УДК 621.039.6.61

КАЛИБРОВКА НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ИТЭР. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РАСЧЁТЫ МОДЕЛИ РЕАКТОРА С ТОЧЕЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ НЕЙТРОНОВ 14 МэВ

А.А. Борисов, Н.А. Дерябина, Д.В. Марковский

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Мгновенная мощность является ключевым параметром ИТЭР. Её мониторинг с точностью на уровне нескольких процентов представляет актуальную и сложную задачу нейтронной диагностики. В предлагаемой серии статей поэтапно проводится расчётное нейтронно-физическое обоснование методики калибровки и даются рекомендации по проведению калибровочных измерений на ИТЭР с нейтронным генератором в качестве источника нейтронов. В данной работе рассматривается общая постановка задачи, основанная на схеме численного интегрирования откликов детекторов с ^{235}U и ^{238}U к точечным источникам нейтронов 14 МэВ на основе квадратур Гаусса, оптимальной для обработки «дорогостоящих» экспериментов. Такой подход позволяет легко контролировать точность интегрирования в зависимости от числа узлов по координатам и, таким образом, минимизировать число облучений при заданной погрешности полного отклика монитора. Получено, что минимальное число позиций идеального точечного источника в поперечном сечении камеры ИТЭР без использования упрощающих допущений составляет 20. Для достижения точности интегрирования азимутального распределения откликов в детекторах с ^{235}U в пределах 2—3% достаточно четырех узлов Гаусса на интервале 0—180°, для детекторов с ^{238}U — не менее 14 узлов. Последнее обусловлено немонотонным азимутальным распределением откликов ^{238}U , вызванным наличием щелевого эффекта в диверторных касетах. Проведённый анализ откликов к кольцевым источникам первичных нейтронов позволил определить положение кольцевого источника, эквивалентного штатному объёмному. Замена облучений в профиле плазмы облучением на этом кольце позволит уменьшить общее число облучений каждого детектора в 20 раз. Полученные оценки откликов к идеализированным точечным и кольцевым источникам нейтронов показали принципиальную возможность калибровки монитора мощности на уровне нескольких процентов за разумное время и целесообразность дальнейшего анализа практических аспектов калибровки.

Ключевые слова: мощность ИТЭР, нейтронный монитор, калибровка, нейтронно-физический расчёт.

CALIBRATION OF ITER INSTANT POWER NEUTRON MONITORS. STATEMENT OF A PROBLEM AND NEUTRONICS ANALYSIS OF REACTOR MODEL WITH POINT SOURCES OF 14-MeV NEUTRONS

A.A. Borisov, N.A. Deryabina, D.V. Markovskiy

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Instant power is a key parameter of ITER. Its monitoring with accuracy to few percent is actual and represents a challenge of neutron diagnostics. In a series of articles neutronics analyses for a substantiation of a calibration technique and working out of recommendations on performing calibrating measurements on ITER with the neutron generator as a neutron source are step by step considered. In the given work the statement of a problem based on the scheme of numerical integration of ^{235}U and ^{238}U detector responses to point sources of 14 MeV neutrons on the basis of Gauss quadrature, optimal for processing of "expensive" experiments is considered. Such approach allows to control easily accuracy of integration depending on number of co-ordinate mesh points and, thus to minimize number of irradiations at the given uncertainty of the full monitor response. It is received that the minimum number of positions of a point source in ITER chamber cross-section makes 20. For integration of azimuthal distribution of ^{235}U responses to accuracy 2—3% 4 Gauss mesh points are sufficient on an interval 0—180°, and for ^{238}U — not less than 14 points. The last is due to the nonmonotonic azimuthal distribution of ^{238}U responses caused by presence of slot-hole effect in divertor cartridges. The carried out analysis of responses to ring sources has allowed determining position of the ring source equivalent to the regular volume source. Replacement of irradiations in a plasma profile by irradiation on this ring will allow reducing total number of irradiations of each detector in 20 times. The received estimations of responses to idealized point and ring sources have shown basic possibility of calibration of the power monitor at a level of several percent uncertainty for reasonable times and expediency of the further analysis of practical aspects of calibration.

Key words: ITER power, neutron monitor, calibration, neutronics analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Мгновенная мощность термоядерного реактора с D—T-реакцией синтеза

пропорциональна интенсивности образования продуктов реакции. Соответственно, мониторинг мощности реактора может основываться на регистрации:

- общего теплового баланса реактора;
- потоков альфа-частиц или гелия из реактора;
- потока первичных нейтронов с характерной энергией 14,1 МэВ или полного потока нейтронов.

Первый способ регистрации — по балансу тепла на основании измерений расхода и перепада температур охлаждающего реактор теплоносителя традиционно применяется в стационарных энергетических установках. Он не подходит для контроля мгновенной мощности ИТЭР из-за значительного теплового запаздывания и низкой точности в режимах малой мощности реактора.

Упоминание о способах мониторингирования мощности ИТЭР по α -частицам и гелию здесь следует рассматривать скорее как предложение разработчикам систем диагностик обратить внимание на возможность создания дополнительной принципиально простой и слабо возмущающей конструкцию реактора системы.

Известно, что в отличие от нейтронов, практически мгновенно покидающих реактор, α -частицы, возникающие в реакции синтеза одновременно с нейтронами, некоторое время удерживаются магнитным полем в плазме, нейтрализуются и затем покидают реактор через дивертор в виде нейтрального газа гелия. Тем самым предоставляются возможности измерения концентрации как α -частиц и гелия в объёме плазмы, так и нейтрального газа в диверторе или откачных системах. Можно отметить следующие потенциальные достоинства α -мониторирования:

- характерное время измерений может приближаться к требуемому в ИТЭР временному разрешению;
- концентрацию α -частиц или гелия можно измерять как в объёме плазмы, так и в диверторе или откачной системе;
- профиль распределения гелия в поперечном сечении плазмы более пологий [1], чем для источника нейтронов;
- процедура калибровки монитора может оказаться более простой, чем для нейтронного монитора, поскольку отсутствует азимутальная зависимость отклика.

