Национальные сообщения

Политика и практика обращения с радиоактивными отходами в Индии

Технический обзор программ и планов

Н.С. Сундер Раджан

Ядерная программа Индии опирается на полностью независимый ядерный топливный цикл, базирующийся на местных ресурсах. С самого начала программы было необходимо предпринять меры для оценки потенциального ущерба от радиоактивных отходов, образующихся на различных этапах топливного цикла, начиная от добычи и переработки руды и изготовления топлива, до эксплуатации реактора и переработки отработавшего топлива. Особое значение придавалось накоплению знаний о влиянии попадающих в окружающую среду радиоактивных отходов и методах и средствах их эффективной изоляции и удержания. Накопленный в течение десятилетий практический опыт показал безопасность применяемых методов.

Однако все еще существует стремление использовать новые технологические методы для дальнейшего ограничения утечки радиации. Более чем 10-летние фундаментальные исследования и разработки в различных областях ядерной науки и техники предшествовали развитию ядерной энергетической программы Индии, при этом значительные усилия были направлены на формулирование национальной политики в области обращения с радиоактивными отходами.

Политика и цели

Проблема обращения с радиоактивными отходами связана с необходимостью сделать простой выбор: осуществлять контроль над отходами или освободить их из-под контроля. Но как хорошо известно, этот простой выбор сделать очень трудно, так как любое решение имеет далеко идущие последствия экономического, социального или иного характера.

В принципе, программа Индии рассматривает два различных варианта окончательного захоронения радиоактивных отходов: обширные инженерные приповерхностные хранилища для низко- и среднеактивных отходов (НСАО) и глубокие геологические хранилища для альфа-содержащих и высокоактивных отходов (ВАО). Изучаются другие варианты, как например, подземное хранение среднеактивных отходов на умеренных глубинах, но современная стратегия не включает такие методы захоронения.

Бóльшая часть будущей программы Индии направлена на обращение с ВАО и альфа-содержащими отходами. Одна из проблем, требующая особого внимания, касается разработки матриц с улучшенными свойствами для включения ВАО, особенно с целью увеличения долговременной стабильности отвержденных отходов при старении и действии радиации. Другой аспект связан с разработкой технически и экономически эффективных процессов для обращения с альфа-излучающими радионуклидами, содержащимися в ВАО. Эта работа приобретет особое значение в ближайшем будущем, когда будет развернута программа Индии по быстрым реакторам.

Дальнейшие усилия будут также направлены на демонстрацию степени безопасности метода глубокого геологического захоронения остеклованных

Облицованные нержавеющей сталью ячейки в хранилище твердых отходов в Тарапуре (Фото Bhabha ARC)

Г-н Раджан – руководитель отдела по обращению с радиоактивными отходами, Атомный исследовательский центр имени Бхабха в Тромбее, Индия.

ВАО с получением при этом полевых экспериментальных данных. Что касается НСАО, был накоплен положительный опыт и ожидается, что вскоре начинающие действовать схемы обращения с ВАО будут очередным шагом на пути к выполнению целей Индии.

Политика обращения с отходами

Основными элементами политики Индии в области обращения с радиоактивными отходами являются:

- Любой сброс радиоактивных жидких или газообразных отходов в окружающую среду должен быть таким низким, насколько это практически возможно при разумном учете экономических и социальных факторов (принцип радиационной защиты ALARA).

- Кондиционированные первичные твердые отходы и вторичные отходы, образующиеся при кондиционировании жидких отходов от реакторов и исследовательских лабораторий, должны храниться в приповерхностных хранилищах, специально сконструированных для этой цели. В таких хранилищах разрешается также захоранивать кондиционированные НСАО, возникающие на установках по переработке топлива и слегка загрязненные альфа-излучателями.
- Жидкие ВАО от регенерационных заводов перед кондиционированием хранятся в течение некоторого периода времени в подземных высокопрочных емкостях — баках, изготовленных из нержавеющей стали. Эти отходы будут остеклованы и помещены для временного хранения в приповерхностные инженерные сооружения, при этом будут обеспечены теплоотвод и сохранение форм отвержденных отходов до их транспортирования и помещения в централизованное хранилище.
- Кондиционированные ВАО и альфа-содержащие отходы должны захораниваться в подходящих глубоких геологических формациях в централизованном хранилище.

