

Обращение с радиоактивными отходами в некоторых европейских странах

В. А. Морозов

ВВЕДЕНИЕ

Осенью 1978 года МАГАТЭ организовало в рамках технической помощи развивающимся странам Научно-ознакомительную поездку по радиационной защите и обращению с отходами. Эта поездка была организована в сотрудничестве с правительствами Франции, Федеративной Республики Германии, Венгерской Народной Республики, Чехословацкой Социалистической Республики и Германской Демократической Республики и проходила по названным странам. Предполагаемый обзор включает в себя только один аспект — обращение с радиоактивными отходами и написан на основе лекций, прочитанных участникам поездки в разных странах, и научных визитов в научно-исследовательские центры и на атомные электростанции.

РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

Развитие ядерной энергетики неизбежно связано с решением двух кардинальных вопросов: безопасностью ядерных предприятий и обращением с радиоактивными отходами. Не касаясь первого вопроса, который целиком связан с решением инженерных проблем, с проблемами общественного порядка в отдельно взятой стране, с проблемами обеспечения мира на Земле, остановимся на втором вопросе.

К радиоактивным отходам могут относиться естественные радиоактивные элементы, которые выделяются в результате переработки, например, урановых руд, или искусственные радиоактивные элементы, которые получаются в результате работы ядерных установок: атомных электростанций, исследовательских реакторов, ускорителей.

Исключение нежелательных последствий воздействия радиоактивности на население и на экологическую среду в целом требует определенных мер по изоляции радиоактивных отходов от биосферы.

Каким образом это достигается?

В практике обращения с радиоактивными отходами существует два подхода. Первый заключается в сборе, обработке, упаковке, хранении или захоронении отходов. А второй состоит в проведении контролируемого выброса низкоактивных отходов в окружающую среду. Так как радиоактивные отходы могут находиться в жидком, твердом или газообразном состоянии, то естественно, что к ним применяются разные методы обработки. Кроме физико-химического состояния, отходы характеризуются еще активностью и радиотоксичностью. Эти параметры определяют условия,

Г-н Морозов является сотрудником секции обращения с отходами, Отдел ядерной безопасности и защиты окружающей среды, МАГАТЭ.

при которых можно производить переработку и перевозку отходов (мощность защиты и т.д.) и степень изоляции от окружающей среды.

По уровню активности отходы принято условно делить на отходы низкого, среднего и высокого уровня активности. Причем под высокоактивными отходами понимаются отходы, получающиеся после переработки отработавшего ядерного горючего. Характерной чертой этих отходов является высокая удельная активность и значительное тепловыделение.

После соответствующей обработки и упаковки радиоактивные отходы помещаются в хранилища, откуда их можно извлечь в случае необходимости для повторной обработки, или в могильники, где извлекаемость отходов для повторной обработки не обеспечивается. Причем такой вид хранения не может, конечно, гарантировать абсолютную изоляцию отходов от биосферы, а может дать только гарантию того, что в случае наиболее неблагоприятных событий распространение отходов из места хранения или захоронения будет иметь незначительный радиобиологический эффект, составляющий обычно незначительную долю от эффекта, связанного с естественной радиоактивностью Земли.

В этом смысле сложившаяся практика выброса низкоактивных, газообразных или жидких радиоактивных отходов, образующихся при работе ядерных предприятий, в атмосферу или в водную среду (реки, озера, моря), связана именно с этим обстоятельством.

ФРАНЦИЯ

Во Франции ведутся научные исследования физики атомного ядра, начиная фактически с открытия в 1896 году Беккерелем явления радиоактивности и последовавшего затем открытия радиоактивных элементов и искусственной радиоактивности в пионерских исследованиях Пьера Кюри и Марии Склодовской-Кюри, Ирены и Фредерика Жолио Кюри. Энергетическая ядерная программа Франции характерна своей многоплановостью и последовательностью в ее осуществлении. Большое число АЭС с легководными реакторами с установленной мощностью около 40 000 МВт (эл) намечено ввести к 1985 году. Если учесть то, что во Франции осуществляется строительство быстрых реакторов и переработка ядерного горючего, то видно, что проблема обращения с радиоактивными отходами во Франции носит очень широкий спектр — от низкоактивных до высокоактивных отходов. Цели, которые при этом ставятся, заключаются в обеспечении безопасности населения, обеспечении возможности использования в дальнейшем других природных ресурсов, а также уменьшении потенциального воздействия радиоактивных отходов на жизнь последующих поколений.

