

Современные технологии ядерного топливного цикла и гарантии МАГАТЭ

Анализ разработок ближайшего будущего и их потенциального значения

Адольф фон Бэкманн

В 1968 г. после открытия для подписания Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) перед МАГАТЭ встали задачи применения гарантий в неядерных государствах-участниках ДНЯО в целях обеспечения уверенности, что мирная ядерная деятельность не используется для производства ядерных устройств. Для этого МАГАТЭ требовалось значительно расширить и усовершенствовать свою систему гарантий.

В силу этого большинство концепций и технологических системы гарантий МАГАТЭ было разработано в начале 70-х годов, когда полные ядерные топливные циклы существовали лишь в государствах, обладающих ядерным оружием. В частности, только эти государства имели технологии изотопного обогащения по урану-235, которые тщательно избегали передавать неядерным государствам. В то время переработка отработавшего топлива не считалась чувствительной технологией, и фактически очень мало производилось смешанного окисного уран-плутониевого топлива (MOX), а плутоний в неядерных государствах использовался главным образом на исследовательских устройствах, имитирующих быстрые реакторы-размножители (FBR), например, быстрых критических сборках.

С тех пор ситуация изменилась. Несколько неядерных государств освоили топливный цикл легководных реакторов (LWR). Они создали свои собственные мощности по обогащению урана, основанные на ультрацентрифужной технологии и других газодинамических процессах (UCOR и технология реактивной струи), а также приобрели значительный опыт в области переработки отработавшего топлива (например, ЕВРОКЕМИК, ВАК, Токай Мура и Тарапур). Кроме того, в нескольких неядерных государствах были разработаны быстрые реак-

торы и построены заводы по производству тяжелой воды.

Ситуация продолжает изменяться: оставили свой след аварии в Чернобыле и на АЭС Три Майл Айленд. Бум в развитии ядерной промышленности начала 70-х годов уступил место политике консолидации. Реализация проектов разработки быстрых реакторов была прекращена или замедлена. Значительно сократилось число заказов на энергетические реакторы, строительство заводов по переработке и заводов по изготовлению смешанного окисного топлива серьезно замедлилось, за исключением, возможно, заводов по ультрацентрифужному обогащению топлива по урану-235, промышленность ядерного топливного цикла находится в застое.

Однако, несмотря на эти события, при более тщательном анализе обнаруживается не столь мрачная картина: реализация многих программ замедлилась, но не прекратилась. Исчезло бремя безотлагательности, поэтому теперь события очень часто анализируются и планируются более тщательно. Наиболее примечательные разработки осуществляются в области автоматизации, в частности, в сфере переработки и изготовления смешанного окисного топлива, реакторной топливной экономики и хранения отработавшего топлива. Технология обогащения ядерного топлива может найти свое место в ядерном топливном цикле, а извлечение трития из дейтериевого замедлителя и теплоносителя может превратиться в установившуюся практику.

В данной статье проводится анализ некоторых разработок обозримого будущего и их влияния на гарантии МАГАТЭ. Однако нельзя забывать и о других, не связанных с техникой событиях, которые значительно повлияют на будущее гарантий МАГАТЭ; одним из наиболее важных событий такого плана может стать полномасштабное применение гарантий МАГАТЭ ко всему ядерному материалу во всей мирной ядерной деятельности государств, обладающих ядерным оружием.

Г-н фон Бэкманн — консультант заместителя Генерального директора МАГАТЭ по гарантиям. Эта статья отражает его личное мнение, а не официальную точку зрения МАГАТЭ или Департамента гарантий.

Разработки в области автоматизации

Важным стимулом для достижения более высокого уровня автоматизации на установках ядерного топливного цикла, в частности, на заводах по переработке отработавшего топлива и изготовлению твэлов, являются экономические соображения и необходимость максимального уменьшения радиационного воздействия на персонал ядерной промышленности. Однако автоматизация и дистанционное управление могут сделать ядерный материал менее доступным для проверок.