В области за дивертором возможна реализация ещё более простого и надёжного способа прямого мониторингирования мощности — измерения расхода однородного потока гелия из реактора. Это является скорее технической, а не физической задачей. Поскольку характерное время известных технических методов измерения концентрации гелия достаточно велико (порядка нескольких единиц или десятков секунд), непосредственные измерения расхода более применимы к квазистационарным режимам горения. Однако и в импульсных режимах работы реактора интегрирование этого расхода по времени может быть полезным для оценки полной энергии синтеза за импульс. Важно, что такие измерения могут быть организованы вне активной части реактора, где размещение дополнительных средств измерений затруднено, например, в элементах откачных систем.

Третий способ — по нейтронам, принят в настоящее время в проекте ИТЭР в качестве основного. При кажущейся простоте и адекватным временным характеристикам его обоснование сопряжено с значительными трудностями, обусловленными специфическими особенностями поля нейтронов в экспериментальном термоядерном реакторе:

- высокая опосредованность потока нейтронов в детекторе монитора, обусловленная многократными взаимодействиями нейтронов по пути из плазмы в детектор, что проявляется в зависимостях сигнала от положения элементарного источника в профиле и по азимуту плазмы;
- двумерная неравномерность распределения плотности источников термоядерных нейтронов в профиле плазмы;
- возможное варьирование положения и профиля плотности плазменного шнура в различных режимах работы реактора;
- изменение свойств детекторов нейтронов под облучением;
- необходимость разработки и реализации сложной идеологии калибровки мониторов в реакторных условиях с альтернативными квазиточечными источниками нейтронов.

Первые три особенности приводят к задаче квалифицированного выбора концепции монитора, обладающего «пространственной» стабильностью, т.е. существованием достаточно обширной области смещений источника нейтронов в камере реактора, при которых вариации отклика монитора относительно значения, соответствующего штатному положению источника, не выходят за рамки заданной погрешности калибровки монитора.

Наиболее простым может показаться применение в качестве монитора одного детектора нейтронов, для которого нужно только найти в реакторе подходящее место. Радикальным способом достижения стабильности такого монитора является удаление его от источника на достаточно большое оптическое расстояние, при котором относительное перемещение источника и, соответственно, влияние этого перемещения на монитор станут пренебрежимо малыми. Очевидно, что при этом быстро падает и интенсивность сигнала в мониторе. Более перспективен метод компенсации взаимного положения монитора и источника, когда монитор имеет не один детектор, а несколько. В этом случае перемещающийся в поперечном сечении камеры источник, удаляясь от одного детектора, может приближаться к другим детекторам, и при усреднении их сигналов можно ожидать компенсации уменьшения сигнала в одном детекторе усилением его в других. На простых геометрических моделях авторами было показано, что стабильное мониторирование мощности ИТЭР (в пределах перемещений штатного шнура $\sim \pm 1$ м относительно центрального положения) возможно с двумя детекторами деления (^{238}U или ^{235}U), расположенными в диверторной области и в верхней части камеры.

Третья особенность условий работы монитора приводит к необходимости обеспечения его «долговременной» стабильности, т.е. стабильности показаний во времени при изменении изотопного состава детекторов под облучением нейтронами. Предварительные оценки показывают, что детектор из ^{235}U не требует принятия каких-либо специальных мер для обеспечения его долговременной стабильности, поскольку в цепочке его дочерних продуктов отсутствуют делящиеся нуклиды с большим сечением деления. Напротив, детектор из ^{238}U без принятия таких мер не может считаться стабильным в конце рекомендованного в ИТЭР сценария облучения, поскольку в нём нарабатывается значительное количество делящегося изотопа ^{239}Pu . Его наработка может быть подавлена экранированием детектора поглотителем тепловых нейтронов.

Наконец, калибровка монитора в реакторных условиях с имитацией объёмного источника нейтронов с помощью альтернативного квазиточечного источника требует тщательной разработки и подробного расчётного обоснования идеологии этой процедуры, гарантирующей надёжный контроль суммарной погрешности калибровки монитора с учётом всех перечисленных обстоятельств.

Систематический расчётный анализ указанных вопросов проведён авторами в работе по контракту ИТЭР Ю/10/4300000315 [2]. В предлагаемой серии статей поэтапно рассматриваются нейтронно-физические расчёты для обоснования методики и разработки рекомендаций по проведению экспериментальных измерений для калибровки монитора мгновенной мощности на реакторе ИТЭР с нейтронным генератором в качестве источника нейтронов.

В данной статье, первой из предлагаемой серии, рассматриваются общий подход к методике калибровки, полученные на этой основе предварительные расчётные оценки основных эффектов калибровки в модели реактора ИТЭР с идеализированными точечными источниками нейтронов и предварительные рекомендации по позициям облучения монитора.

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА С ТОЧЕЧНЫМ ИЗОТРОПНЫМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ

Мгновенная мощность реактора P определяется с помощью измеренного при его работе отклика монитора мощности W по соотношению

$$P = \frac{P_0}{W_0} W,$$

где P_0 — номинальный уровень мощности реактора; W_0 — номинальный отклик монитора к источнику термоядерных нейтронов (на номинальном уровне мощности).

Номинальный уровень мощности реактора P_0 однозначно определяет интенсивность соответствующего источника термоядерных нейтронов. Поскольку P_0 и W_0 пропорциональны, непосредственная калибровка номинального отклика W_0 на реакторе со штатным источником нейтронов в принципе невозможна. Поэтому для калибровки монитора должен использоваться альтернативный источник нейтронов известной интенсивности с похожими физическими свойствами. Практической задачей калибровки является определение номинальных откликов монитора с камерами деления ^{235}U и ^{238}U к штатному источнику нейтронов в плазме на основе совокупности выполненных экспериментальных измерений откликов к альтернативному квазиточечному источнику термоядерных (или других) нейтронов. Считается, что штатный нейтронный источник однороден по азимуту реактора и имеет в сечении (r, z) профиль, рекомендованный для модели реактора Alite.