Основными источниками отходов во Франции являются атомные электростанции и заводы по переработке ядерного горючего. На примере современной атомной электростанции Fessenheim, имеющей установленную мощность 900 МВт (эл), в которой используется реактор с водой под давлением — основной тип реактора для будущих АЭС во Франции, можно ожидать, что в течение года станция такого типа будет производить после обработки и упаковки около 500 кубометров отходов низкого и среднего уровня активности. Обработка этих отходов ведется методом цементирования для жидких отходов и методом прессования для твердых отходов. В перспективе рассматривается возможность использования процессов битумирования и включения отходов в матрицу из термостойких пластмасс. После обработки отвержденные отходы транспортируются на централизованное хранилище, которое расположено вблизи завода по переработке ядерного горючего в Ла Аг. Начи-

ная с 1969 года в этом хранилище захоронено около 70000 м³ отходов. Хранение отходов на площадке АЭС в течение продолжительного срока не разрешается.

Переработку ядерного горючего от реакторов с водой под давлением намечено начать в Ла Аг в 1980 году. Проектную мощность — 1600 тонн/год завод достигнет в 1987 году. Как известно, 1 тонна урана дает до 500 л высокоактивных жидких отходов (активность может достигать до 10 000 Ci/литр). Хранение таких отходов в жидком виде, хотя и практикуется в настоящее время, но требует больших капитальных вложений на строительство баков и тщательного контроля во время хранения. Поэтому во Франции проблеме отверждения жидких высокоактивных отходов в свое время (около 20 лет назад) было уделено очень большое внимание. Из всех возможных способов отверждения жидких высокоактивных отходов наиболее развит в настоящее время метод остекловывания. Основные преимущества этого метода заключаются в следующем: возможность получения отвержденного продукта с низкой выщелачиваемостью при значительном уменьшении объема отходов и возможность осуществления индустриального процесса — процесса с большой производительностью. Поэтому во Франции после обработки процесса остекловывания на основе боросиликатного стекла на установке River был построен завод AVM в Маркуле по остекловыванию высокоактивных отходов. Завод был закончен в феврале 1977 года и после испытания на неактивных растворах в июне 1978 года была начата работа с радиоактивными растворами. В установке остекловывания используется непрерывный процесс кальцинации жидких отходов и последующего плавления кальцината и стеклообразующих добавок. Максимальная продуктивность установки — 18 кг стекла в час при подаче 40 литров раствора в час. Жидкое стекло заливается в металлические контейнеры диаметром 50 см и длиной 1 м.

Хранение этих контейнеров осуществляется на том же заводе в специальных хранилищах с принудительным воздушным охлаждением.

Завод AVM был спроектирован с таким расчетом, чтобы перерабатывать все производственные отходы ядерного центра в Маркуле, включая отходы, накопленные ранее.

На очереди стоит проект сооружения завода по остекловыванию отходов в Ла Аг — AVH, предназначенного для остекловывания отходов, которые будут получаться при переработке горючего от легководных реакторов. Остеклованные отходы от этого топлива будут выделять значительно больше тепла за счет большего выгорания топлива и потребуют предварительного охлаждения в водных бассейнах в течение 4 лет до того момента, когда можно будет перейти на воздушное охлаждение. Поскольку еще не принято решения о методе окончательного захоронения высокоактивных отходов, то предусмотрена извлекаемость отходов из хранилищ с целью их дальнейшей транспортировки в могильник.

Наиболее перспективным считается захоронение высокоактивных отходов в стабильные геологические формации и в частности в гранитные породы, что в условиях Франции является наиболее приемлемым решением. Но изучение такой возможности находится пока еще в начальной стадии, так как считается, что настоятельная потребность в использовании геологических формаций возникнет только в 1985-1990 годах по мере развития ядерной энергетики.

ФЕДЕРАТИВНАЯ РЕСПУБЛИКА ГЕРМАНИИ

Также как и во Франции в Федеративной Республике Германии (ФРГ) ведутся широкие исследования в рамках всего ядерного топливного цикла, начиная от обогащения урана и переработки ядерного горючего и кончая вопросами окончательного

захоронения отходов в глубинные геологические формации. Характерной особенностью программы ФРГ является разработка концепции ториевого топливного цикла и практическое осуществление захоронения отходов в геологические формации.

До последнего времени в ФРГ исходили из идеи использования одной площадки для централизованного захоронения отходов от АЭС, от исследовательских ядерных центров и отходов от применения радиоактивных изотопов в промышленности, медицине и т.д. В качестве такого могильника использовались старые соляные копи в Ассе. Однако осенью 1978 года они были закрыты в связи с окончанием срока лицензии. Прием отходов намечено начать только после получения новой лицензии.

