

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;

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 ЕЭС 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 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. Поток 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 (D)
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 отдачи, млн. л/с	≥ 4
Толщина перезарядной мишени, cm^{-2}	$3 \cdot 10^{16}$

Инджектор первой очереди состоит из одной вакуумной камеры большого объема (высота 7, длина 3,6, ширина около ионных источников 3 м, около входа в токамак она сужается до 1,3 м). В торце камеры располагаются восемь ионных источников (по четыре в два вертикальных ряда), к каждому примыкает камера нейтрализации, затем две пары верхних пучков ионов (энергией E_0) отклоняются вверх на 90° , а нижних — вниз. Пучок ионов энергией $E_0/2$ и $E_0/3$ (продукты диссоциации первичных молекулярных ионов) поворачивается на $\sim 270^\circ$. Газ откачивается криопанелями, охлаждаемыми жидким гелием, с расчетной скоростью около 4 млн. л/с. Система криопанелей представляет собой охлаждаемый жидким азотом полуцилиндр, в центре которого располагаются пластины с жидким гелием, защищенные с внешней стороны экраном с жидким азотом. Такая открытая конструкция криосистемы позволяет увеличить скорость откачки приблизительно вдвое по сравнению с «шевронной» системой той же площади.

Группа разработки ионных источников Калемской лаборатории занимается в основном исследованием и конструированием ионных источников и их элементов: газоразрядной камеры — плазменного эмиттера ионов и ионно-оптической системы (ИОС) формирования пучков, а также изучением тепловых и механических характеристик электродов ИОС. Разрабатываемые ионные источники относятся к типу источников с периферийным магнитным полем, которое способствует лучшему удержанию электронов и ионов в объеме газоразрядной плазмы. Развиваются принципы, положенные в основу источника для инжектора DITE. Мультипольная геометрия магнитного поля позволяет образовывать значительный объем плазмы внутри магнитного «барьера» и создавать поверхность эмиссии ионов большой площади. Исследовано влияние на однородность эмиссии ионов двух положений магнитов, создающих мультипольную периферийную систему: параллельно оси извлекаемого пучка и перпендикулярно ей. Во втором случае однородность эмиссии меньше связана с положением эмиссионной поверхности. Существенное внимание обращается на возможное снижение давления в разрядной камере, что повышает газовую эффективность ионного источника и уменьшает тепловую нагрузку на электроды ИОС, обусловленную ионизацией и перезарядкой остаточного газа в межэлектродных промежутках под воздействием первичного пучка. Исследуются условия, способствующие достижению потенциала плазмы, отрицательного относительно анода, и тем самым созданию условий электростатического (наряду с магнитным) удержания ионов в газоразрядной плазме. Все это направлено на получение однокомпонентного пучка ионов (т. е. достижение 80—85% содержания ионов H^+ в извлекаемом пучке).

Исследование ИОС ориентировано на оптимизацию конструкции охлаждаемой водой 4-электродной системы для достижения минимальной угловой расходимости пучка, абберации, потерь пучка на электродах (не более 1% полной мощности пучка) при первичном $(2-4) \cdot 10^{-6}$ А/В^{3/2} и достижение высокой электрической прочности промежутков. Форма апертур принята круглая. Численными и экспериментальными методами исследуется оптимальный диаметр апертуры. Наблюдается тенденция к использованию большого диаметра (до 12 мм), что позволяет увеличить прозрачность электродов (отношение площади эмиссии к общей площади электрода), однако накладывает более жесткие условия на параметры плазмы — эмиттера ионов и геометрию электродов ИОС. Большое влияние на формирование пучка оказывает профилирование ускоряющих электродов. В то же время профилирование пер-

вого (плазменного) электрода, с одной стороны, уменьшает угол расходимости и потери на электродах, но с другой, «тонкий» профиль затрудняет охлаждение электрода и тем самым уменьшает допустимые тепловые нагрузки, а также усложняет технологию изготовления. Со своей стороны давление газа в разрядной камере (или газовая эффективность источника) существенно влияет на характеристики потерь пучка на электродах и обратный поток вторичных электронов. Все это приводит к уменьшению плотности эмиссии до 200—250 мА/см².

Исследуются медные электроды, изготовленные диффузионной сваркой двух пластин с большими отверстиями (диаметр 12 мм) с водяными каналами. Ионный источник PINI (Plug In Neutral Injection), предназначенный для JET строится по модульному принципу с возможностью его дистанционного монтажа на камере инжектора. До последнего времени эксперименты проводили на стенде с модулем источника 1/4 номинального размера. Сейчас начата перестройка стенда MWBL (Megawatt Beam Line), на котором в конце 1981 г. начнутся исследования полномасштабного модуля. Стенд обеспечен средствами диагностики пучка ионов и атомов: оптической — по доплеровскому смещению и профилю линий измеряется компонентный состав и угловая расходимость пучка атомов; магнитной — для определения траектории и угла расходимости каждого луча, формируемого отдельной апертурой; зондовой и калориметрической — для измерения распределения пучков на приемниках.

На стенде можно исследовать получение пучка энергией ионов до 120 кэВ, его транспортировку на длине 8—12 м и прием на специальные электроды, имея в виду, что удельная мощность будет достигать несколько десятков кВт/см². Стенд снабжен шестью криопанелями с жидким гелием, откачивающими газ со скоростью 0,4 млн. л/с.

В настоящее время перезарядная мишень в канале нейтрализатора создается потоком «теплого» газа, вытекающего из газоразрядной камеры ионного источника, который имеет невысокую газовую эффективность ($\sim 50\%$). Заслуживает внимания тенденция повышения газовой эффективности источника и одновременное восполнение недостатка газа в нейтрализаторе посредством отдельного натекавателя «холодного» газа. Это позволяет, по-видимому, увеличить толщину мишени ($nl \sim 10^{16}$ см⁻²) при меньшем расходе газа за счет его температуры и уменьшить поток прямопролетных частиц в токамак.

В 1981 г. на DITE для достижения общей мощности инжекции 2,4 МВт будут смонтированы дополнительно два инжектора со следующими параметрами:

Мощность инжекции, МВт	0,6
Энергия инжекции, кэВ	25
Число ионных источников	2
Ток одного источника, А	31
Длительность импульса, с	0,05
Эффективность транспортировки, %	54
Коэффициент преобразования	
$D^+ \rightarrow D^0$, %	70—75
Потери атомов, %	5

Основными цели предстоящих экспериментов — исследовать параметры плазмы при новом бандл-диверторе, способном работать при более сильном магнитном поле ($\sim 2,8$ Тл), и изучить возможность поддержания стационарного тока в плазме посредством тангенциальной инжекции нейтральных пучков повышенной мощности. Эти исследования имеют принципиальное значение при разработке стационарного токамака.

СЕМАШКО Н. Н.