной Республике Германии“, А. Мюллер „Временное сухое хранение отработавшего топлива — опыт анализа безопасности при осуществлении процедур атомного лицензирования“, М. Нойман „Отвод тепла от хранимых сухим способом отработавших топливных элементов“, представленные на заседании Технического комитета МАГАТЭ по методам, используемым при проектировании бассейновых и сухих хранилищ для отработавшего топлива, Эспоо, Финляндия, 30 сентября — 3 октября 1985 г. (будут опубликованы).

** См. доклад А. Нечаева и В. Онуфриева „Хранение отработавшего топлива: опыт и тенденции“, представленный на 6-м симпозиуме СЭВ по исследованиям в области переработки отработавшего топлива и обезвреживания радиоактивных отходов, Пештаны, Чехословакия, март 1985 г.



Одна из концепций захоронения отработавшего топлива. Шахтный ствол глубиной 1000 м и диаметром 7 м. (Источник: Министерство энергетики США).

минералогические и термомеханические свойства формаций, а также их структурная прочность и стабильность. Соответствующее проектное и техническое обеспечение позволяет рассматривать различные геологические среды в ряде геологических формаций.

Геологические формации, потенциально подходящие для хранилищ, образуются в следующих трех группах пород: эвапоритах (таких как соль), осадочных породах, магматических и метаморфических кристаллических породах.

● **Каменная соль (галит).** Это очень распространенный эвапорит, который привлекает наибольшее внимание. Он обладает благоприятными свойствами и имеет широкое распространение в ненарушенном виде в геологических формациях, демонстрируя стабильность на протяжении тысяч миллионов лет. Каменная соль существует как слоистое месторождение или как большой купол, поднятый вверх диапиризмом. Высокая пластичность делает ее непроницаемой для газов и жидкостей. Она обладает и другими благоприятными свойствами: хорошей механической прочностью, теплопроводностью и легкостью разработки. Возможные недостатки: наличие карманов с рассолом и включений, могущих мигрировать при некоторых термических условиях; вероятность нежелательных взаимодействий контейне-



Производство стеллажей для хранения отработавшего топлива в Дании. (Фото RDM).

ров с породой, слабые сорбционные качества, возможное движение соли (диапировое), возможная добыча человеком соли и связанных с ней ресурсов вблизи захороненных отходов и высокий уровень растворимости соли в воде.

- *Ангидрит (сульфат кальция).* В настоящее время оцениваются лишь мощные пласты или массивные включения на средней глубине.
- *Глинистые формации.* Они обладают, как правило, очень малой проницаемостью, хорошими сорбционными характеристиками и незначительной растворимостью. К числу возможных недостатков относятся: дегидратация водосодержащих глинистых минералов в связи с тепловой нагрузкой, малая теплопроводность и неблагоприятное влияние на механические свойства пород, присутствие органического вещества и газов, наличие неоднородностей и возможные трудности с разработкой и открытой выемкой породы.
- *Магматические и метаморфические породы.* Некоторые страны считают их первыми кандидатами для использования в качестве мест глубокого подземного захоронения радиоактивных отходов. Эти породы показывают долговременную стабильность, достаточно хорошую теплопроводность и малую пористость. Дополнительным преимуществом для неко-

торых стран является наличие у них массивных и однородных формаций, не представляющих никакой или имеющих незначительную экономическую ценность. Эти породы хрупки и неэластичны, не исключается вероятность появления разломов и вторичных отверстий на глубинах, в которых предполагаются хранилища. Из-за разломов и трещин, как правило, во вторичных отверстиях содержатся грунтовые воды. Наличие неоднородностей в этих породах (связанных с характером, ориентацией и величиной разломов) затрудняет моделирование гидрогеологии таких пород.

Особый интерес представляют такие магматические породы как базальт и вулканический туф. Базальт появляется обычно в крупных платообразных массах, сравнительно молодых по возрасту и аккумулирующихся в континентальных районах. Он имеет среднюю теплопроводность и очень высокую температуру плавления, очень большую механическую прочность, но в нем обычно наблюдаются ломаные или вертикальные трещины. В массиве базальт совершенно непроницаем, но с разломами и трещинами он пропускает значительные количества подземных вод. Он обладает низкой ионнообменной способностью, если она частично не изменена присутствием вторичных минералов с лучшими сорбционными свойствами.