Основные требования, которые существовали до последнего времени по отношению к захораниваемым отходам, заключались в следующем:

- отходы должны быть гомогенно отверждены посредством материала с малой выщелачиваемостью,
- упаковочные контейнеры для транспортировки отходов должны ограничивать мощность дозы не более 200 мРем/час на поверхности контейнера и 10 мРем/час на расстоянии 1 м,
- максимально допустимая активность не должна превышать 25 Ci для упаковочного контейнера, включающего зацементированные отходы.

После закрытия соляных копей в Ассе встала задача организации временного хранения отходов на площадках АЭС. Причем этот срок может оказаться довольно большим — в пределах нескольких лет.

Жидкие радиоактивные отходы составляют большую часть отходов, образующихся на АЭС, так как в ФРГ используют реакторы двух типов: с водой под давлением и кипящие. К ним применяются следующие методы обработки:

- механическая фильтрация,
- выпарка и
- ионный обмен.

Твердые радиоактивные отходы запрессовываются в 200 л железные бочки-контейнеры.

Из методов отверждения отходов на АЭС фактически применяется только один — цементирование отходов. Применение других методов на площадках АЭС, таких как битумирование и отверждение при помощи пластмасс — находятся еще в стадии разработки. Их внедрение сдерживается в основном следующими факторами: пожароопасностью процесса битумирования и сравнительно высокой стоимостью пластмасс.

В ФРГ в практике обработки радиоактивных отходов от АЭС наблюдается интересная тенденция. Отсутствие окончательно принятых правил по захоронению отходов и свойствам обработанных отходов, отправляемых на захоронение, не способствует развитию на площадках АЭС стационарных систем для окончательной обработки отходов вследствие высоких капитальных затрат. Поэтому стали интенсивно развиваться мобильные системы для отверждения отходов, которые можно транспортировать от одной АЭС к другой. В этих системах для отверждения отходов в основном используется процесс цементирования и только в одной установке используются пластмассы для отверждения отходов средней активности таких как, например, ионно-обменные смолы.

В ФРГ существуют планы строительства мощного завода по переработке ядерного горючего с мощностью 1400 тонн топлива в год. Завод намечено построить в Горлебене, где существуют благоприятные возможности по захоронению отходов — глу-

бинные соляные формации. Для отверждения высокоактивных отходов в ФРГ разрабатывается несколько процессов. Один из них был разработан в Карлсруэ для отверждения высокоактивных отходов от процесса Purex. В установке применен распылительный кальцинатор с керамическим тиглем. Пилотная установка имеет довольно высокую производительность — 30 литров раствора в час. Исследование процесса остекловывания на неактивных растворах продолжается.

В другом ядерном центре в Юлихе разработан процесс FIPS, пригодный для остекловывания не только отходов от переработки легководного топлива, но также и топлива от высокотемпературных реакторов, содержащих торий. Были проведены испытания пилотной установки на активных растворах.

Эти две установки рассчитаны на получение боросиликатного стекла.

Третий процесс PAMELA рассчитан на получение гранул фосфатного стекла и включение их в металлическую матрицу. Процесс намечено применить для остекловывания высокоактивных отходов, находящихся на заводе по переработке ядерного топлива в Моле (Бельгия).

Как уже было сказано, в ФРГ принята концепция централизованного захоронения отходов. Успешное захоронение отходов в соляные копи Ассе в течение более чем десяти лет показывает перспективность такого решения. Другим возможным вариантом использования глубинных геологических формаций для захоронения отходов является использование железорудных выработок. В ФРГ ведутся исследования возможности использования таких формаций.

ЧЕХОСЛОВАЦКАЯ СОЦИАЛИСТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА

Чехословакия известна как страна, располагающая уранодобывающей промышленностью, ведущая широкие ядерные исследования в области фундаментальных и прикладных наук и осуществляющая обширную программу развития ядерной энергетики. В течение ближайших 30 лет в Чехословакии намечается сооружение ряда АЭС с установленной мощностью 45000-50000 МВт (эл.).

Радиоактивные отходы в Чехословакии можно разделить на две категории: отходы от предприятий ядерной энергетики и отходы от исследования радиоактивных изотопов в медицине, исследованиях и прочих отраслях народного хозяйства.

На решение проблемы обращения с отходами в Чехословакии оказывают влияние следующие факторы:

- Ограниченная емкость окружающей среды по дисперсии радиоактивных выбросов как следствие того, что Чехословакия — небольшая континентальная страна с неблагоприятными геологическими и гидрологическими условиями и с высокой плотностью населения;
- Отсутствие ненаселенных мест, пригодных для окончательного захоронения отходов;
- Предполагаемое использование всех водных ресурсов в качестве питьевой воды или в целях ирригации;
- Сильное общественное мнение против какого-либо загрязнения окружающей среды радиоактивностью.