Отходы от добычи и переработки руды

Индийская руда, которая обычно содержит около 0,1 % окиси урана, добывается с помощью обычных методов. Для защиты против чрезмерной радиации используются водные методы добычи и соответствующая вентиляция. „Бедный раствор", образующийся в результате операций по извлечению урана, обрабатывается известью и баритами с целью осаждения радия и других дочерних продуктов урана. Раствор совместно с хвостами обогатительных фабрик захоранивается в бассейне-отстойнике, представляющем естественную впадину для обеспечения отстаивания. Вытекающие из бассейна потоки контролируются с тем, чтобы концентрация в них примесей радия и других нуклидов как, например, марганца, была меньше допустимой.

НСАО от эксплуатации реакторов и переработки топлива

При эксплуатации реакторов главную проблему с точки зрения обращения с радиоактивными отходами представляет теплоноситель, загрязненный продуктами деления, активации и коррозии. Наиболее важными радионуклидами в теплоносителе являются продукты деления: цезий-137, стронций-90 и йод-131, а также продукты коррозии и активации: кобальт, железо, никель и хром.

Низкоактивные жидкие отходы обрабатываются с помощью химических методов, ионного обмена и упаривания. Обычно отходы подвергаются предварительной химической обработке для установления требуемого значения pH. После этого через смеситель добавляются такие химические соединения, как фосфаты, феррорцианиды и другие растворы, содержащие ионы железа. Затем проводят разделение твердой и жидкой фаз путем осаждения. При этом значения коэффициентов очистки доходят до 200.

Альтернативным методом является применение ионного обмена для улавливания специфических радионуклидов из основной массы отходов. Ионообменные материалы естественного происхождения (вермикулит, бентонит) широко применяются как в качестве нерегенерируемых ионно-обменников в колоннах, так и в операциях in-situ. Для очистки используются и синтетические ионно-обменные материалы благодаря их способности к регенерации и высоким ионно-обменным свойствам.

Потоки жидких среднеактивных отходов от перерабатывающих заводов могут состоять, например, из концентратов упаривания растворов от очистки растворителя и шламов от химической очистки воды.

Выпарные аппараты с паровым нагревом используются для одноступенчатого концентрирования отходов, имеющих относительно высокую радиоактивность. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией и совмещенные со специально встроенными дистанционными компонентами обеспечивают очень высокие коэффициенты сокращения объема. Были достигнуты коэффициенты очистки порядка 10^6.

Следуя продолжающейся тенденции по ограничению выбросов радиоактивности в окружающую среду до минимально возможных уровней, на АЭС в Раджастане получили очень высокие коэффициенты сокращения объема (с практически нулевой утечкой радиоактивности) в выпарном аппарате с некипящим раствором, работающим на солнечной энергии. Эта местность обладает благоприятными климатическими условиями — такими как высокая температура воздуха, низкая влажность и сильные ветры — необходимыми для этого типа установок.

Иммобилизация отходов

Критериями для кондиционирования концентратов радиоактивных отходов обычно являются сте-

