



Усовершенствованный газоохлаждаемый реактор, Уиндскейл, Великобритания, снимается в настоящее время с эксплуатации. (Предоставлено: Управление по атомной энергии Великобритании.)

## Исследовательская программа Европейского сообщества: следующая фаза

*Демонтаж и обращение с радиоактивными отходами — главная проблема*

Б. Хубер

В 1979 г. Европейское сообщество начало свою первую пятилетнюю программу исследований проблемы снятия с эксплуатации атомных электростанций. Она выполнялась организациями и компаниями государств-членов по 51 исследовательскому контракту, большинство из которых финансировалось на паевых условиях\*. В 1984 г. началась вторая пятилетняя программа с более общим направлением — снятие с эксплуатации ядерных установок.

Основная задача второй программы была установлена Комиссией европейских сообществ при утверждении программы, когда было заявлено следующее: „Определенные элементы ядерных установок неизбежно становятся во время эксплуатации радиоактивными, поэтому важно найти эффективные решения, которые позволили бы обеспечить безопасность и защиту как человека, так и окружающей среды от потенциальной опасности, связанной со снятием с эксплуатации этих установок”.

Защита от этой потенциальной опасности означает отделение радиоактивности соответствующими барьерами от человека и окружающей его среды. Так как на ядерной установке уже существуют достаточные барьеры на пути распространения радиоактивности, хранение радиоактивных компонентов

Г-н Хубер является руководителем программы снятия с эксплуатации Комиссии европейских сообществ, Брюссель.

\* См. *Снятие с эксплуатации атомных электростанций*, труды Европейской конференции, проходившей в Люксембурге 22–24 мая 1984 г., изданные К.Х. Шаллером и Б. Хубером, EUR 9474, Грэхам энд Тротман Лимитед (1984).

in-situ является возможным способом изолирования радиоактивности на период, пока не распадутся доминирующие на первом этапе радионуклиды. Однако, в конце концов, оставшиеся радиоактивные вещества должны быть переданы в окончательное хранилище радиоактивных отходов, так как там лучше обеспечивается их длительная изоляция, и таким образом появляется возможность для другого использования площадки установки.

Такая передача, которая сопровождается разрушением существующих барьеров и созданием новых, является критической фазой при снятии с эксплуатации. Соответственно, основная часть программы была посвящена деятельности на этой фазе, т.е. демонтажу и дезактивации компонентов станции, а также обращению с образующимися отходами и их упаковке.

Основное усилие в программе было направлено на разработку эффективных методов и процедур снятия с эксплуатации с учетом вопросов радиационной защиты, ограничения образования радиоактивных отходов и эффективности вложения средств. Хотя оказалось, что при снятии с эксплуатации можно применять ряд обычных методов, существует необходимость в улучшении их характеристик, оптимизации и классификации их с учетом специальных требований, вызванных радиоактивностью, например, ограничение аэрозольного загрязнения и дистанционное управление.

Другой задачей явилось получение основной необходимой информации о снятии с эксплуатации, такой как данные о распределении, уровнях и ра-

### Исследовательская программа Европейских сообществ по снятию с эксплуатации, 1984—1988 гг.

#### Научно-исследовательские проекты

- Длительное сохранение целостности зданий и систем
- Деактивация применительно к снятию с эксплуатации
- Методы демонтажа
- Обращение с отходами конкретного состава: сталь, бетон и графит
- Большие контейнеры для радиоактивных отходов, образующихся при снятии с эксплуатации
- Определение объемов радиоактивных отходов, образующихся при снятии с эксплуатации ядерных установок Сообщества
- Влияние проектных характеристик на снятие с эксплуатации

#### Выявление ведущих принципов

- При проектировании и эксплуатации ядерных установок с точки зрения упрощения их последующего снятия с эксплуатации
- При снятии с эксплуатации ядерных установок

#### Испытание новых методов

- В реальных условиях в рамках крупномасштабных работ по снятию с эксплуатации, проводимых в государствах — членах КЕС

дионуклидном составе радиоактивности, присущей остановленной ядерной установке. Третьей задачей было выявление и разработка проектных параметров станции, облегчающих снятие с эксплуатации.