Следовательно, требуется разработать новые процедуры проверки инвентарных количеств без остановки технологического процесса. Обычные процедуры инвентаризации предлагается заменить или дополнить учетом материала в масштабе времени, близком к реальному, непрерывной инвентаризацией и использованием радиоизотопных индикаторов партий материала. Кроме того, разрабатываются средства мониторинга операций и более широкого использования сложных методов сохранения и наблюдения (С/Н). Изучаются возможности математического расчета инвентарных количеств материала, находящегося в процессе, а также использования установленного измерительного оборудования (специально установленного в целях гарантий или заводских контрольно-измерительных приборов, используемых для управления заводом).

В отношении этих новых методов гарантий возникают свои проблемы: необходимо повысить сопротивляемость постороннему вмешательству и улучшить аутентификацию данных, используемых в целях гарантий, кроме того, требуется более подробная информация о конструкции установки и ее функционировании. В силу того, что автоматизацию заводов обычно связывают с высокой степенью компьютеризации, важную роль здесь играют специальные знания и мастерство, связанные с использованием компьютеров. В эту категорию, в частности, попадают новые установки по переработке и изготовлению отработавшего смешанного окисного топлива.

Обогащение урана-235

Значительное распространение получила технология обогащения. По крайней мере в пяти ядерных государствах работают заводы по обогащению и, кроме того, построено несколько научно-исследовательских и опытно-конструкторских (R/D) установок. Коммерческое обогащение топлива по урану-235 нельзя больше рассматривать как исключительную прерогативу государств, обладающих ядерным оружием.

Для заводов по обогащению, использующих ультрацентрифужную технологию, в рамках Шестистороннего проекта по гарантиям был разработан приемлемый подход к гарантиям, основанный на необъявленном доступе ограниченной частоты (LFUA), который инспекторы получают в зоне расположения каскадов*. В данном подходе тщательно

сбалансированы требования защиты (коммерчески) чувствительной информации и необходимость проведения надежной проверки такой деятельности. В силу того, что в зонах LFUA имеются довольно небольшие инвентарные количества гексафторида урана, подход к применению гарантий объединяет в себе закрытие баланса материалов вне зоны расположения каскадов и проверку непроизводства высокообогащенного урана (HEU) внутри этой зоны.

В настоящее время на R/D установках по обогащению урана, поставленных под гарантии МАГАТЭ, используется очень небольшое количество других технологий обогащения по урану-235, однако в ближайшее время эта ситуация может измениться. Если южноафриканский процесс UCOR будет поставлен под гарантии, могут потребоваться дополнительные меры, т.к. в зоне расположения каскадов содержатся очень большие количества гексафторида урана. Аналогичная ситуация возникнет и в случае использования германо-бразильского процесса реактивной струи на коммерческих заводах по обогащению урана, находящихся под гарантиями, или в случае постановки под гарантии диффузионного завода. В силу того, что на этих заводах коммерчески чувствительными считаются несколько эксплуатационных параметров, а (крупные) инвентарные количества материала, находящегося в технологическом процессе, нельзя установить без знания некоторых из них, возможно, потребуются разработать специальные процедуры проверки.

Установки лазерного обогащения могут и не вызвать проблем. Как и в случае ультрацентрифужных технологий обогащения, в технологическом процессе будут находиться относительно небольшие инвентарные количества материала по сравнению с диффузионным заводом одинаковой мощности, и только на одном очень небольшом производственном участке используется чувствительная технология лазерного обогащения. С точки зрения распространения основная проблема, связанная с лазерной технологией обогащения, обусловлена потенциально небольшими размерами такого завода, поэтому его легко будет скрыть, если страна примет решение создать тайные мощности по производству высокообогащенного урана. Однако (возможное) существование не поставленных под гарантии заводов по обогащению может привести к изменению концепций применения гарантий к низкообогащенному урану. Новые подходы к применению гарантий в отношении урана должны будут основываться на оценке количества единиц разделительных работ, затраченных на обогащение топлива, а не на (искусственной) границе 20 %-ного обогащения, которая разделяет высокообогащенный уран (прямого использования) и низкообогащенный (косвенного использования).