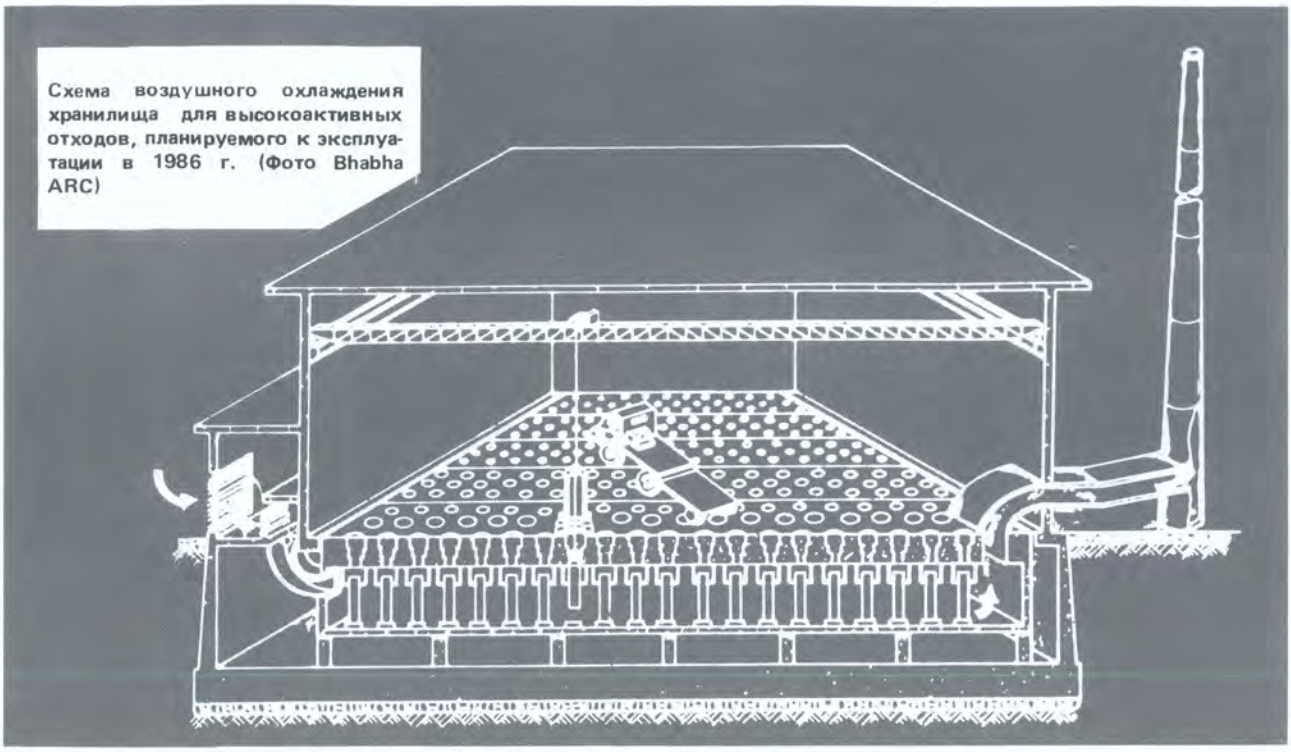

Схема воздушного охлаждения хранилища для высокоактивных отходов, планируемого к эксплуатации в 1986 г. (Фото Bhabha ARC)

пень радиоактивности отходов, совместимость отходов со средой, в которую они должны быть включены, и экологические условия хранилищ для хранения или захоронения кондиционированных отходов. Для иммобилизации концентратов НСАО используются различные матрицы – цемент, битум и сложные полимеры.

• *Цемент.* Благодаря низкой стоимости и простоте технологии цемент и цементные составы отвечают критериям пригодности в качестве матрицы для иммобилизации относительно низкоактивных концентратов. Однако их высокая пористость требует применения специальных добавок, эффективно действующих в качестве активных заполнителей пор для улучшения химической стойкости.

• *Битум.* Битум был выбран для включения в него среднеактивных отходов благодаря его способности вбирать в себя водные потоки с высоким процентным содержанием растворенных и взвешенных твердых веществ, его пригодности для организации полунепрерывного процесса, и возможности дистанционного обращения. Учитывая свойства местного битума, в него можно включить до 50 % солей. Ожидается, что радиолиз продукта в этом диапазоне солей и уровне радиоактивности будет пренебрежимо малым в течение длительного хранения.

Установка битумирования в Тарапуре имеет проектную мощность 120 л/ч для среднеактивных отходов. На установке были применены специальные тонкопленочные испарители, нагреваемые с помощью циркулирующей горячей жидкости для достижения необходимого испарения и смешивания. Образующийся жидкий продукт стекает вблизи дна выпарного аппарата в стальные баки специальной конструкции. Процесс полунепрерывный, в год образуется около 1000 баков битумированных отходов. Эти баки с отходами хранятся под землей в специальных ячейках, облицованных изнутри сталью.

