

Аспекты международных гарантий для хранилищ отработавшего топлива

Развитие средств и подходов

В. Пушкарев и Е. Тхарев



Хранилище отработавшего топлива — важный независимый элемент топливного ядерного цикла. Из-за задержки в некоторых странах принятия решения относительно окончательного захоронения отработавших топливных сборок в хранилищах накапливается все большее количество отработавшего топлива.

Хранение топлива должно быть обеспечено или на стационарных (приреакторных), или внестационарных хранилищах независимо от выбранного варианта.

Первые АЭС сооружались с нормальными бассейнами для отработавшего топлива вместимостью, рассчитанной на хранение от $2/3$ до $1\ 2/3$ загрузки активной зоны. Ожидалось, что после первоначальной выдержки в течение 2–3 лет отработавшее топливо будет доставляться на перерабатывающий завод. После того как первоначальные программы по переработке топлива были отложены, планы по хранению отработавшего топлива были пересмотрены с целью увеличения вместимости хранилищ в тех же местах размещения.

С другой стороны проявляется возможность для альтернативного хранения отработавшего топлива. Альтернативное хранение заключается в использовании долговременных отдельных хранилищ сухого или бассейнового типа. Эти хранилища задуманы как

крупные централизованные установки, способные принять на хранение отработавшее топливо от нескольких реакторов. В настоящее время отдельные хранилища становятся исключительно важными установками в топливном ядерном цикле в связи с тем, что позволяют осуществлять хранение топлива в течение длительного промежутка времени перед его переработкой или окончательным захоронением. Бассейновое хранение отработавшего топлива все еще представляет собой доминирующий способ хранения, накопивший длительный опыт успешной эксплуатации. В некоторых европейских странах были разработаны проекты различных конструкций хранилищ бассейнового типа, и они или уже построены, или будут строиться (в таких странах, как Франция, ГДР, Швеция, Великобритания, СССР).

В настоящее время изучается сухое хранение отработавшего топлива как альтернатива водным бассейнами как метод окончательного захоронения топлива. Программы сухого хранения топлива разрабатываются в таких странах, как Канада, ФРГ, Испания, Швейцария, Великобритания и США.

Применение гарантий к отработавшему топливу

Применение гарантий к отработавшему топливу является существенным элементом в международной системе гарантий на установках топливного ядерного цикла. МАГАТЭ всегда уделяло внимание разработке процедур гарантий для облученного топлива, однако, в настоящее время значение этой проблемы повышается.

Г-н Пушкарев — руководитель Секции системного анализа в Департаменте гарантий Агентства, г-н Тхарев — сотрудник Секции.

Фото:

Шведское хранилище для внестационарного хранения отработавшего топлива CLAB. Транспортный контейнер опускается в бассейн. (Фото SKB)

Несколько лет тому назад Секретариат МАГАТЭ начал разработку подходов по применению гарантий к отдельным хранилищам отработавшего топлива. Возникающие в связи с этой проблемой задачи разрабатываются в рамках программ поддержки гарантий МАГАТЭ в ФРГ, США и СССР. В 1983 г. в СССР состоялось совещание по проблемам гарантий для хранилищ бассейнового типа, которые планируется построить в ряде стран-членов Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ). В 1984 г. МАГАТЭ организовало совещание консультантов по проблемам, имеющим отношение к гарантиям для внестанционных хранилищ, и перспективам развития в этой области.

Все вышесказанное подчеркивает важность проблем применения гарантий к отработавшему топливу и их практического осуществления.

Процедуры гарантий при хранении отработавшего топлива

По классификации установок топливного ядерного цикла по отношению к учету ядерного материала хранилище отработавшего топлива рассматривается в качестве установки с ядерным материалом в виде учетных единиц. Это означает, что весь ядерный материал содержится в поддающихся отдельному учету предметах (например, топливные сбор-

Основные концепции гарантий

Гарантии для хранилищ отработавшего топлива применяются в соответствии с Уставом МАГАТЭ и двумя фундаментальными соглашениями (INFCIRC/66/Rev. 2 and INFCIRC/153 [corrected]).