Поэтому вся деятельность в стране по обращению с отходами регламентируется декретами Министерства здравоохранения и контролируется рядом инспекций: — Санитарной инспекцией, Инспекцией защиты атмосферы и Инспекцией водных ресурсов.

Отходы урановой промышленности обрабатываются в основном методами ионного обмена и соосаждения — с целью удаления урана и радия. Хвостовые отходы после переработки урановых руд покрываются слоем земли и озеленяются.

Жидкие радиоактивные отходы от АЭС А-1 мощностью 150 МВт (эл) и V-1 мощностью 440 МВт (эл) обрабатываются методом фильтрации, ионного обмена и выпарки. Существующая практика заключается во временном хранении концентратов, шлаков, кубовых остатков и отработанных ионно-обменных смол на площадках АЭС в баках.

Так, для АЭС V-1 предусмотрено использование 5 подземных баков емкостью 470 м^3 каждый для хранения жидких концентратов с солесодержанием до 400 г/л. Эти емкости должны обеспечить 5-7 лет бесперебойной работы станции. Отработанные ионно-обменные атомы предусмотрено хранить в течение 15 лет в двух баках емкостью 400 м^3 каждый.

Отверждение подобного рода отходов будет осуществляться или методом вакуумного цементирования или битумирования. Процесс вакуумного цементирования идет при комбинированном воздействии давления и вакуума на смесь цемента и отходов. Получающиеся блоки отличаются повышенной прочностью и пониженным содержанием воды. Выщелачивание отвержденных отходов не превышает $10^{-4} \text{ г/см}^2 \cdot \text{д}$.

При процессе битумирования намечено использовать тонко-пленочный выпарной аппарат, работающий при температуре 150°C , в который подаются жидкие отходы и битумная эмульсия. Широкие исследования свойств конечного продукта показали возможность включения в битум отходов с активностью до 10 Ci/кг .

Твердые отходы предполагается хранить в бетонном хранилище, а затем после сортировки и фрагментации подвергать прессованию в металлических бочках объемом 200 л. Сжигание сгораемых отходов предусматривается начать только впоследствии на местах строительства ядерно-энергетических центров на централизованных заводах по обработке отходов. Один из таких заводов будет создан в Ясловске Богунице (Jaslawske Bohunice).

Захоронение радиоактивных отходов от атомных электростанций намечено организовать в поверхностных слоях грунта (на глубине до 5 м) в бетонных водонепроницаемых камерах. Согласно планам в 1980 году начнется сооружение двух могильников — одного в Моравии, другого в Словакии.

Радиоактивные отходы от ядерных исследовательских центров, медицинских учреждений и промышленных предприятий захораниваются в выработанных известняковых шахтах вблизи Литомержице (Litoměřice). В случае необходимости отверждение этих отходов производится в Ядерном исследовательском институте в Ржеже (Rez). Кроме этого, в стране существует еще один могильник для захоронения отходов урановой промышленности в старых урановых шахтах в Яхимове (Jachymov).

ВЕНГЕРСКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА

В Венгрии приступили к осуществлению плана создания в стране ядерной энергетики. Кроме того, в стране широко ведутся работы по применению радиоактивных изотопов в медицине, индустрии и сельском хозяйстве. При разработке систем обработки, хранения и захоронения отходов в Венгрии исходят из предпосылки, что обрабатываемые отходы будут только низкого или среднего уровня активности.

Это связано с тем, что в программе развития ядерной энергетики отсутствуют планы переработки отработавшего ядерного горючего.

Сооружаемая в стране первая АЭС-PAKS будет введена в строй в начале 80 годов.

Возникающие в процессе работы АЭС жидкие и твердые радиоактивные отходы намечено временно хранить на площадке АЭС: концентраты, кубовые остатки и отработанные ионно-обменные смолы — в баках; твердые отходы — в соответствующих хранилищах. Считается, что запланированный объем хранилищ обеспечит работу станции в течение 5-10 лет. Решение относительно окончательной обработки и захоронения отходов от АЭС "PAKS" еще не принято. Среди альтернативных решений по отверждению жидких отходов рассматриваются: цементирование, битумирование, выпарка при использовании выпарного аппарата-кристаллизатора. Для твердых отходов предполагается применить прессование.