### Целостность зданий и систем

Если, например, принять, что мощность дозы излучения от активизированной нержавеющей стали обычно уменьшается за 100-летний период более чем в 100 000 раз, то хранение оборудования атомной электростанции *in-situ* является эффективным способом облегчения возможного демонтажа радиоактивных материалов и работы с ними. До сих пор хранение *in-situ* было предпочтительным методом для уже остановленных коммерческих атомных электростанций. По программе Сообщества было проведено исследование опыта хранения в течение длительных периодов времени продолжительностью от десятков до примерно 100 лет.

Были исследованы меры по приведению станций в состояние, обеспечивающие безопасность преимущественно пассивными средствами и при минимальном объеме надзора и обслуживания. Были определены системы станции, эксплуатация которых должна продолжаться или которые должны оставаться в работоспособном состоянии (для использования их при демонтаже станции).

Были исследованы виды и темпы разрушения различных материалов, характерные для атомных электростанций. Сюда вошло инспектирование станций (для выявления критических областей) и изу-

чение образцов. Были предложены меры по предотвращению и ограничению разрушения.

Эти исследования показали, что не существует сомнений относительно возможности хранения оборудования остановленной станции *in-situ*.

### Методы деактивации

Поверхностное загрязнение составляет лишь незначительную величину радиоактивности по сравнению с внутренней активностью компонентов, находящихся вблизи активной зоны и подвергшихся активации нейтронами. Однако поверхностное загрязнение распространяется на более широкий круг компонентов и встречается чаще. Если активация происходит только в реакторах, то поверхностное загрязнение имеет место также и на других типах ядерных установок. Следовательно, оно является важным источником малоактивных отходов и требует внимания с точки зрения обеспечения радиационной защиты при проведении операций по снятию с эксплуатации.

Деактивация поверхности, которая заключается в удалении радиоактивного поверхностного слоя с какого-либо компонента станции, облегчает дальнейшее обращение с этим компонентом и его обработку. Удаленные радиоактивные вещества следует концентрировать в небольшом объеме вторичных отходов, удобном для захоронения. Если деактивация достаточно эффективна, то можно обращаться с обработанным компонентом как с нерадиоактивным веществом. Это является способом уменьшения объема радиоактивных отходов и получения ценного сырьевого материала.

Деактивация до уровня, позволяющего снять ограничения по радиоактивности, достигается еще не всегда. По многим компонентам ядерной установки нет достаточной информации для решения вопроса об уместности деактивации с учетом дополнительного радиационного облучения, образования вторичных радиоактивных отходов и стоимости операции. Благоприятными показателями для деактивации являются низкий уровень и малая глубина проникновения загрязнения, а также малая величина отношения поверхности к объему компонента. Список компонентов, для которых возможна деактивация до уровней снятия ограничений, расширяется с разработкой более эффективных методов деактивации. Применяемые методы могут базироваться на более агрессивных реакциях, чем обычно, так как в данном случае допустимо некоторое ухудшение прочностных свойств обрабатываемых компонентов.

В качестве предварительных исследований деактивации на атомных электростанциях были изучены распределение, радионуклидный и химический состав, а также глубина проникновения поверхностного загрязнения. Применительно к деактивации стальных компонентов исследования были направлены на агрессивные химические и электрохими-



Эта циркулярная пила с алмазной режущей частью была разработана и испытана при демонтаже толстых бетонных конструкций АЭС. (Предоставлено: Министерство энергетики Великобритании.)

ческие методы. Для дезактивации бетонных поверхностей был разработан метод пламенной дезактивации с использованием кислородно-ацетиленового факела для удаления тонких внешних слоев.

### Методы демонтажа

При снятии с эксплуатации ядерных установок крупные радиоактивные компоненты должны быть разобраны. Основными такими компонентами являются следующие:

- Высокоактивные внутрикорпусные элементы легководного реактора, изготовленные из нержавеющей стали толщиной до 100 мм.
- Несущие давление корпуса легководных реакторов из плакированной нержавеющей сталью углеродистой стали с толщиной стенки до 300 мм и толщиной фланца до 600 мм.
- Конструкции биологической защиты из предварительно напряженного железобетона толщиной в несколько метров.