Топливная экономика легководных реакторов и повторное использование в цикле тепловых реакторов

Некоторые меры, предпринятые для улучшения топливной экономики легководных реакторов, привели к разработке очень сложных по конструкции твэлов с низкообогащенным топливом (LEU), а также к повторному использованию плутония в цик-

* „Шестисторонний проект по гарантиям — обзор председателя“, Ф. Браун, IAEA-SM-260/57, Вена (1983 г.).

ле. Обе эти меры оказали определенное влияние на систему гарантий МАГАТЭ.

Проверка содержания топлива в необлученных ТВС с помощью методов неразрушающего анализа (НРА) сильно затруднена в случае неравномерного обогащения топлива в твэлах, а также в случае наличия выгорающих поглотителей нейтронов. Кроме того, повторное использование урана, содержащего незначительные количества урана-236, затрудняет стандартную процедуру измерения уровня обогащения и содержания урана в свежем топливе. Хотя, в принципе, можно по-прежнему применять имеющиеся гамма-спектрометрические методы измерения и воротничковые счетчики совпадений нейтронов, но для этого потребуются калибровать измерительные приборы в зависимости от их конструкции. Все это требует времени, дорого стоит, и, кроме того, в случае отсутствия хороших эталонов снижает, как правило, точность измерений.

Замена твэлов вызывает дополнительные трудности с точки зрения применения гарантий в отношении большинства более современных ТВС легководных реакторов. Замена свежих твэлов облученными обуславливает, в частности, более сложную и обременительную стратегию осуществления гарантий, требующую применения дополнительных мер С/Н и измерений. Ситуация еще больше усложнится, если, как это было предложено, отработавшие ТВС будут разбираться на реакторной площадке, а в хранилище на переработку и окончательное захоронение будут направляться только отработавшие твэлы. В этом случае могут потребоваться очень интенсивные, с точки зрения затрат человеческих ресурсов, меры наблюдения за процессом демонтажа и загрузки твэлов в транспортные контейнеры.

Повторное использование в цикле тепловых реакторов. В настоящее время ТВС, содержащие смешанное окисное топливо, очень часто изготавливаются в целях повторного использования извлеченного из облученного реакторного топлива плутония в цикле легководных реакторов. В основе одной весьма крупной проблемы, связанной с применением гарантий, лежат очень небольшие временные значения целей своевременного обнаружения: свежие ТВС со смешанным окисным топливом должны проверяться довольно часто (раз в месяц). Более того, с помощью неразрушающих методов измерений трудно проверить или перепроверить содержание плутония в свежих ТВС со смешанным окисным топливом. В силу того, что свежие ТВС со смешанным окисным топливом очень часто хранятся под водой на реакторной площадке, а в настоящее время отсутствуют неразрушающие методы подводных измерений, для перепроверки необходимо осуществлять обременительную перегрузку топлива или применять дополнительные меры С/Н.

Проверку содержания плутония в ТВС со смешанным окисным топливом осложняет также тот факт, что очень часто отдельные твэлы отличаются друг от друга по изотопному составу содержащегося в них плутония, что затрудняет калибровку. Необходимо, однако, признать, что в данный момент повторное использование извлеченного плутония в цикле тепловых реакторов является

основным процессом его потребления в топливном цикле легководных реакторов.

Хранение отработавшего топлива

Отработавшие твэлы в течение длительных периодов времени хранятся, как правило, в специальных инженерно оборудованных хранилищах, обеспечивающих возможность их последующего извлечения, т.к. до настоящего времени не было создано установок для их окончательного захоронения. Многие государства пока еще не приняли решения относительно того, следует ли отработавшие ТВС помещать в последующем в специальные установки для окончательного захоронения (без возможности их извлечения) или подвергать их переработке. Почти во всех случаях вариант переработки остается открытым.

Для эффективного применения гарантий в отношении отработавшего топлива необходимо разработать новые концепции, неразрушающие методы измерений и методы С/Н. Последней разработкой является ультразвуковая печать, предназначенная для подводной перепроверки *in-situ* и широко используемая в настоящее время в некоторых бассейнах выдержки отработавшего топлива реакторов типа Candu. Кроме того, разработаны автоматические устройства мониторинга загрузки отработавших твэлов легководных реакторов в транспортные контейнеры.