Цели гарантий, как они приводятся в документе INFCIRC/153, состоят в „своевременном обнаружении переключения значимых количеств ядерного материала с мирной ядерной деятельности на производство ядерного оружия или других ядерных взрывных устройств, или на неизвестные цели, а также в сдерживании такого переключения в связи с риском раннего обнаружения”. В соглашениях о гарантиях, заключенных не на основе Договора о нераспространении (INFCIRC/66/Rev. 2), не содержится специфических определений цели, но на практике применяются те же самые концепции.

При практическом применении международных гарантий Агентство руководствуется техническими целями, основанными на трех фундаментальных параметрах („цели в отношении обнаружения”):

- Значимое количество ядерного материала.
- Время обнаружения (максимальный промежуток времени с момента переключения до обнаружения этого переключения МАГАТЭ).
- Вероятность обнаружения, которая определяет необходимую надежность мер гарантий МАГАТЭ.

При разработке подхода по применению гарантий для хранилищ отработавшего топлива и оценки полученных результатов МАГАТЭ устанавливает следующие количественные величины для целей в отношении обнаружения, связанные с отработавшим топливом:

• **Значимое количество:** 8 кг плутония (все изотопы), 25 кг ^{235}U , содержащегося в высокообогащенном ($\geq 20\%$) уране; 75 кг ^{235}U , содержащегося в низкообогащенном ($< 20\%$) или натуральном уране.

• **Время обнаружения:** 1–3 месяца для плутония и высокообогащенного урана в отработавшем топливе; около 1 года для ^{235}U в низкообогащенном уране.

• **Вероятность обнаружения:** 90 – 95 %.

Считая цель обнаружения в качестве руководящей, Агентство определяет для каждой установки цели инспекций, принимая во внимание реальные условия эксплуатации, положения Соглашения о гарантиях и современные технические возможности применения мер гарантий.

Фундаментальной концепцией гарантий МАГАТЭ является проверка того, что ядерный материал, подлежащий гарантиям в связи с Соглашением, не переключается из мирной ядерной деятельности. На практике эта проверка осуществляется путем проведения регулярных инспекций с частотой, определяемой временем обнаружения. Проверка МАГАТЭ основана на учете ядерного материала, как фундаментальной основной мере, и сохранении и наблюдении (С/Н) в качестве важных дополнительных мер. Она включает в себя изучение документов оператора и отчетов относительно наличия ядерного материала и его использования наряду с проводимыми Агентством независимыми измерениями и наблюдениями.

В качестве первого шага по разработке схемы гарантий разрабатывается подход по гарантиям для специфического типа установок. Подход по применению гарантий включает в себя систему учета ядерных материалов и меры сохранения и наблюдения для достижений целей проверки, принимая во внимание возможности систем измерения, конструктивных особенностей установки и ее работы.

Для проверки отработавшего топлива был разработан детектор Ion-1 (показан во время учебы инспекторов), включающий измерение общего гамма- и нейтронного излучения.



ки, запечатанные контейнеры или канистры с топливными сборками) в течение всего периода нахождения на установке. Количество ядерного материала, содержащегося в каждой учетной единице, должно быть получено путем измерений или расчетов. Более того, предполагается, что количество ядерного материала остается постоянной величиной (или изменяется известным образом, например, из-за радиоактивного распада) в течение времени, пока сохраняется целостность единицы. (См. текст в рамке с изложением основных концепций гарантий.)

В этих случаях гарантии МАГАТЭ основываются на процедурах поштучного учета, который включает в себя счет предметов и идентификацию, исследования в целях проверки целостности предмета и неразрушающие измерения. Меры сохранения и наблюдения (С/Н), дополняющие учет ядерного материала, имеют особое значение в применении гарантий к отработавшему топливу. В практике международного контроля Агентство изыскивает пути использования защитной оболочки установки или физических барьеров (например, стен, транспортных контейнеров, контейнеров для хранения и т.д.) для ограничения движения ядерного материала или его контроля, или доступа к нему. Используя средства наблюдения, такие как теле- и фотокамеры, Агентство собирает информацию с помощью приборов и устройств или путем визуального наблюдения инспекторами для обнаружения любого необъявленного перемещения ядерного материала, проникновения под защитную оболочку, фальсификации информации, связанной с местонахождением и количеством ядерного материала, и вмешательства в целях вывода из строя какого-либо устройства сохранения и наблюдения МАГАТЭ.