Общее число необходимых экспериментальных измерений локальных откликов к точечному источнику в координатах r, φ, z определяется суммарной заданной погрешностью калибровки $\varepsilon(W_0)$ и характером зависимостей локальных откликов от координат источника. Для перехода к локальным откликам искомый номинальный отклик монитора с точностью до нормировочных множителей представим в виде интеграла по объёму плазменного шнура от плотности единичного объёмного источника с весом соответствующего локального отклика к точечному источнику с координатами r, φ, z :

$$W_0 = 2R_0^2 N_0 \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{r_1(z)}^{r_2(z)} Q(r, z) r dr \int_0^\pi w(r, \varphi, z) d\varphi. \quad (1)$$

Здесь $R_0 = 640$ см — радиус центра плазмы; N_0 — интенсивность источника нейтронов 14 МэВ на номинальном уровне мощности реактора; $r = R/R_0$ — безразмерный радиус реактора; $Q(r, z)$ — профиль плотности источника; $r_1(z)$ и $r_2(z)$ — пределы интегрирования по радиусу ненулевого профиля источника в сечении z ; φ — азимутальный угол реактора; $w(r, \varphi, z)$ — локальный отклик монитора к точечному источнику с координатами r, φ, z .

Внутренний интеграл по φ

$$W_\varphi(r, z) = \int_0^\pi w(r, \varphi, z) d\varphi \quad (2)$$

представляет собой двумерную функцию отклика монитора к кольцевому источнику с координатами профиля r, z . Она может быть получена интегрированием рассчитанных локальных (к точечному источнику) откликов по азимутальному углу либо в расчётах с заданием кольцевых источников нейтронов, где интегрирование по φ происходит непосредственно в транспорте нейтронов. Интегрирование с кольцевым источником точнее, чем при внешнем интегрировании локальных откликов к точечным источникам вдоль того же кругового контура, и требует намного меньшего объёма расчётов. Поэтому для интегрирования по переменным r и z использовалась функция $W_\varphi(r, z)$, полученная из расчётов с круговыми источниками. Процедура определения функции $W_\varphi(r, z)$ в эксперименте оптимизировалась на основании рассчитанных локальных откликов вдоль контура плазмы.

Расчёт величины номинального отклика W_0 по формуле (1) можно разделить на два этапа: расчёт двумерной функции откликов к кольцевому источнику $W_\varphi(r, z)$ в пределах ненулевого профиля источника $Q(r, z)$ и последующее двукратное интегрирование, сначала по радиусу в переменных пределах, зависящих от z :

$$W_r(z) = \int_{r_1(z)}^{r_2(z)} Q(r, z) W_\varphi(r, z) r dr, \quad (3)$$

затем по высоте $W = \int_{z_1}^{z_2} W_r(z) dz$.

Тривиальный (сеточный) подход к выбору позиций точечного источника для экспериментального интегрирования по координатам приводит к трёхзначному числу облучений (произведение числа точек

по координатам r, φ, z). Операционное время на проведение такого количества облучений и измерений, в течение которого по соображениям радиационной безопасности другие работы на реакторе станут невозможными, может измеряться многими месяцами. Это делает принципиально важным, до рассмотрения технических деталей процедуры экспериментального интегрирования, поиск оптимальной постановки задачи. Критериями оптимизации являются противоречивые требования, с одной стороны, минимизации погрешности калибровки и, с другой стороны, минимизации общего числа позиций источника.

Известно, что при достаточно гладкой подынтегральной функции и наличии ограничения на число узлов, как в нашем случае, когда функция определяется из «дорогостоящих» экспериментов, целесообразно применение метода Гаусса, обеспечивающего наивысшую алгебраическую точность по сравнению с другими схемами численного интегрирования.

Интеграл по формуле Гаусса [3] приближенно равен сумме значений функции в узлах t_k ($k = 1, 2, \dots, n$), которые являются корнями полинома Лежандра степени n , умноженных на весовые множители A_k :

$$\int_{-1}^1 f(t) dt \approx \sum_{k=1}^n A_k f(t_k). \quad (4)$$

Степень точности равна $2n - 1$. Коэффициенты A_k и абсциссы t_k обладают следующей симметрией относительно $t = 0$: $t_{n+1-k} = -t_k$, $A_{n+1-k} = A_k$.

Линейная замена переменной t , определённой на отрезке $(-1, 1)$, переменной $x = \frac{b-a}{2}t + \frac{a+b}{2}$ приводит каноническое представление (2) к интегралу на отрезке (a, b) :

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{2} \sum_{k=1}^n A_k f(x_k), \quad (5)$$

где подынтегральная функция $f(x)$ вычисляется в точках $x_k = \frac{b-a}{2}t_k + \frac{a+b}{2}$.

Задачами представленных далее расчётов в обоснование методики экспериментальной калибровки были выбор минимально достаточных позиций точечного источника нейтронов с энергией 14 МэВ в камере реактора и определение абсолютных откликов детекторов монитора (скоростей деления ^{235}U и ^{238}U) к единичному штатному источнику в объёме плазмы. Минимальное число позиций по каждой координате определялось из графика сходимости относительной величины интеграла к единице (при 20 узлах) в зависимости от выбранного числа узлов Гаусса.