Демонтаж высокордиоактивных компонентов должен выполняться дистанционными методами

с достаточной радиационной защитой персонала. При возможности разукрупнение может осуществляться под слоем воды.

При снятии с эксплуатации могут применяться различные, в том числе обычно применяемые, методы демонтажа. Как правило, термические методы позволяют достичь высоких скоростей резания, но создают определенные проблемы, связанные с образованием мелких частиц. Механические методы, как правило, требуют много времени и тяжелых манипуляторов.

Применительно к разукрупнению стальных компонентов исследования были сосредоточены на использовании трех термических методов: плазменная резка (включая осуществляемую под слоем воды), плазменно-кислородная резка и лазерная резка. При этом, в частности, изучались свойства образующихся аэрозолей и характеристики различных систем фильтрации выделяющегося газа.

Для демонтажа радиоактивных конструкций из предварительно напряженного железобетона была разработана циркулярная пила с алмазной режущей частью, обеспечивающая более высокую скорость резания по сравнению с имевшимся ранее оборудованием. На заключительном испытании этой пилы из предварительно напряженной железобетонной стены был вырезан куб с ребром 1 метр. В качестве альтернативы резанию пилой исследуются взрывные методы для достижения контролируемых с высокой точностью результатов.

### Обращение с радиоактивными материалами

Основными материалами при демонтаже ядерных установок являются сталь, бетон и в случае газоохлаждаемых реакторов — графит. Для этих материалов были исследованы методы их захоронения, а для стали также методы повторного использования.

Переработка радиоактивных стальных отходов методом плавления имеет некоторые преимущества с точки зрения захоронения. Это уменьшение общего объема, связывание поверхностного загрязнения путем включения его в основной металл, а также уменьшение площади поверхности, потенциально подверженной коррозии. С другой стороны, дезактивационный эффект плавления важен с точки зрения повторного использования стали. В случае загрязнения труднодоступных или со сложной геометрией поверхностей плавление позволяет более точно определить величину радиоактивности.

Были проведены пробные плавки низкоактивной стали от различных типов реакторов. Особое внимание было уделено распределению различных радионуклидов между получающимся металлом, шлаком и выделяющимися газами. Было показано, что, как и ожидалось, металлические радиоактивные элементы, такие как кобальт и никель, попадают в металлический слиток. В металле цезия нет, но он может удерживаться в шлаке. Работы по плавлению продолжаются и будут проводиться

также со стальным скрапом, загрязненным актинидами.

Разрабатываются методы покрытия полимерными смолами для длительного фиксирования поверхностного загрязнения металла и бетона. Для связывания бетонной пыли исследуются силикатные растворы.

Для графитовых отходов были оценены следующие способы обращения: сжигание, захоронение в море, неглубокое закапывание в землю и захоронение в глубоких геологических формациях. Исследования включали определение общего количества радионуклидов, содержащихся в реакторном графите, концептуальные работы по высокопроизводительному сжигателю и упаковке отходов, испытание облученных образцов графита на выщелачивание, а также проведение оценок радиологического воздействия и стоимости работ. Кажется, что все рассмотренные при этих исследованиях способы заслуживают дальнейшего изучения, а выбор оптимального решения должен производиться с учетом конкретных условий.

### Контейнеры для крупных отходов

Радиоактивные отходы, образующиеся при демонтаже ядерных установок, следует перевозить и захоранивать более крупными блоками по сравнению с другими типами радиоактивных отходов, так как это уменьшает объем работ, необходимых для разукрупнения конструкций. На начальном этапе исследований были разработаны концептуальные проекты захораниваемого контейнера из предварительно напряженного железобетона и литого стального контейнера многократного пользования для материалов с повышенным уровнем радиоактивности. В дальнейшем будет исследовано захоронение литых стальных контейнеров, изготавливаемых из повторно используемого стального скрапа с низким уровнем радиоактивности.