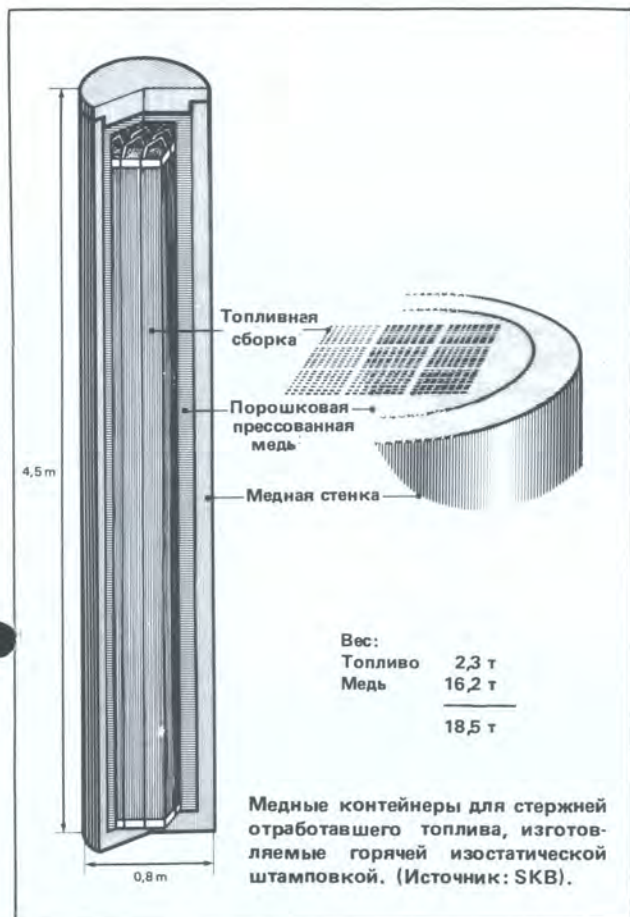
Изучаются два вида туфа, известных как сплавленный и цеолитовый. Многие месторождения туфа содержат высокосорбционные минералы (глины и цеолиты) как в основной массе породы, так и вдоль первичных и вторичных разломов. Из-за высокой пористости в туфах содержатся обычно значительные количества воды.

Оценка долговременной безопасности

При выборе геологического хранилища необходимо учитывать возможные термомеханические эффекты: выброс жидкости и поток жидкости, буферные и засыпные материалы, геохимические эффекты и тепловая нагрузка.

Выгодно более длительное временное хранение отработавшего топлива, поскольку оно способствует понижению температуры в хранилище. Увеличение температуры влияет на механические свойства пород. Долговременное воздействие температурных изменений требует изучения, особенно в породах с высокими природными напряжениями. Механические эффекты связаны с изменениями в минералогическом составе и содержании воды, что требует исследований проблем образования глины и глинистого сланца. Эти эффекты должны быть изучены для различных видов образований, поскольку предполагается, что повышенные температуры вызывают изменения в режиме потока вблизи хранилища в результате освобождения ранее связанных вод. Для выбора буферных и засыпных материалов следует тщательно изучить воздействие на них температуры.

Радиация в результате распада радионуклидов может вызвать различные эффекты, значение кото-



рых в очень большой степени зависит от конкретных положений концепции захоронения отходов. Например, очень прочные металлические контейнеры с толстыми стенками будут удерживать всю возникающую внутри них радиацию. Влиянием гамма-излучения, имеющегося вне контейнеров, можно пренебречь. Зато гамма-поля вне контейнеров с тонкими стенками могут оказаться значительными, и должно быть определено их влияние. Следует заметить, что временное (до захоронения) хранение существенно снизит уровень гамма-полей и степень образования тепла.

Замедление движения радионуклидов, что в определенной степени зависит от основной породы, происходит в связи с различиями в физико-химическом поведении радионуклидов и грунтовых вод. Основными физико-химическими процессами при этом являются: химическое растворение, диффузия, ионный обмен, сорбция, химические реакции замещения и сверхтонкая фильтрация. Эти процессы зависят от распространения и характера химических веществ в растворе. Наиболее важными физико-химическими параметрами являются pH, потенциал окисления-восстановления, температура раствора и концентрация других природных веществ. Должно быть определено содержание в грунтовой воде сульфатов, хлоридов, железно-корродирующих веществ, комплексобразующих агентов.

Соображения по площадке

Хранилище может быть построено только на площадке, где имеется достаточно крупная формация породы, обладающей соответствующими геологическими, гидрологическими качествами. Обычно хранилище, располагаемое на глубине 400–500 м, отвечает требованиям безопасности, хотя технологически достижимы и глубины до 1000 м.

Современный уровень знаний позволяет разработать и построить в течение двух-трех последующих десятилетий систему безопасного окончательного захоронения отработавшего ядерного топлива.