МОДЕЛИ НЕЙТРОННЫХ ДИАГНОСТИК

Заданная Центральной командой ИТЭР стратегия калибровки [2] предусматривает исследование следующих систем мониторинга: монитора нейтронного потока в диверторе (МНПД) и бланкетных мониторов — двух микрокамер деления (МКД-1 и МКД-2), монитора нейтронного потока с бериллиевым замедлителем в экваториальном порту (МНПБ), вертикальной (ВНК) и радиальной (РНК) нейтронных камер и нейтронной активационной системы (НАС). Разработанные на основе базы данных ИТЭР ENOVIA [4] (конец 2011 г.) трехмерные модели этих диагностик были встроены в модель реактора ИТЭР для расчётов по программе MCNP [5].

Монитор нейтронного потока располагается на корпусе диверторной диагностической кассеты (рис. 1). Такая же модель монитора нейтронного

Рис. 1. Диверторная кассета с монитором нейтронного потока

потока для анализа параметров калибровки была установлена и в верхнем порту модели реактора. Рассматриваемая в данной работе модель монитора нейтронного потока в диверторе (рис. 2) состоит из двух цилиндрических радиаторов диаметром 127 мм и длиной 363 мм, заполненных водой, в которые установлены детекторные блоки с тремя ионизационными камерами (ИК) с ^{235}U или ^{238}U . Детекторный блок с ^{238}U покрыт слоем кадмия толщиной 1,5 мм. В корпусе ИК, заполненном аргоном, находятся девять стальных пластин электродов радиусом 22 мм и толщиной 0,4 мм. На четырёх электродах нанесён делящийся материал в виде двуокиси ^{235}U или ^{238}U . В один блок устанавливаются две ИК с ^{235}U массой 30 и 0,3 мг и одна ИК без урана, в другой — три ИК с ^{238}U массой 60, 6 и 0,6 мг.

Рис. 2. Сечения модели монитора нейтронного потока в диверторе с двумя детекторными блоками (а) и ионизационной камеры (б)

Две одинаковые микрокамеры деления [6] устанавливаются за 12-м и 17-м модулями blankets. Микрокамера деления длиной 170 и диаметром 7 мм находится в стальном чехле цилиндрической формы длиной 200, диаметром 20 и толщиной 1 мм (рис. 3). В её корпусе установлены два коаксиальных цилиндрических электрода толщиной 0,5, внешними диаметрами 5 и 3,5 мм. На внутренний электрод нанесены 10 мг двуокиси ^{235}U .

Рис. 3. Фрагмент сечения модели микрокамеры деления

ной 910, внешним диаметром 250 и толщиной 90 мм с кадмиевым экраном толщиной 1 мм на внешней поверхности. Во внутренней полости блока находится цилиндрическая камера деления диаметром 50 и длиной 476 мм. Одна из камер деления монитора не содержит делящийся материал. В остальных камерах содержится ^{235}U в количестве 2 мг, 200 мг и 4 г.

Система нейтронной активации [8], представляющая собой разветвлённую сеть трубопроводов транспортировки образцов от позиций облучения до измерительной станции, задавалась в пределах вакуумного корпуса в виде стального канала диаметром 12 мм с толщиной стенки 1,5 мм. В канале вблизи первой стенки на глубине 10 и 45 см установлены три дисковых детектора толщиной 2 мм. Кандидатные активационные детекторы, ранее применявшиеся на установке JET, представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики активационных детекторов

Элемент	In	Fe	Al	Zn	Nb	Zr	Si
Реакция	$^{115}\text{In}(n, n)^{115m}\text{In}$	$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	$^{64}\text{Zn}(n, p)^{64}\text{Cu}$	$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92}\text{Nb}$	$^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$	$^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$
$T_{1/2}$	4,48 ч	2,57 ч	14,95 ч	12,70 ч	10,15 сут	3,26 сут	2,24 мин

МОДЕЛИ РЕАКТОРА ИТЭР

В расчётах реактора за основу была принята модель AliteR (40°, рис. 4, *а*) со встроенными в неё моделями нейтронных диагностик, созданная из базовой модели ИТЭР Alite. Дополнительно была разработана модель реактора Alite-CND (рис. 4, *б*) с углом раствора 360°, позволяющая анализировать азимутальное распределение откликов мониторов к точечному источнику. Конфигурация этой модели кратна сектору 40° модели AliteR. Для упрощения геометрии из неё были удалены периферийные конструкции, дающие малый вклад в искомые функционалы нейтронного потока. Модель включала внутренний и внешний blankets реактора, вакуумный корпус, тепловую защиту, часть тороидального магнита во внутренней части реактора и центральный соленоид, диверторную область с 54 диверторными кассетами, 5 диверторных портов, 10 экваториальных портов и 10 верхних портов. На всех диверторных кассетах размещены детекторы, имитирующие МНПД, в положении, как показано на рис. 5.

Рис. 4. Вертикальное ($Y = 0$) сечение модели AliteR (*а*) и Alite-CND (*б*)

Рис. 5. Горизонтальное сечение диверторной области модели Alite-CND (360°) (вид без диверторных кассет) с указанием положения детекторов, имитирующих МНПД в расчёте обратного распределения откликов (*а*) и фрагмент сечения диверторной кассеты № 3 ($Y = 0$) с моделью МНПД и детектором (*б*)

Физическая эквивалентность моделей AliteR и Alite-CND проверена в расчётах откликов детекторов с ^{235}U и ^{238}U для монитора в диверторе с двумя типами источника (штатный объёмный и кольцевой с координатами $R = 680$ см, $Z = -10$ см). Результаты расчётов совпали в пределах статистической погрешности.

СХЕМА РАСЧЁТА АЗИМУТАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛИКА МНПД

В расчётах азимутального распределения отклика начало координат азимутального угла находилось в плоскости $Y = 0$ модели реактора, проходящей через центр диверторной кассеты № 3, содержащей монитор с камерами деления ^{235}U и ^{238}U (см. рис. 5). Точечный источник перемещался по контуру с радиусом r_i в плоскости z_i от позиции $\varphi = 0$ с шагом углового размера диверторной кассеты $6,3^\circ$. Таким образом, в каждом положении источник оказывался над серединой очередной диверторной кассеты. Дополнительно к оценке отклика непосредственно в мониторе проводилась регистрация скоростей деления ^{235}U и ^{238}U в расположенном рядом пустом детекторе большого объёма, что позволило получить функцию отклика в нём с меньшей статистической погрешностью. Распределения отклика, полученные в неподвижном детекторе при перемещении источника, будем называть «прямыми».

