

хорошо упакованных радиоактивных отходов как один из технически осуществимых методов их обезвреживания. Например, в Нидерландах разрабатывается метод захоронения ^{85}Kr в море на глубину более 4000 м и для этих целей создаются специальные сферические баллоны с двойными стенками, способные выдержать давление свыше 100 кгс/см².

Участники семинара отметили важность исследований, направленных на уменьшение возможного радиоактивного

загрязнения окружающей среды на всех стадиях ядерного топливного цикла.

В ходе проведения семинара специалисты Бельгии, Нидерландов, Японии посетили радиохимический центр Радиевого института, где ознакомились с опытными установками горячих камер по переработке отработавшего топлива АЭС и отверждению высокоактивных отходов, а также московскую станцию очистки и Центральную станцию радиационной безопасности.

РАКОВ Н. А.

Совещание консультантов по методологии оценки гарантий МАГАТЭ

За последние годы существенно увеличилось число ядерных установок, находящихся под международным контролем по системе гарантий МАГАТЭ. На конец 1979 г. МАГАТЭ контролировало 700 установок 50 государств, количество находившегося под гарантиями МАГАТЭ плутония достигло 68 т, высокообогащенного (более 20%) урана — 11,4 т, низкообогащенного, природного и обедненного урана, а также тория — более 27 тыс. т. При таком размахе контрольной деятельности МАГАТЭ остро встает вопрос об эффективности контроля в условиях ограниченности людских и финансовых ресурсов МАГАТЭ. Первостепенное значение приобретает оптимальное распределение этих ресурсов с тем, чтобы достичь максимальной эффективности гарантий в различных государствах без излишней концентрации усилий на одних установках в ущерб эффективности контроля на других. Решению этой задачи поможет создание методологии, которая бы позволяла достаточно объективно оценивать совокупность обычно применяемых мер контроля и могла использоваться для сравнительного анализа эффективности гарантий на различных установках.

Для создания такой методологии МАГАТЭ провело три совещания консультантов: в сентябре 1979 г., феврале и ноябре 1980 г. Наряду с сотрудниками Секретариата МАГАТЭ в них участвовали эксперты шести стран и региональной организации (Евратома), являющейся участником соглашения с МАГАТЭ о гарантиях. На совещаниях были разработаны основные принципы методологии оценки эффективности гарантий и обсуждены документы, описывающие возможную методологию и ее применение на примере легководного реактора.

Как известно, система гарантий МАГАТЭ предусматривает в качестве технической цели контроля «своевременное обнаружение переключения значимых количеств ядерного материала из мирной ядерной деятельности на производство ядерного оружия или других ядерных взрывных устройств...». При разработке методологии в качестве основы были выбраны возможные пути переключения значимых количеств ядерного материала. Понятия «значимые количества» и «своевременность обнаружения» определены принятыми в МАГАТЭ техническими критериями гарантий (например, 25 кг и 10 дней для металлического урана с обогащением выше 20%). «Путь переключения» определяется как сочетание способа удаления ядерного материала с установки и методов, которые государство может использовать, чтобы затруднить обнаружение изъятия материала из-под контроля.

Число путей переключения для каждой ядерной установки может достигать нескольких десятков, в особенности из-за наличия большого числа возможных комбинаций методов сокрытия. К ним относится как простое искажение учетной документации, так и сложные способы, например, подмена ядерного топлива имитаторами, подделка печатей МАГАТЭ, вывод из строя автоматических систем наблюдения и т. п. Для обнаружения переключения ядер-

ного материала МАГАТЭ использует различные виды проверки (например, измерение ядерного материала с опечатаванием и фотонаблюдением). Чем выше вероятность обнаружения признаков переключения ядерного материала и чем большая часть путей переключения «покрыта» проверочными действиями, тем более эффективным может оцениваться применение гарантий МАГАТЭ.

Основные составные части разработанной методологии сводятся к следующему:

рассматривается совокупность путей переключения значимых количеств ядерного материала;

для каждого пути переключения определяются признаки (так называемые аномалии), которые могут указать на то, что состоялось переключение;

для каждой аномалии определяются действия МАГАТЭ по проверке, способные ее зарегистрировать, и оценивается вероятность регистрации;

для каждого пути переключения определяется суммарная вероятность обнаружения переключения, как комбинация вероятностей регистрации аномалий, характерных для данного пути переключения;

исходя из совокупности значений вероятностей обнаружения, достигаемых для каждого пути переключения, находится показатель эффективности гарантий для установки.

В ходе разработки методологии были сформулированы следующие принципы ее применения.

Вероятность обнаружения. Во многих случаях пока не удастся строго математически вычислять вероятность регистрации аномалий и вероятность обнаружения переключения из-за отсутствия реалистичных статистических моделей и достаточных числовых данных. Это особенно характерно для контроля с использованием качественных измерительных методов и мер сохранения и наблюдения. В этих случаях предусмотрено применение формализованных процедур определения вероятностей, исходя из дискретных описательных значений: «очень высокая», «высокая», «средняя» и т. д. Отдельным событиям, составляющим часть процесса обнаружения переключения, описательное значение вероятности присваивается на основании экспертных оценок. Введены алгоритмы, которые дают возможность оперировать с описательными вероятностями. Устанавливается соответствие описательного значения вероятности обычно числовому, позволяющее переходить от числового значения к описательному и наоборот. Например, «очень высокая» вероятность соответствует диапазону числовых значений от 0,9 до 1 (среднее значение 0,95), «высокая» — от 0,7 до 0,9 и т. п.