Эта комбинация мер по сохранению и наблюдению в качестве дополнительных мер к учету ядерного материала может обеспечить получение непрерывных сведений о проверяемом ядерном материале, целостности учетных единиц и о движении ядерного материала. Наиболее предпочтительной комбинацией этих мер является та, которая позволяет достигнуть целей гарантий при приемлемых затратах и с минимальным вмешательством в обычные действия операторов.

Опыт МАГАТЭ в применении гарантий к отработавшему топливу

Необходимо понимать, что основные концепции гарантий по отношению к отработавшему топливу можно использовать только в качестве руководства в рамках системы практического применения международных гарантий к конкретной установке. Вспервых, отработавшее топливо образуется в реакторе в результате облучения свежего топлива, а затем оно помещается в бассейн выдержки на некоторое время. Далее, в соответствии с выбранным вариантом обращения, оно или перевозится на завод по переработке топлива, или во временные или долговременные

хранилища для будущей переработки или окончательного захоронения. Очевидно, что на каждом этапе практические меры гарантий могут значительно отличаться друг от друга в зависимости от типа установки, ее конструктивных особенностей, технологического режима и продолжительности хранения отработавшего топлива. Если отработавшее топливо перемещается от одной установки к другой, эти внутренние связи между соответствующими установками должны быть приняты во внимание при разработке системы применения гарантий на каждой установке.

В течение длительной практики применения гарантий МАГАТЭ единственными установками, на которых облученное реакторное топливо находилось под международным контролем, были приреакторные хранилища. В конце 70-х годов, когда гарантии стали применяться на установках по переработке топлива, МАГАТЭ стало накапливать опыт по контролю облученного реакторного топлива, находящегося во временных хранилищах этих установок. С того времени Агентством был накоплен значительный опыт в разработке подходов и процедур применения гарантий для хранилищ такого типа. Недавно были построены первые долговременные внестанционные хранилища в ряде стран, и теперь они становятся предметом гарантий.

В следующих разделах кратко описаны возможные способы применения гарантий и опыт МАГАТЭ в их осуществлении на различных ядерных установках.

Приреакторные хранилища

На большинстве реакторов облученное реакторное топливо хранится в бассейнах, наполненных водой для обеспечения охлаждения и необходимой защиты. В настоящее время под гарантиями МАГАТЭ находится около 100 таких приреакторных хранилищ.

Меры учета, такие как счет предметов, идентификация и измерения методами неразрушающего анализа (НРА), могут, в принципе, осуществляться во всех приреакторных бассейнах выдержки, если они снабжены соответствующими приборами и оборудованием. Различные меры сохранения и наблюдения, с использованием теле- и кинокамер и печатей, могут применяться в зоне хранилища в качестве дополнительных мер. Измерения методами НРА служат для перепроверки инвентарного количества отработавшего топлива в случае выхода из строя приборов и средств С/Н.

Ниже представлены специфические особенности применения гарантий, зависящие от различных конструктивных концепций энергетических реакторов.

● *Легководные реакторы (LWR)*. Хранилища отработавшего топлива на легководных реакторах предусмотрены для кратковременного хранения топлива. Отработавшее топливо, выгруженное из реактора, хранится под водой, обычно в „корзинах”, которые поддерживают топливные сборки в вертикальном положении, удобном для подсчета и иденти-



Счетчик отработавших сборок был разработан для реакторов КАНДУ с перегрузкой на мощности. (Фото AECL)

фикации. Минимальное время хранения перед отправкой топлива составляет 90–180 дней, однако большая часть топлива в настоящее время хранится в течение более длительного времени (годы) из-за недостатка производственных мощностей по переработке. Большинство приреакторных хранилищ было построено для возможного хранения топлива, эквивалентного 2–4 полным загрузкам активных зон реактора.