Те же распределения локального отклика от точечного источника нейтронов по азимуту модели можно получить иным способом, используя обратимость угловых координат источника и детектора в случае, когда рассеивающие свойства конструкций, обращённых к плазме, слабо зависят от азимутального угла. При этом вклад в детектор от источника зависит только от углового расстояния между ними, т.е. серия расчётов с фиксированным положением детектора и различными положениями источника эквивалентна расчёту с фиксированным положением источника и соответствующими различными положениями детекторов. Будучи физически эквивалентными, эти подходы принципиально различаются при организации расчётов и экспериментов. Если в первом случае требуется проведение серии независимых расчётов с разными положениями источника, то во втором случае эквивалентная серия может быть рассчитана в одном варианте задания источника при регистрации распределения отклика вдоль некоторой азимутально-протяженной зоны модели — набора детекторов. Преимуществом второго варианта, кроме уменьшения требуемого машинного времени кратно числу исключённых точек источника, является статистическая корреляция зависимости отклика детектора от положения источника, что существенно уменьшает её погрешность. Ещё более важным использованием этого свойства модели окажется при организации экспериментальных измерений откликов монитора. Вместо серии облучений монитора при различных положениях точечного источника, перемещаемого по азимуту, можно провести одно коррелированное облучение детекторов, распределённых по азимутальному углу реактора, с помощью точечного источника, расположенного в плоскости штатного монитора. Поскольку это распределение является относительным, привязанным к абсолютному измерению отклика штатного детектора, оно может быть измерено с помощью более простых средств, например, фольг деления. В расчетах обратной зависимости точечный источник задавался при $\varphi = 0^\circ$, а распределение функции отклика детектора рассчитывалось по азимутальному углу в пределах $0-180^\circ$ в 27 детекторах на контуре $r_i z_i$ (см. рис. 5).

Подобие азимутальных распределений откликов в детекторах в «прямом» и «обратном» подходах демонстрируется в серии расчётов с точечным источником на оси плазмы ($R = 640$ см, $z = 60$ см) (рис. 6).

Рис. 6. Относительные отклики ^{235}U (а) и ^{238}U (б), как функция азимутального угла между точечным изотропным источником нейтронов и детектором: 1 — «обратное» распределение для детектора; 2 — «прямое» распределение для детектора; 3 — «прямое» распределение для монитора

«Прямое» и «обратное» распределения для детекторов (виртуальных фольг) практически совпали как для ^{235}U , так и ^{238}U . Для ^{235}U относительные «прямые» распределения для детектора и монитора также совпадают. Для ^{238}U наблюдается существенное расхождение зависимостей, полученных по монитору и детектору. Это связано с геометрией диверторной кассеты (рис. 7) — прямым прострелом нейтронов источника в детектор, минуя купол кассеты. В целом детектор, расположенный рядом с монитором, повторяет зависимости отклика монитора, но с определёнными поправками для каждого типа регистрирующего материала.

Рис. 7. Вид диверторной кассеты из места расположения точечного источника нейтронов

ИНТЕГРИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ПО АЗИМУТУ РЕАКТОРА

Представим круговой источник единичной интенсивности в виде интеграла по азимуту с постоянной угловой плотностью q :

$$Q = \int_0^{2\pi} q d\varphi = 1, \quad q = 1/2\pi.$$

Отклик детектора к круговому источнику W_r получим интегрированием локальных откликов (нормированных на один нейтрон источника) с весом угловой плотности вдоль контура источника:

$$W_r = \int_0^{2\pi} W(\varphi) q d\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} W(\varphi) d\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} W(\varphi) d\varphi \equiv \bar{W}. \quad (6)$$

Таким образом, отклик к круговому источнику тождественно равен среднему по кругу локальному отклику $\bar{W}$. Умножив и разделив его на величину отклика монитора, расположенного в начале координат угловой переменной (плоскость $Y = 0$) W^m , получим

$$W_r = W^m \frac{\bar{W}}{W^m} = W^m / K_\varphi, \quad (7)$$

где $K_\varphi = W^m / \bar{W}$ — коэффициент азимутальной неравномерности отклика вдоль контура источника.

Искомый отклик к круговому источнику W_r связан с максимальным значением — откликом к точечному источнику W^m , расположенному в плоскости детектора, одним параметром — коэффициентом неравномерности азимутального распределения отклика.

Как отмечено, для получения отклика от кругового источника наряду с интегрированием «прямых» откликов штатного детектора к различным положениям точечного источника возможно интегрирование «обратных» откликов детекторов по азимуту реактора к точечному источнику, расположенному в центральной позиции. В этом случае, как следует из формулы (6), экспериментальная процедура определения отклика детектора к единичному круговому источнику может быть разделена на два этапа:

— измерение абсолютной величины максимального отклика W^m в центральной позиции (на диагностической кассете № 3). В геометрии эксперимента, когда азимутальные позиции точечного источника и штатного монитора совпадают, сигнал максимален и реализуются наилучшие условия измерения для достижения заданной статистической точности и учёта поправок к геометрии реального квазиточечного источника;

— измерение коэффициента неравномерности отклика по азимуту K_φ .