• *Полимерные матрицы.* Полимерные матрицы (импрегнированный барьер) применяются для иммобилизации отходов, выделяющих мало тепловой энергии и возникающих в результате регенерации специального топлива. В таких композициях используется вермикулит в качестве барьера для удержания специфических радионуклидов. Затем отходы включаются в ненасыщенные полиэфирстиреновые смолы с каталитическим отвердителем при комнатной температуре, при этом образуется монолитный продукт с хорошей гомогенностью и химической стойкостью. Содержание отходов до 50 % объема. К настоящему времени около 250 000 л таких отходов с общей радиоактивностью около миллиона кюри были успешно включены в такие полимерные матрицы.

Высокоактивные отходы

Жидкие высокоактивные отходы в настоящее время хранятся в высокопрочных баках из нержавеющей стали. Эти баки помещаются в подземные полости, также облицованные нержавеющей сталью для создания дополнительной физической и биологической защиты. Составлена трехэтапная программа для обращения с этими отходами: (1) иммобилизация окислов отходов в твердую матрицу, (2) хранение отвержденных отходов в инженерных хранилищах не менее 25 лет, (3) захоронение отвержденных отходов.

По техническим и экономическим соображениям планировалось обеспечить временное хранение жидких отходов от 3 до 5 лет при заводах по переработке топлива.

Стеклоподобные и другие керамические матрицы удовлетворяют критериям пригодности для включения ВАО. Преимуществами боросиликатного стекла в качестве матрицы являются низкая выщелачивае-

мость, высокая радиационная и термическая стойкость, высокая механическая прочность и относительная простота в обращении и при транспортировании.

Установка WIP в Тарапуре

В Тарапуре действует первая индийская установка по иммобилизации ВАО (WIP), созданная на основе уже разработанных плавких матриц и процессов. WIP использует боросиликатную матрицу для включения окислов отходов и основана на полунепрерывном процессе, состоящем из кальцинации с последующим тигельным плавлением. Затем остеклованный продукт заливается в контейнер для хранения. Оборудование сконструировано и размещено таким образом, чтобы обеспечить разделение активности с целью проведения удобного и, по возможности, минимального технического обслуживания.

Недавно был одобрен проект по сооружению установки для иммобилизации отходов в Тромбее. Хотя основной процесс на ней сходен с тем, который применяется в Тарапуре, конструкция оборудования, в том числе тигля, была подвергнута значительным изменениям. Планируется начать эксплуатацию установки к 1990 г. Другая установка в Калпаккаме находится на стадии планирования. Начало эксплуатации намечено на 1993 г. Ожидается, что она будет иметь встроенный блок для обращения с будущими отходами от переработки топлива быстрого экспериментального реактора.

Временное хранение ВАО

Необходимость во временном инженерном хранилище для кондиционированных ВАО, находящемся под постоянным наблюдением, общепризнана. Из различных вариантов охлаждения был выбран воздушный (естественная вытяжная вентиляция) для хранилища твердых отходов с наблюдением (SSSF) в Тарапуре. Это хранилище, которое может начать действовать в 1986 г., будет обслуживать установку в Тромбее и WIP по хранению кондиционированных отходов в течение 25 лет и более при обеспечении наблюдения, охлаждения и управления.

Основная цель создания SSSF – обеспечить целостность отходов и контейнеров на все время хранения, обеспечить хранение в условиях непрерывного охлаждения для отвода тепла от ядерного распада и возможность извлечения канистр с отходами при всех условиях. Система охлаждения использует выделяемое тепло и соответствующим образом сконструированную трубу для создания движущей силы для перемещения воздуха внутри хранилища. Система охлаждения – саморегулируемая и может компенсировать изменения в тепловой нагрузке и погодных условиях.