Имеются альтернативные конструкции, учитывающие тепловую нагрузку и строительные возможности. Концептуальные конструкции хранилищ, создаваемых в твердом граните, базальте и глиняных формациях, разработаны странами, имеющими такие формации. Исследования охватывают не только технические аспекты, но и проблемы упаковки (с точки зрения материалов и техники), выбор буферных и барьерных материалов, а также оценку рабочих характеристик и безопасности. Продолжение широких исследований и разработок позволит странам получить больше данных для создания конструкции хранилищ для окончательного захоронения.

Упаковка отработавшего топлива

Упаковка отработавшего топлива должна рассматриваться в контексте всей системы захоронения. Ее функции определяются временем хранения, соображениями транспортирования и размещения, длительностью процесса упаковывания. Технически возможно применение различных методов капсулирования отработавшего топлива. В Швеции рассматривается возможность использования расплавленного свинца или обрабатываемой горячим прессованием порошка меди для включения топливных стержней в твердую матрицу, помещаемую затем в медный контейнер. После помещения в скважины контейнеры засыпаются буферными материалами, такими как высококомпактные бентонитовые глины. Хранилище герметизируется путем заполнения всех туннелей и шахтных стволов смесью песка и бентонитовой глины.

Закладка и герметизация хранилища важны с точки зрения требований безопасности при строительстве, задачами которого является заполнение скважин, туннелей и шахтных стволов, сведение к минимуму или предотвращение проникновения воды, поддержка пород и сведение к минимуму оседания, обеспечение химической и физической защиты упаковок отходов, содействие рассеиванию тепла и обеспечение замедления перемещения радионуклидов путем уменьшения движения воды. Закладными материалами могут быть отвалы, цементы, битумы, эпоксидные цементные растворы и полиэтилен.

После завершения работ в хранилище, содержащим отработавшее топливо, не предусматривается

более никакого наблюдения, дозиметрического контроля площадки или институциональных проверок. Однако решение вопросов маркировки района площадки, физического или иного контроля остается на усмотрение национальных органов. В связи с особыми условиями некоторые конструкции строятся в расчете на извлечение захороненных материалов.

На основе анализа данных по горным работам на площадке, конструкции хранилища, его эксплуатации и снятию с эксплуатации определяется стоимость захоронения отработавшего топлива в зависимости от особенностей конструкции и ее оптимизации. Для подземного захоронения эта стоимость составит примерно 1–3 % расходов на производство электроэнергии. При современном уровне знаний должен быть сделан следующий шаг — создание полупромышленных демонстрационных хранилищ для получения более реальных данных и определения затрат на развитие промышленных хранилищ.

Предмет для обсуждения

Безусловно, отработавшее топливо потенциально опасно для человечества, и необходимы действенные меры по его изоляции от среды обитания человека. Сегодня это — одна из наиболее важных и неотложных проблем.

С другой стороны, отработавшее топливо — уникальный источник некоторых жизненно важных элементов, мировые ресурсы которых очень ограничены. Например, запасы родия, широко используемого в химической, электротехнической и медицинской областях, составляют лишь около 770 т при очень незначительной концентрации его в земной коре. А концентрация родия в отработавшем топливе намного выше (340 г. на 1 т по сравнению с $1 \cdot 10^{-3}$ г

на 1 т в земле). Поскольку, как предполагается, к 2050 г. во всем мире будет 600 000 т отработавшего топлива, то совершенно очевидно, что оно может стать в следующем столетии единственным источником „новых искусственных” запасов родия (а также палладия и рутения).

Определение терминов

Что отличает долговременное хранение от захоронения? МАГАТЭ определяет первое как „хранение топливных единиц в течение продолжительного периода, причем требуется специальная упаковка и/или оборудование. Период хранения заканчивается, когда топливные единицы перерабатываются или захороняются”*. В этом случае должны предусматриваться меры по изоляции, радиационному мониторингу, защите окружающей среды и контролю человеком. Предполагаются также меры по обработке и транспортированию с целью окончательного захоронения или переработки топлива.

Захоронение отработавшего топлива определяется как „помещение топливных единиц в хранилище, способное обеспечить соответствующую защиту окружающей среды, без намерения извлечь топливные единицы”.

Эти определения важны для национальной и международной стратегии в области обращения с отходами. Период долговременного хранения отработавшего топлива в 50 или более лет принят в настоящее время во многих государствах-членах. Первые демонстрации окончательного захоронения ожидаются в начале следующего столетия.

* См. *Spent-Fuel Storage Glossary (Глоссарий по хранению отработавшего топлива)*, TECDOC-354 (1985).