Все топливные сборки LWR изготавливаются с заводским идентификационным номером на верхнем конце сборки. Теоретически, этот заводской серийный номер может быть прочитан в условиях радиации при типичных условиях хранения отработавшего топлива. В действительности условия в хранилище таковы, что идентификация весьма затруднительна. Перегрузка топлива в LWR обычно происходит через интервалы в 12–18 месяцев; во время перегрузки топливо перемещается из активной зоны в бассейн хранилища, где оно проверяется инспектором. Между перегрузками отработавшее топливо в виде потока наблюдается только во время перевозки к месту переработки топлива или в долгосрочное хранилище.

● **Тяжеловодные реакторы (HWR) — типа КАНДУ.**

Реактор КАНДУ был сконструирован с условием, что его топливо не будет перерабатываться, и в связи с этим было предусмотрено его долгосрочное хранение. Вместимости бассейнов хранилищ отработавшего топлива зависят от мощности реактора, но во всех случаях их емкости могут быть расширены путем достраивания дополнительных хранилищ. Вместимость хранилищ, позволяющая хранить топливо в

течение 1 года, обычно обеспечивается первоначальными бассейнами многоблочной АЭС с реакторами типа КАНДУ. Пучки сборок хранятся в горизонтальном положении в контейнерах (чехлы, корзины или модули), которые могут устанавливаться в два яруса. Затем топливо может быть перемещено по подводному каналу во второй бассейн, имеющий вместимость, рассчитанную на 30 лет эксплуатации.

Подход к применению гарантий, разработанный для реактора КАНДУ, учитывает применение уникальных приборов и методов благодаря особенностям конструкции реактора (а именно, перегрузка на мощности, большое инвентарное количество топлива и трудности доступа для обычных измерений инвентарного количества). Подсчет учетных единиц при проверке инвентарного количества и потоков ядерного материала составляет основу подхода к применению гарантий, хотя для обычных целей подход к применению гарантий на КАНДУ использует методы проверки потоков ядерного материала в комбинации с С/Н для проверки инвентарных количеств облученного топлива. Использование печатей во втором бассейне обеспечит значительное уменьшение инспекционных усилий, необходимых для проверки инвентарного количества.

● **Газоохлаждаемые реакторы (GCR).** МАГАТЭ имеет лишь ограниченный опыт в применении гарантий на ядерных реакторах с газоохлаждаемыми хранилищами облученного реакторного топлива. Всего в мире существует только три таких хранилища и одна демонстрационная установка для экспериментального хранения в бетонных контейнерах облученного реакторного топлива. Из-за задержки с переработкой топлива недавно были предприняты значительные усилия с целью увеличения вместимости существующих и строящихся приреакторных хранилищ. Предлагаемые при этом технические решения, которые могут создать дополнительные трудности для проверки МАГАТЭ и повлиять на инспекционные усилия на практике, включают более уплотненное хранение, добавление второго яруса стеллажей, переоборудование на более тесную решетку. Эти модификации должны учитываться в системах применения гарантий, а в некоторых случаях потребуются новые методы и средства.

Хранилища на заводах по переработке отработавшего топлива

Бассейны хранилища на заводах по переработке отработавшего топлива обычно проектировались с учетом того, что получаемое отработавшее топливо будет вскоре переработано. В хранилищах предусматривались емкости для хранения топлива, обеспечивающие 3–4 месяца работы перерабатывающего завода. Существуют проекты крупномасштабных перерабатывающих заводов, в которых предусмотрено увеличение времени хранения в промежуточном хранилище до нескольких (от 4 до 5) лет перед переработкой.

Топливные сборки доставляются на установку по переработке топлива в экранированных контейнерах от 20 до 100 т, вмещающих от 10 до 20 сборок. В бассейнах хранилища топливные сборки могут храниться или на простых стеллажах, сконструированных для хранения сборок в вертикальном положении и обеспечения пространства между ними для ядерной безопасности, или в разного вида корзинах и контейнерах, облегчающих обращение со сборками. Эти специальные контейнеры часто затрудняют применение гарантий, так как они закрывают верхнюю часть сборок, препятствуя визуальному наблюдению заводских серийных номеров, наблюдению излучения Черенкова или даже простой проверке физического наличия сборок.