МАГАТЭ рассматривает подходы к применению гарантий к установкам для длительного хранения отработавшего топлива (многоуровневые водные бассейны выдержки и хранилища с воздушным охлаждением) и приступило к изучению возможностей применения гарантий к установкам для окончательного захоронения отработавших твэлов. (См. статью, посвященную этому вопросу, в данном номере Бюллетеня.) В тех случаях, когда отработавшее топливо загружается в контейнер для длительного хранения непосредственно на реакторной площадке, наблюдение, осуществляемое инспектором, может представлять собой единственный разумный метод проверки. После загрузки транспортного контейнера для предоставления гарантий отсутствия переключения отработавшего топлива можно применять только меры С/Н.

Одним важным соображением, связанным с применением гарантий к хранилищу отработавшего топлива, является тот факт, что доступность отработавшего топлива или, если говорить точнее, содержащегося в нем плутония, возрастает по мере увеличения времени охлаждения в результате распада основных продуктов деления. Это означает, что степень его радиологической самозащиты уменьшается, а потенциальная привлекательность с точки зрения переключения возрастает. Сторонники установок длительного хранения отработавшего топлива очень часто упускают из виду данный аспект. Действительно, Агентство еще никогда не приступало к рассмотрению данного конкретного вопроса и установило разумную границу между категориями „извлеченный плутоний” (небольшое время обнаружения и высокая степень требований к проверке) и „плутоний, содержащийся в отработавшем топливе” (среднее время обнаружения и

средняя степень требований к проверке). На самом деле плутоний, содержащийся в отработавшем топливе с низкой глубиной выгорания, которое охлаждалось в течение длительного периода времени, может быть значительно более привлекательным с точки зрения производства ядерного оружия, чем плутоний, извлеченный из топлива с большой глубиной выгорания и хранящийся в виде свежих твэлов, содержащих спеченное при высокой температуре смешанное окисное топливо. Учитывая тот факт, что в целом время охлаждения отработавшего топлива, как и глубина выгорания топлива легководных реакторов, возрастает, этот вопрос приобретет значение лишь в будущем. Совершенно очевидно, что его нельзя будет игнорировать, если (и когда) будут открыты установки для окончательного захоронения отработавших твэлов (плутониевые шахты).

Заводы по производству тяжелой воды

Как ожидается, в 1991 г. начнет выпускать продукцию первый завод по производству тяжелой воды, поставленный под гарантии МАГАТЭ. Для МАГАТЭ это новая и очень необычная задача. Такой завод фактически не является установкой ядерного топливного цикла и на нем нет ядерного материала, к которому следует применять гарантии. Завод по производству тяжелой воды является очень сложным химическим заводом с сотнями километров трубопроводов, баками, обменными колонками, насосами, теплообменниками и т.п.

В настоящее время МАГАТЭ в тесном сотрудничестве с заинтересованными государствами и строительными компаниями разрабатывает концепцию применения гарантий к этому заводу, которая будет основываться на закрытии баланса дейтерия*. Особое внимание уделяется конструкции завода, эксплуатационной компоновке, извлечению дейтерия, инвентарным количествам материала на заводе, естественным потерям и неопределенностям измерений. Разрабатываемые концепции и методы включают в себя значительную степень мониторинга рабочих параметров и применимы только к данному заводу, который по некоторым своим параметрам является уникальным в мире. Разработка и применение удовлетворительной и эффективной системы гарантий потребуют более длительного периода испытаний и демонстрации.

Было, однако, предложено, чтобы МАГАТЭ сконцентрировало свою деятельность в области применения гарантий к заводам по производству тяжелой воды на проверке конечного продукта, учитывая относительно небольшое значение тяжелой воды с точки зрения распространения и ограниченные ресурсы Агентства в области гарантий.

Тритий

Список предметов и материалов, считающихся чувствительными, может изменяться по мере развития технологий производства ядерного оружия. В 60-х и начале 70-х годов графит ядерной чистоты считался чувствительным материалом, однако фактически графит ядерной чистоты не играет никакой практической роли в системе гарантий МАГАТЭ. С другой стороны, некоторые трансурановые элементы и тритий могут играть важную роль в вопросах нераспространения. Это особенно касается любых ситуаций, связанных с производством и возобновлением производства ядерных вооружений в ядерных государствах, если (и когда) вступят в силу соглашения об ограничении ядерных вооружений.