Категоризация путей переключения. Вся совокупность путей переключения подразделяется на три уровня технической сложности действий государства по переключению: легко реализуемые, представляющие особую опасность, если они не покрыты применением гарантий;

более сложно реализуемые, требующие значительных усилий по изготовлению специального оборудования, подмене материала и т. п.;

крайне сложно реализуемые, требующие высокоспециализированных усилий, как, например, для изготовления фиктивных облученных ТВС, содержащих лишь осколки деления без ядерного материала.

Показатели эффективности. Отмечалась важность введения достаточно представительных совокупных показателей эффективности гарантий. Действительно, при анализе, например, применения гарантий на легководном реакторе рассматривается в общей сложности около 100 путей переключения облученного и ~30 путей переключения свежего топлива. Соответствующий набор значений вероятностей обнаружения подробно характеризует полноту используемой схемы применения гарантий, позволяя выявить те области, где необходимо внедрить более эффективные методы контроля. Однако для проведения сравнительного анализа эффективности гарантий, применяемых на различных ядерных установках и в разных странах, необходимо ввести некоторые совокупные показатели эффективности.

На примере легководного реактора показано, что удобным показателем эффективности является значение вероятности обнаружения, усредненное по путям переключения для каждой категории ядерного материала и уровня технической сложности переключения. Для легководного реактора (две категории материала и три уровня технической сложности переключения) получается шесть усредненных значений вероятности обнаружения, которые можно свести в один совокупный показатель эффективности путем их суммирования с введением коэффициентов, отражающих «важность» рассматриваемой категории и уровня технической сложности переключения. Таким образом, совокупный показатель может иметь вид

$$V = \sum_{ij} \left(\frac{\alpha_{ij}}{N_{ij}} \sum_{k=1}^{N_{ij}} P_{ijk} \right),$$

где P — вероятность обнаружения переключения; i — номер категории материала; j — номер уровня технической сложности переключения; k — номер пути переключения;

чтения; N_{ij} — число путей переключения для i -й категории и j -го уровня; α_{ij} — коэффициент.

В дополнение к определенному таким образом показателю эффективности, характеризующему, насколько вероятно обнаружение переключения значимых количеств ядерных материалов, была обсуждена возможность введения показателя эффективности, отражающего, насколько своевременным могло быть его обнаружение. В первом приближении им может быть показатель, описанный выше, но усредненный по всем инспекционным проверкам, выполненным за рассматриваемый отрезок времени. Были предложены также более сложные показатели, включающие отношения периодов между инспекционными проверками ядерного материала каждой категории ко времени обнаружения, принятому в качестве критерия для материала этой категории.

Относительность оценок эффективности. При оценке эффективности гарантий целесообразно рассматривать три схемы их применения: 1) позволяющую достичь полного выполнения принятых технических критериев; 2) запланированную к использованию (может отличаться от первой, например, из-за нехватки инспекторского персонала, отсутствия разработанных приборов или методов измерений и т. п.) и 3) фактическую. Отношения показателей эффективности для второй схемы к показателям эффективности для первой будут являться оценкой эффективности запланированной схемы, а аналогичные отношения показателей для третьей схемы к показателям для второй — оценкой работы инспекторского аппарата по фактическому контролю.

На совещаниях консультантов были рекомендованы дальнейшие шаги по завершению создания методологии: ее испытание на примере реальных установок, где применяются гарантии МАГАТЭ, выбор наиболее удобных форм совокупных показателей эффективности и доведение методологии до уровня, когда эти показатели смогут вычисляться системой обработки информации по гарантиям на ЭВМ.

ФОРТАКОВ В. Б.

Исследования по инжекторам быстрых атомов

В настоящее время в Калемской лаборатории (Великобритания) под эгидой ЭЭС сооружается JET — крупный токамак, представляющий собой наряду с T-15 (СССР), TFTR (США), JT-60 (Япония) следующее поколение термоядерных установок и предназначенный для физической демонстрации энергетического баланса термоядерной реакции. Параметры установки следующие:

Радиус, м	
большой	2,96
малый a/b	2,1/1,25
Магнитное поле, Тл	3,5
Ток в плазме, МА	4,8
Температура ионов, кэВ	5—10
n_e/n_0	$2 \cdot 10^{14}$
β , %	5—8
Время горения, с	10—20
Газ:	
на первом этапе	H
на втором	D — T

Физический пуск всего комплекса планируется на 1983 г. Система инжекции быстрых атомов JET является основным элементом дополнительного нагрева плазмы. Потоки атомов водорода (дейтерия) получают по классической схеме перезарядки ионов на собственном газе. Пучки ионов создаются в ионных источниках, преобразуются в потоки атомов в камерах нейтрализации, затем остав-

шие ионы удаляются с главного тракта поворотным магнитом, а поток атомов вводится в токамак под углом $19,5^\circ$ к большому радиусу, что обеспечивает почти тангенциальную инжекцию. Характеристики инжекционной системы таковы:

Мощность инжекции, МВт:	
первый этап	8,4, в том числе с основной энергией E_0 5,3
второй	25
Энергия инжекции, кэВ:	
первый этап	80 Н)
второй	160 (Д)
Число ионных источников	8
Ток одного источника, А	60
Длительность импульса, с	≥ 5
Компонентный состав пучка	$\geq 80\% H_1^+$, $\leq 15\% H_2^+$, $\leq 5\% H_3^+$
Расходимость пучка, град	$\pm 0,7-1$
Мощность извлекаемого пучка, МВт	38,4
Общие потери пучка (потери в ИОС, при транспортировке, из-за реионизации), %	28
Скорость отсечки, млн. л/с	≥ 4
Толщина перезарядной мишени, $см^{-2}$	$3 \cdot 10^{16}$