Коэффициент K_φ является относительной величиной, представляющей тороиальность модели. Он может быть получен из отклика в центральном мониторе (или детекторе) W^m и среднего отклика $\bar{W}$, вычисленного из одновременно измеренных (не обязательно со штатным типом детекторов) скоростей де-

ления по азимутальному углу в пределах $0—180^\circ$ вдоль кольца, близкого к положению штатного детектора в поперечном сечении камеры реактора. Геометрия облучения, как и в предыдущем случае, способствует достижению максимальной точности его определения: локальный отклик W^m измеряется в условиях наилучшей статистики, а средняя величина $\bar{W}$ является результатом интегрирования коррелированного относительного распределения. Кроме того, отсутствует ограничение на число точек измерения «обратного» азимутального распределения по времени облучения.

Оба рассмотренных этапа измерения откликов детекторов с ^{235}U и ^{238}U могут быть выполнены либо в одном, либо в разных облучениях. Таким образом, при использовании «обратной» методики калибровка наиболее чувствительных детекторов монитора, камер деления с ^{238}U и ^{235}U , может быть проведена при минимальном времени облучения на стенде ИТЭР. В дальнейшем калибровка других, менее чувствительных мониторов (активационных и т.д.) может быть выполнена по показаниям мониторов с камерами деления (кросс-калибровка).

Для иллюстрации эффективности «обратной» методики проведены специальные расчёты с круговыми и точечными источниками. В качестве кругового источника в модели был выбран контур $R = 680$ см на высоте $z = -10$ см, эквивалентный по откликам монитора с ^{235}U и ^{238}U штатному объёмному источнику Alite. В табл. 2 приведены расчётные параметры откликов детекторов с ^{235}U и ^{238}U к этому эквивалентному источнику, а также к точечному источнику на этом круге в сечении $\varphi = 0^\circ$.

Т а б л и ц а 2. «Обратные» отклики к точечному источнику с координатами 680 см, 0 см, –10 см и кольцевому источнику $R = 680$ см, $z = -10$ см для детекторов с ^{235}U и ^{238}U

Источник	Отклик	^{235}U	^{238}U
Точечный	W^m , дел./н.и./ядро	$2,86 \cdot 10^{-29}$	$5,25 \cdot 10^{-32}$
	K_φ	3,58	3,38
	$\bar{W}_p = W^m/K_\varphi$, дел./н.и./ядро	$0,798 \cdot 10^{-29}$	$1,55 \cdot 10^{-32}$
Круговой	W_r , дел./н.и./ядро	$0,742 \cdot 10^{-29}$	$1,46 \cdot 10^{-32}$

Видно, что средние значения откликов $\bar{W}_p$ к точечному источнику детекторов с ^{235}U и ^{238}U совпадают с точностью до нескольких процентов с соответствующими значениями откликов к круговому источнику W_r .

Для определения минимально достаточного числа узлов интегрирования по Гауссу азимутальные распределения откликов к точечному источнику на рис. 8 интегрировались с числом узлов от 2 до 20 (рис. 9). Интеграл от гладкой функции отклика ^{235}U сходится к асимптотическому значению с точностью до 2—3% уже при 3—4 узлах. Распределение отклика ^{238}U , имеющее более сложную форму из-за наличия пика прямого прострела нейтронов источника, требует для интегрирования с той же точностью не менее 14 узлов. Это существенно усложнит процедуру калибровки детектора с ^{238}U прямым методом.

Рис. 8. «Обратные» распределения откликов к центральному точечному источнику в позиции $R = 680$ см, $Z = -10$ см (на эквивалентном кольце): ■ — ^{235}U ; ■ — ^{238}U

Рис. 9. Сходимость интеграла по азимуту в зависимости от числа узлов Гаусса: ● — ^{235}U ; □ — ^{238}U

ИНТЕГРИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ПО РАДИУСУ И ВЫСОТЕ РЕАКТОРА

Как отмечалось, наиболее точное интегральное по азимуту значение отклика монитора можно получить в расчёте транспорта нейтронов в модели реактора с кольцевым источником. Такие расчёты были проведены в модели реактора AliteR с углом раствора 40° . Положение кольцевых источников изменялось в границах штатного распределения плотности нейтронов 14 МэВ. Полученные матрицы значений откликов $W_\phi^{235}(r, z)$ и $W_\phi^{238}(r, z)$ монитора на центральной кассете для девяти точек по радиусу и 13 точек по высоте реактора приведены в табл. 3 и 4. Значения откликов к кольцевым источникам нормированы на расчётную величину отклика монитора к штатному объёмному источнику модели AliteR. Абсолютные значения откликов монитора к штатному объёмному источнику Alite на один нейтрон источника и одно ядро урана составляют соответственно $1,28 \cdot 10^{-29}$ дел./н.и./ядро для ^{235}U и $0,941 \cdot 10^{-32}$ дел./н.и./ядро для ^{238}U .

Таблица 3. Матрица значений $W_\phi^{235}(r, z)$ откликов монитора $^{235}\text{U}(n, f)$ к кольцевым источникам, нормированных на отклик к штатному объёмному источнику реактора

Z/R	440	500	560	600	640	680	720	760	820
-230	2,24	2,21	1,96	1,75	1,55	1,26	0,95	0,66	
-160	1,49	1,61	1,52	1,44	1,34	1,25	1,15	1,03	0,874
-90	1,16	1,27	1,24	1,2	1,163	1,126	1,086	1,06	1,04
-50	1,06	1,15	1,15	1,118	1,1	1,08	1,06	1,03	1,01
-10	0,96	1,07	1,05	1,04	1,03	1,016	1,00	0,99	0,992
30	0,902	0,993	0,986	0,982	0,978	0,975	0,97	0,966	0,981
60	0,83	0,92	0,939	0,941	0,943	0,945	0,95	0,955	0,97
90	0,811	0,885	0,908	0,912	0,917	0,922	0,93	0,937	0,956
130	0,786	0,856	0,873	0,88	0,884	0,89	0,90	0,92	0,943
170	0,765	0,83	0,844	0,849	0,854	0,861	0,869	0,90	0,942
210	0,733	0,783	0,799	0,813	0,826	0,847	0,868	0,903	0,946
280	0,753	0,766	0,787	0,808	0,83	0,85	0,886	0,914	0,963
350	0,727	0,746	0,772	0,797	0,837	0,88	0,914	0,96	1,017