В последнее время состоялось несколько дискуссий, посвященных тритию. Тритий считается важным элементом многих ядерных вооружений, и его производство может оказаться фактором, сдерживающим пополнение и сохранение имеющихся запасов вооружений. Поэтому было предложено расширить сферу применения гарантий и включить в нее тритий. В ядерных государствах тритий, как правило, производится на специальных реакторах, предназначенных для производства трития и плутония с помощью ядерных реакций. В принципе инспекторов МАГАТЭ можно было бы использовать для проверки отсутствия необходимых установок по облучению или неиспользования таких существующих установок для производства трития. Однако нужно понимать, что более значительные количества трития также производятся в качестве неизбежного сопутствующего продукта на энергетических реакторах, где в качестве теплоносителя и/или замедлителя используется тяжелая вода. Чтобы исключить возможность незадекларированного извлечения трития из тяжелой воды на поставленных под гарантии реакторах, необходимо будет установить постоянный мониторинг инвентарных количеств и содержания трития на таких реакторах. Однако данная задача будет осложняться тем обстоятельством, что извлечение трития из тяжелой воды может осуществляться на энергетических реакторах в целях радиационной защиты, а также, возможно, в мирных коммерческих целях.

В данный момент система гарантий МАГАТЭ не может обнаруживать или проверять производство трития. Фактически тритий даже не упоминается ни в одном из соглашений о гарантиях, Уставе МАГАТЭ или информации о правилах экспорта, получаемой МАГАТЭ (документы INFCIRC/209 и INFCIRC/254) от конкретных государств-членов. Постановка перед МАГАТЭ вопроса о непроизводстве трития потребовала бы разработки и применения новых мер гарантий. Возникла бы необходимость пересмотра документа INFCIRC/153 и внесения поправок во все соответствующие существующие соглашения о гарантиях.

Другие разработки

Разработки в области гарантий МАГАТЭ не ограничиваются технологическими разработками в сфере мирной ядерной деятельности неядерных госу-

* «Выбор подхода к применению гарантий к заводу по производству тяжелой воды Арройито», А. фон Бэкманн и М.Д. Розенталь, IAEA-SM-293/140, Вена (1987 г.).

дарств. Увеличивается число современных методов, помогающих усовершенствовать деятельность в области ядерного топливного цикла, а также инспекционную деятельность, однако эти методы могут также стать доступными для тех, кто собирается совершить переключение материала, поэтому их необходимо принимать во внимание в так называемых анализах переключения. Усовершенствованные компьютерные программы могли бы помочь МАГАТЭ проводить более достоверный анализ имеющих отношение к гарантиям данных о потоках и инвентарных количествах ядерных материалов, но они также могут помочь оптимизировать свои стратегии переключения и тем, кто собирается это сделать. Это одна из причин, почему гарантии МАГАТЭ не могут основываться на вечно застывших концепциях и критериях, а должны непрерывно развиваться благодаря новым разработкам и адаптации.

Кроме того, необходимо принимать во внимание и ход политических событий. Политика нераспространения может найти свое подтверждение только в том случае, если она, в конечном счете, дополняется политикой контроля за ядерными вооружениями и разоружением. Если (и когда) соглашения о сокращении ядерных вооружений вступят в силу, роль гарантий МАГАТЭ в ядерных государствах может расшириться, и они превратятся в более завершую систему международных проверок. Это может стать самым значительным вызовом, с которым гарантиям МАГАТЭ, возможно, придется столкнуться в следующем десятилетии.

Более того, процесс экономической интеграции в Западной Европе приведет к усилению связей между ядерными топливными циклами западноевропейских государств, что, вероятно, позволит сконцентрировать переработку отработавшего ядерного топлива в двух государствах, обладающих ядерным оружием, — Великобритании и Франции. Кроме того, новые политические и экономические события в Восточной Европе могут привести к дальнейшей концентрации услуг в области ядерного топливного цикла в Европе, поэтому, в конечном счете, деятельность МАГАТЭ в области гарантий, возможно, будет сфокусирована на определенном числе крупных установок.