Если сборки отработавшего топлива доступны для прямой проверки в бассейнах хранилища, то процедуры инспекций, в принципе, похожи на те, которые проводятся в приреакторных хранилищах, хотя и требуют значительных усилий. В других случаях, когда топливные сборки, хранящиеся в специальных закрытых контейнерах, недоступны для наблюдения, такие контейнеры рассматриваются как основные учетные единицы для учета материалов. Предполагается, что их содержание проверено инспекторами или на реакторе перед отправкой, и затем они были опечатаны, или это было сделано на заводе по переработке после их получения.

Учитывая эксплуатационный режим завода по переработке топлива, применяют совместно подсчет учетных единиц и учет материала в балк-форме для проверки потока отработавшего топлива из хранилища в технологическую зону.

Долговременное хранилище отработавшего топлива

Из опыта Агентства, накопленного в применении гарантий на водных бассейнах при реакторах и при заводах по переработке топлива, следует, что процедуры гарантий для отдельных долговременных бассейновых хранилищ будут сходны во многих отношениях. В то же время, длительный период времени хранения отработавшего топлива, вместимость долговременных отдельных хранилищ и особенности их конструкции ставят новые вопросы по применению гарантий на этих установках.

Процедуры проверки, основанные на мерах учета, затруднены на многих водных хранилищах конструктивными особенностями хранилищ и ограниченностью технических возможностей методов НРА. Кроме того, измерения методами НРА (где они возможны) занимают очень много времени из-за большого количества хранящихся топливных сборок (до нескольких тысяч). В некоторых случаях, когда сборки отработавшего топлива хранятся в специальных корзинах и многоэлементных „бутылках”, даже подсчет учетных единиц и идентификация сборок могут создать серьезные трудности.

Эта ситуация еще более усложняется в условиях

сухих хранилищ, в которых отработавшее топливо не может быть на практике проверено с помощью мер по учету, т.к. оно физически недоступно. Основываясь на этих фактах, роль мер С/Н становится исключительно важной при применении гарантий на отдельных долговременных хранилищах обоих типов.

К счастью, благоприятные условия для применения мер С/Н на этих установках обеспечиваются до сих пор тем, что топливные сборки остаются в статическом положении в течение длительного периода времени. Разнообразие средств С/Н, применяемых в хранилище, должно быть таким, чтобы соответствующие приборы С/Н не выходили из строя одновременно и обеспечивали высокий уровень технической надежности и дублирования.

По тем же причинам очередной задачей является установление инвентарного количества облученного топлива, загруженного в реактор.

Это особенно важно для сухих хранилищ, в которых транспортные контейнеры или контейнеры для хранения не могут быть открыты для проверки после их прибытия на площадку хранилища. Должны использоваться надежные системы опечатывания для транспортных контейнеров с целью сохранения их целостности и непрерывности информации о ядерном материале, перемещаемом из реактора в хранилище.

Ясно, что эксплуатационные процедуры, связанные с перевозкой отработавшего топлива от реактора к долговременному хранилищу, будут в значительной степени определять характер проведения инспекций. При разработке подходов к применению гарантий эта связь между отправителем (реактор) и получателем (хранилище) должна быть принята во внимание для оптимизации инспекционных усилий и увеличения эффективности применения гарантий.

Регулярное присутствие инспектора во время отправки отработавшего топлива с АЭС и его получения в хранилище требует значительных инспекторских ресурсов. Разработка усовершенствованных средств С/Н может решить эту проблему и обеспечить потенциальную возможность для уменьшения необходимых инспекторских ресурсов. В качестве примера этих новых средств можно назвать два прибора, разрабатываемых в рамках программы поддержки гарантий МАГАТЭ. Это — счетчик отработавших сборок и электронная опечатывающая система, способная „помнить” время наложения и снятия печатей с транспортных контейнеров. Информация, получаемая с помощью этих приборов и поддерживаемая камерами наблюдения на обеих установках, может способствовать получению непрерывной информации об отправках отработавшего топлива из реакторов в хранилище без присутствия инспектора на любой из установок.

Выше названные приборы имеют концептуальные значения для гарантий и образуют базу для появления новых идей в применении гарантий на хранилищах отработавшего топлива. Следует проанализировать возможности практического использования этих приборов в реальных условиях после проведения испытаний в отношении их функционирования, на-