Таблица 4. Матрица значений W_ϕ^{238} откликов монитора $^{238}\text{U}(n, f)$ к кольцевым источникам, нормированных на отклик к штатному объёмному источнику реактора

Z/R	440	500	560	600	640	680	720	760	820
-230	2,08	2,12	2,14	2,65	6,4	1,16	0,88	0,60	0,40
-160	1,57	1,57	1,52	1,59	2,19	4,47	2,22	0,63	0,60
-90	1,04	1,17	1,13	1,16	1,25	1,83	3,20	3,04	1,15
-50	0,955	1,02	1,00	1,03	1,11	1,20	2,20	2,82	2,80
-10	0,775	0,918	0,94	0,90	0,93	1,03	1,37	2,32	2,57
30	0,722	0,743	0,81	0,84	0,84	0,87	1,02	1,63	2,36
60	0,671	0,703	0,73	0,77	0,79	0,83	0,93	1,24	2,18
90	0,62	0,67	0,68	0,72	0,74	0,74	0,86	0,968	1,72
130	0,581	0,631	0,64	0,64	0,70	0,71	0,77	0,874	1,22
170	0,554	0,572	0,576	0,58	0,65	0,64	0,69	0,783	1,00
210	0,527	0,518	0,54	0,54	0,58	0,58	0,67	0,667	0,725
280	0,443	0,459	0,491	0,468	0,491	0,54	0,558	0,59	0,62
350	0,444	0,445	0,455	0,455	0,482	0,464	0,502	0,54	0,58

В таблицах выделены области значений r, z , где отклики к кольцевым источникам практически совпадают с соответствующими откликами к штатному источнику. Для ^{235}U — это кольцевой источник радиусом 720 см на высоте $Z = -10$ см, для ^{238}U — радиусом 560 см на высоте $Z = -50$ см. Общий для обоих делящихся изотопов эквивалентный кольцевой источник, отклики к которому с точностью $\sim 3\%$ будут совпадать с откликами к объёмному источнику, имеет радиус 680 см на высоте $Z = -10$ см.

Полученные в расчётах модели с круговыми источниками поверхности откликов для интегрирования по радиусу реактора показаны на рис. 10. На рисунках в координатах R, Z отмечены области совпадения откликов к кольцевым источникам и штатному. При интегрировании по формуле (3) использовался профиль источника $Q(r, z)$ модели AliteR, заданный двумерной матрицей (40×40). Отклики к кольцевым источникам интегрировались по радиусу для каждого z в индивидуальных границах по r , внутри которых источник отличен от нуля. Значения интенсивности источника и отклика детектора в узлах квадратуры Гаусса в указанных индивидуальных пределах по r рассчитывались двумерной интерполяцией по табличным значениям матриц источника и откликов.

Двумерная зависимость отклика ^{235}U (n, f) на рис. 10 представляет собой гладкую поверхность с монотонным подъёмом в сторону детектора, расположенного внизу камеры реактора на диверторной каскаде. Поверхность отклика ^{238}U (n, f) на большей её части также монотонно, но более круто поднимается по мере приближения к детектору, однако на ней заметны эффекты оптического экранирования детектора модулем blankets при некоторых положениях источника в нижней части камеры. Такое различие поведения откликов детекторов с ^{235}U и ^{238}U обусловлено их преобладающей чувствительностью: в первом случае к многократно рассеянным медленным нейтронам, во втором случае к первичным нейтронам источника, вклад которых носит в значительной степени «оптический» характер.

Рис. 10. Поверхности относительных значений откликов ^{235}U (n, f) (а) и ^{238}U (n, f) (б)

В центральном сечении по высоте, дающем наибольший вклад в полный интеграл отклика, подынтегральная функция и её компоненты имеют гладкий вид (рис. 11). Такой же характер имеют и поверхности подынтегральной функции для ^{235}U и ^{238}U (рис. 12). Видно, что упомянутые «оптические» эффекты для отклика ^{238}U попадают в области малой интенсивности источника и поэтому

Рис. 11. Радиальные распределения подынтегральной функции $Q(r, z)W_\phi(r, z)r$ и её компонентов при $z = 60$ см: $r = R/640$ (—); $Q(r, 60)$ (■); $W_\phi^{235}(r, 60)$ (○); $W_\phi^{238}(r, 60)$ (◇); $Q(r, 60)W_\phi^{235}(r, 60)r$ (■); $Q(r, 60)W_\phi^{238}(r, 60)r$ (■)

Рис. 12. Поверхности подынтегральной функции $Q(r, z)W_\phi(r, z)r$ в формуле (3): ^{235}U (а), ^{238}U (б)

практически не приводят к существенным искажениям гладкой формы поверхности подынтегральной функции в целом.

Зависимость сходимости величины интеграла от числа узлов Гаусса аналогична представленной на рис. 9 для азимутального распределения. На этом основании для измерений по радиусу можно рекомендовать пять узлов.

Полученные при интегрировании по радиусу с максимальным числом узлов $N = 20$ высотные распределения подынтегральной функции $W_r(z)$ для ^{235}U и ^{238}U показаны на рис. 13. Из графика сходимости интегралов от этих распределений в зависимости от числа узлов Гаусса на рис. 14 следует, что для интегрирования этих гладких распределений достаточно четырех узлов.

Рис. 13. Высотные распределения подынтегральной функции $W_r(z)$ для ^{235}U и ^{238}U : $\blacktriangle$ — ^{235}U (G20); $\bullet$ — ^{238}U (G20); $\blacklozenge$ — ^{235}U (G5); $\star$ — ^{238}U (G5)

Рис. 14. Сходимость интеграла по высоте в зависимости от числа узлов Гаусса: $\square$ — ^{235}U ; $\circ$ — ^{238}U

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПОЗИЦИИ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

Рекомендуемые на основании проведённого анализа позиции точечного изотропного источника нейтронов со средней энергией 14,1 МэВ на профиле плазмы для экспериментальной калибровки отклика монитора нейтронного потока в диверторе представлены в табл. 5.