Еще одним фактором, значительно влияющим на эффективность осуществления мер гарантий, является возрастающее число установок и количества ядерного материала, остающихся вне системы гарантий МАГАТЭ в тех неядерных государствах, которые не приняли применения гарантий ко всей своей мирной ядерной деятельности. В этих странах эксплуатируются реакторы и практически все типы установок ядерного топливного цикла, включая заводы по обогащению урана-235, заводы по переработке, заводы по производству тяжелой воды, которые остались вне сферы применения гарантий МАГАТЭ. Степень универсальности гарантий МАГАТЭ заметно снижается. Это не только осложняет применение гарантий МАГАТЭ к поставленным под них ядерным материалам, но и уменьшает степень международной приверженности международно проверенной политике нераспространения. Ради будущего режима нераспространения и гарантий МАГАТЭ очень важно изменить эту тенденцию.

И, в заключение, усиливающаяся тенденция к регулированию ядерной деятельности, которую можно наблюдать в некоторых странах после чернобыльской аварии, может замедлить или помешать применению мер гарантий. В частности, все возрастающие трудности, связанные с соблюдением новых национальных регулирующих правил и требований, наблюдаются в отношении отправки проб, взятых в целях гарантий, перевозок топлива и процедур доступа.

Взгляд в будущее

Как Агентство решает эти задачи? Технические проблемы обычно решаются инспекторами и персоналом МАГАТЭ, занимающимся разработками, с помощью консультантов, консультативных групп и программ технической поддержки гарантий. В рамках таких программ с Агентством сотрудничают национальные научно-исследовательские и опытно-конструкторские лаборатории в нескольких государствах-членах.* Кроме того, в своих дискуссиях Постоянная консультативная группа по применению гарантий (SAGSI) очень часто обращается к данным вопросам и дает Агентству соответствующие рекомендации.

Национальные и международные проекты исследований и разработок, поддерживающие гарантии МАГАТЭ, а также контракты с коммерческими компаниями, могут быть использованы для разработки концепций гарантий, контрольно-измерительных приборов и методов. Токайский эксперимент по усовершенствованной технологии гарантий (TASTEX), Шестисторонний проект по гарантиям и Программа применения гарантий к крупномасштабной переработке отработавшего топлива (LASCAR) являются примерами международных проектов в области гарантий**. В некоторых случаях требования, предъявляемые с точки зрения гарантий, принимались во внимание на стадии строительства новых ядерных промышленных установок, однако в этом направлении необходимо предпринять более активные усилия, укрепить руководство. Кроме того, в рамках Департамента гарантий на межотдельской основе были разработаны конкретные проекты, касающиеся применения гарантий к сложным установкам.

Крепкая финансовая основа является одной из важных составляющих возможностей МАГАТЭ успешно реализовать новые разработки. К сожалению, Агентство в течение нескольких лет работает в условиях ограничений — почти нулевого прироста бюджета, выделяемого на гарантии, что заставило несколько перераспределить ресурсы из статьи исследований и разработок на удовлетворение острых потребностей в расширении инспекционной деятельности. Следовательно, из-за недостатка

* „Роль программ технической поддержки гарантий“, Х. Курихара, *Бюллетень МАГАТЭ*, т. 30, № 1, Вена (1988 г.).

** Информацию о TASTEX, Токайский эксперимент по усовершенствованной технологии гарантий, см. в Серии технических отчетов № 213, МАГАТЭ, Вена (1982 г.).

ресурсов страдает опытно-конструкторская работа, и, в конечном счете, этот недостаток будет проявляться все сильнее и сильнее. Если применение гарантий в ядерных государствах будет расширяться, то для этого могут потребоваться значительные дополнительные ресурсы или сокращение нынешней интенсивности применения мер гарантий.

Наличие достаточных ресурсов и непрерывное сотрудничество в области научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в целях гарантий и их применения имеют важное значение для успешного решения Агентством все возрастающих по своему объему задач осуществления гарантий.



Гарантии МАГАТЭ охватывают более 900 ядерных установок во всем мире.