Представляет интерес процесс выпарки-кристаллизации. Процесс основан на использовании горячего воздуха для усиления испарения жидких отходов. Причем, температура жидкости не достигает температуры кипения, что позволяет получить больший фактор дезактивации конденсата за счет уменьшения переноса радиоактивности каплями раствора. При модельных испытаниях фактор дезактивации достигал величины $10^4 - 10^5$ для различных радиоактивных элементов. Бак, в котором происходит выпарка, служит одновременно и контейнером для захоронения отходов. Достигаемое при этом существенное уменьшение объема отходов позволяет заметно снизить расходы на транспортировку отходов.

Выбор площадки для окончательного захоронения отходов от АЭС еще не произведен.

В настоящее время в стране имеется одна централизованная станция для захоронения отходов, возникающих при использовании радиоактивных изотопов в народном хозяйстве. Она расположена в 50 км от Будапешта. На станции производится обработка жидких отходов, после которой получающиеся шламы и концентраты отверждаются методом цементирования в камерах хранилища. Камеры хранилища представляют собой бетонированные емкости, сооруженные в поверхностных слоях грунта глубиной до 6 метров. Кроме обработки и захоронения жидких отходов, на станции производится захоронение твердых отходов, жидких органических и биологических отходов, а также закрытых радиоактивных источников высокой активности.

ГЕРМАНСКАЯ ДЕМОКРАТИЧЕСКАЯ РЕСПУБЛИКА

В Германской Демократической Республике, так же как и в Чехословакии, планомерно осуществляется программа ядерного энергетического строительства. В настоящее время в стране действуют 4 АЭС с установленной мощностью 1390 МВт (эл.).

Контроль над ядерной безопасностью, в том числе и по вопросам обращения с радиоактивными отходами, осуществляет Совет по ядерной безопасности и радиационной защите — независимый правительственный орган.

В основе программы обращения с радиоактивными отходами лежит следующая концепция — обеспечение временного хранения отходов на месте их возникновения (научно-исследовательские ядерные центры и атомные электростанции) с их последующим захоронением в глубинные геологические формации (соляные формации).

Наряду с этим при Совете по ядерной безопасности и радиационной защите существует Служба по захоронению отходов, в функции которого входит транспортиров-

ка, обработка и захоронение низкоактивных отходов от ядерных исследовательских центров, медицинских и промышленных предприятий в старых шахтах.

В стране ведется программа исследований в области разработки и испытаний конструкций контейнеров для транспортировки радиоактивных отходов и материалов и в том числе отработавшего ядерного топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные примеры не исчерпывают всей проблемы обращения с радиоактивными отходами, но позволяют сделать некоторые выводы.

Обработка и хранение отходов низкого и среднего уровня активности не вызывает в настоящее время особых проблем. Это не означает, конечно, что технология обработки этих отходов не будет развиваться дальше, но это означает, что уже в настоящее время существуют такие методы обработки и захоронения отходов низкого и среднего уровня активности, которые обеспечивают безопасное использование энергии атомного ядра.

Атомные электростанции из основных производителей низко- и средне-активных отходов имеют в своем распоряжении установки, позволяющие производить обработку отходов с соблюдением соответствующих норм безопасности. До сих пор наибольшее применение находит метод цементирования отходов. В то же время продолжаются исследования возможности использования на площадках АЭС для обработки отходов таких процессов как битумирование, сжигание, выпарка-кристаллизация и т.д.

Следует ожидать, что методы обработки отходов, позволяющие существенно уменьшить их объем, будут находить все более широкое применение. Это относится как к странам, где практикуется длительное хранение отходов на площадках АЭС, так и к странам, где отходы транспортируются в централизованное хранилище.

Переработка отработавшего ядерного горючего неразрывно связана с проблемой обращения с высокоактивными отходами. Наиболее перспективным методом обработки высокоактивных отходов в настоящее время считается метод остекловывания. Окончательное удаление высокоактивных отходов, очевидно, будет состоять из двух фаз: вначале хранение остеклованных отходов в инженерных сооружениях, где будет обеспечено их охлаждение в течение необходимого времени, и затем передача этих отходов на окончательное захоронение, например, в глубинных геологических формациях. Уже сейчас мы располагаем данными о перспективности такого решения.

Эксперименты, проведенные в Лаборатории Чок Ривер (Канада), показали, что при хранении остеклованных отходов в грунте в течение 20 лет выщелачиваемость радиоактивных изотопов из стекла и скорость их миграции в грунте значительно ниже, чем ожидалось. Более впечатляющий эксперимент, проведенный Природой в Габоне — "Окло-феномен" — также показал, что радиоактивные элементы, которые образовывались при работе естественного реактора, остались практически все на месте их возникновения. Все это дает нам уверенность в том, что проблема обращения с высокоактивными отходами будет успешно решена.