Захоронение: отходы, содержащие короткоживущие нуклиды

Подземная изоляция радиоактивных отходов представляет собой в настоящее время наиболее надежный вариант захоронения. Упакованные и кондиционированные отходы, содержащие короткоживущие нуклиды, помещаются в хранилища, расположенные неглубоко под землей. С учетом выполнения главной цели экологической и эксплуатационной безопасности, опыт Индии свидетельствует о практической неизбежности принятия и одобрения подходов к общей системе, состоящей из выбора конструкции, места расположения и эксплуатации этих приповерхностных хранилищ.

В основном модули, применяемые для хранилищ отходов в Индии, – это армированные цементные или бетонные траншеи, а также бетонные ячейки, облицованные сталью. В связи с различными гидрогеологическими условиями мест расположения приповерхностных площадок необходимо изучать специфические особенности, которые будут влиять на разработку проекта хранилища на каждой площадке.

После многих лет практической деятельности концепция выбора конструкции и разработки приповерхностных хранилищ подверглась тщательной оценке. Некоторые основные особенности, отличающие современный подход Индии от того, который был на более раннем этапе: установление надежной буферной зоны между эксплуатационными частями хранилища и его внешними границами; отчетливое разграничение, даже на стадии проектирования, административных помещений и вспомогательных установок от эксплуатационных частей хранилища; обеспечение хранилищ установками для возможного разделения отходов и, когда необходимо, переупаковки или дополнительной их упаковки; обеспечение оборудованием для дезактивации. Оборудование для послеэксплуатационного управления и других видов контроля должно быть установлено для сохранения целостности хранилищ и обычного наблюдения.

Захоронение: отходы, содержащие долгоживущие нуклиды

Наличие трансурановых элементов в ВАО и альфа-содержащих отходах может создавать угрозу в течение длительного времени. Хотя было рассмотрено множество инженерных концепций, представляющих большой набор вариантов, наиболее широкое распространение во многих странах получил вариант захоронения в глубоких геологических формациях. В Индии выбор формации ограничивается вулканическими горными породами и некоторыми осадочными месторождениями. Некоторые геологические формации, особенно на южном полуостровном щите, скорее всего могут быть приемлемы для размещения хранилищ для долговременного хранения и даже для захоронения ВАО.

В рамках программы Индии недавно было проведено исследование потенциальных площадок для хранилищ в гомогенных и массивных гнейсовых и гранитных формациях полуострова. В этой связи была создана экспериментальная исследовательская станция в неиспользуемой части подземной шахты,

находящейся в Коларе около Бангалора. Были проведены исследования по изучению пригодности местных формаций для окончательного захоронения. Эксперименты in-situ проводились для исследования термического, механического, гидрогеологического и химического поведения коренных пород в условиях моделирования захоронения.

Анализ безопасности

Должны быть определены вид, количество и свойства отходов, предназначенных для захоронения, с учетом критериев относительно приемлемых доз радиации, защитных барьеров хранилищ и инженерных факторов. Должно быть прогнозировано поведение этих хранилищ в будущем. Оценки включают характеристики коренных пород, гидрогеологические условия, взаимодействие между породами и отходами. Анализ безопасности для приповерхностных хранилищ включает прогнозирование распределения во времени и пространстве радионуклидов, освобожденных вследствие аварийного выброса.

Оценка количества отходов, образующихся в Индии

Первичные твердые отходы и концентраты низкоактивных отходов будут составлять, по оценке, основную массу образующихся в Индии отходов вплоть до 2000 г. при прогнозируемой электрической мощности 10 000 МВт. В эти отходы входят: загрязненное технологическое оборудование, защитная одежда, использованные фильтры, концентрированные осадки и шламы от установок по переработке жидких низкоактивных отходов. Объем образующихся средне- и высокоактивных отходов не велик, однако эти отходы содержат основную радиоактивность.

	1985 г.	2000 г.
Установленная мощность (МВт (эл)	1350	10 000
Первичные твердые отходы* ($м^3$)	1850	107 000
Концентраты низкоактивных отходов ($м^3$)	3000	77 100
Среднеактивные отходы ($м^3$)	800	19 900
Высокоактивные отходы ($м^3$)	450	8 000

* До 10^4 рентген/ч.