### Оценки наработки радиоактивных отходов

Отходы с низким уровнем активности, образующиеся при демонтаже ядерных установок, в конце концов будут составлять существенную часть от общего объема образующихся в ядерной промышленности радиоактивных отходов. Поэтому для планирования предприятий по захоронению отходов нужны оценки наработки таких отходов. Должна быть известна величина радиоактивности этих отходов с выделением долгоживущих радионуклидов, с тем чтобы можно было провести классификацию различных типов отходов для применения соответствующего способа захоронения. Необходима также информация о предполагаемом спаде радиоактивности во времени, что является важным фактором при составлении графика демонтажа. Этот график в свою очередь определит момент, к которому по-

требуются предприятия по захоронению отходов. Так как этот проект включает определение рекомендуемых методов снятия с эксплуатации, он считается долгосрочной задачей.

Содержание радионуклидов было измерено в образцах активированных стали и бетона, взятых на остановленных станциях с кипящими реакторами. В частности, путем изучения высверленных образцов была определена толщина активированного слоя с внутренней стороны биологической защиты.

Микроэлементы, концентрации которых не указываются в спецификациях на материалы, являются источниками, от которых зависит величина активации стали и бетона. Для расчета активации необходима информация о концентрации этих элементов, величина которой иногда составляет миллионные доли. Для определения диапазона концентрации соответствующих элементов, ожидаемой в реакторных материалах, были изучены нерадиоактивные образцы из разных мест.

Была разработана методология оценки радиологических последствий при различных способах обращения со сталью и бетоном очень низкой активности. Такая методология необходима, если требуется определение минимальных уровней радиоактивности.

Вопросом, привлекающим все большее и большее внимание, является измерение радиоактивности твердых веществ, образующихся при демонтаже.

### Проектные характеристики

Проекты ядерных установок постоянно совершенствуются, и многие улучшения, относящиеся к эксплуатации, будут также облегчать снятие с эксплуатации. Примером тому является улучшение таких барьеров на пути распространения радиоактивности, как оболочки твэлов и парогенераторы, которые уменьшают загрязнение атомной электростанции. С другой стороны, ужесточение требований безопасности имеет тенденцию вызывать увеличение объема компонентов и конструкций, с которыми придется иметь дело при снятии с эксплуатации.

Были изучены те проектные характеристики, которые облегчают снятие с эксплуатации атомных станций. Хотя требования, связанные с безопасностью и надежностью эксплуатации реактора, а также вопросы эффективности вложения средств, ограничивают свободу модификации проекта станции, выявились определенные характеристики, заслуживающие более конкретного исследования. Примером является разработка не содержащих кобальт материалов для замены кобальтовых сплавов, используемых в контурах с реакторным теплоносителем, например, для седел клапанов.

### Выявление ведущих принципов

Выявление ведущих принципов в области снятия с эксплуатации считается долгосрочной задачей, так как оно должно основываться на соответствующем объеме технической информации. С учетом этого и определены исследования, объединенные программой Сообщества. Кроме того, был собран материал, имеющийся в государствах — членах КЕС, который мог бы послужить основой для выработки ведущих принципов.

Существующая система разрешений и контроля вместе с действующими нормами радиологической защиты уже позволяют в индивидуальном порядке проводить снятие с эксплуатации атомных электростанций. Однако специальные технические правила по снятию с эксплуатации отсутствуют. Основная неопределенность, касающаяся окончательного снятия с эксплуатации, т.е. подготовки станционных площадок для повторного использования, связана

с отсутствием специальных критериев получения нерadioактивных материалов из радиоактивных.

### Испытание методов в реальных условиях

Некоторые созданные методы снятия с эксплуатации уже были испытаны в реальных условиях и в значительных масштабах в рамках программы КЕС 1979–1983 гг. Примером является дезактивация стальных компонентов и бетонных поверхностей на остановленной станции с кипящим реактором, а также применение методов электрополирования и удаления тонких слоев пламенем.

В настоящее время испытания в реальных условиях стали важной частью программы, в том числе проведение дезактивационных и демонтажных работ на различных остановленных атомных станциях и заводах по изготовлению топлива.