Эффективность представленной схемы интегрирования откликов по выбранным для экспериментов точкам можно проверить в сравнении с максимально точным приближением в рамках проведённого анализа. Эти приближения можно условно обозначить как «экспериментальное» и «расчётное». В «экспериментальной» модели отклики интегрировались в соответствии с рекомендованной схемой измерений в пяти узлах по радиусу и четырёх узлах по высоте, как обозначено в табл. 5. Полученные таким образом значения подынтегральной функции $W_r(z)$ в узлах обозначены точками G5 на рис. 13. В «расчётной» (наиболее точной) схеме использовались полные матрицы откликов табл. 3 и 4, число узлов в схеме Гаусса (кривые G20 на рис. 13) составляло 20.

Отношения интегралов, полученных в «расчёте» и «эксперименте» (Р/Э), составили 1,026 и 0,982 соответственно для ^{235}U и ^{238}U . Таким образом, масштаб погрешности предложенной схемы интегрирования откликов для калибровки монитора нейтронного потока в диверторе составляет несколько процентов.

Полное число позиций источника в поперечном сечении камеры ИТЭР в предложенной схеме составляет $5 \times 4 = 20$. Количество точек облучения вдоль азимутального контура зависит от типа материала детектора. Для ^{235}U достаточно четырех азимутальных позиций источника, для ^{238}U необходимы 14 позиций на азимутальном контуре. Таким образом, итоговое число экспериментальных точек для первого детектора может составить 80, а для второго — 280.

Таблица 5. Позиции точечного источника (r_{ij}, z_i), рекомендуемые для измерений откликов монитора

Номер узла по z, i	Узлы Гаусса		z_i	Номер узла по r, j	Узлы Гаусса		Границы источника Alite		R_{ij}
	x_i	A_i			x_j	A_j	$R1_i$	$R2_i$	
1	-0,86114	0,34785	-189,7	1	-0,90617	0,23692	463,8	754,6	477,4
				2	-0,53846	0,47862			530,9
				3	0	0,56888			609,2
				4	0,53846	0,47862			687,5
				5	0,90617	0,23692			740,9
2	-0,33998	0,65215	-38,59	1	-0,90617	0,23692	420,7	819,2	439,4
				2	-0,53846	0,47862			512,7
				3	0	0,56888			620,0
				4	0,53846	0,47862			727,2
				5	0,90617	0,23692			800,5
3	0,33998	0,65215	158,5	1	-0,90617	0,23692	420,7	808,4	438,9
				2	-0,53846	0,47862			510,2
				3	0	0,56888			614,6
				4	0,53846	0,47862			719,2
				5	0,90617	0,23692			790,0
4	0,86114	0,34785	309,7	1	-0,90617	0,23692	463,8	722,3	475,9
				2	-0,53846	0,47862			523,4
				3	0	0,56888			593,0
				4	0,53846	0,47862			662,6
				5	0,90617	0,23692			710,1

СРАВНЕНИЕ «ПРЯМОГО» И «ОБРАТНОГО» ПОДХОДОВ К ИНТЕГРИРОВАНИЮ АЗИМУТАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛИКОВ

Как отмечено, в задаче калибровки возможен подход, когда отклик к круговому источнику рассчитывается как отношение отклика монитора в центральной позиции (совпадающей с позицией источника) и коэффициента неравномерности азимутального распределения, полученного из «обратной» зависимости отклика монитора или детектора к точечному источнику. «Обратные» зависимости для детекторов с ^{235}U и ^{238}U рассчитывались с точечным источником в вертикальной плоскости, проходящей через середину монитора нейтронного потока ($\varphi = 0^\circ$), с рекомендованными в табл. 5 узловыми координатами Z_i , R_{ij} в профиле плазмы. В табл. 6 и 7 приведены полученные значения W_N^d откликов детектора в точке $\varphi = 0$, интегрального по азимуту («обратного» распределения) отклика детектора $\bar{W}_p$ и коэффициента неравномерности «обратного» распределения K_φ^d . Отклики нормированы на отклик к штатному объёмному источнику (соответственно $1,28 \cdot 10^{-29}$ дел./н.и./ядроU5 и $0,941 \cdot 10^{-32}$ дел./н.и./ядроU8). Для сравнения в колонке «монитор» даны аналогичные значения для монитора $\bar{W}_r$, полученные двумерной линейной интерполяцией данных табл. 2 и 3 в позициях рекомендованных кольцевых источников.

Как отмечено ранее, эффективность использования «обратного» распределения при калибровке монитора достигается при замене значения коэффициента неравномерности «прямого» азимутального распределения его «обратным» аналогом. Полученные с помощью «обратного» коэффициента неравномерности отклики к круговому источнику обозначены в таблицах как $\bar{W}_r^*$. Отношения этого отклика к точному расчётному значению для кольцевого источника в рекомендованных узлах, приведённые в последней колонке таблиц, позволяют судить об обоснованности концепции «обратной» геометрии. Видно, что для ^{235}U использование «обратного» коэффициента неравномерности азимутального распределения позволяет получить значение отклика к круговому источнику с точностью $\sim 10\%$ во всём диапазоне переменных r, z .

Для ^{238}U «обратное» распределение плохо воспроизводит отклик к кольцевому источнику в нижней части плазмы вследствие наличия щелевого эффекта — резкого увеличения отклика как монитора, так и детектора для некоторых положений точечного источника (помечены жирным шрифтом в табл. 7). Для положений источника, когда купол кассеты перекрывает прострел нейтронов в детектор через щель, согласие между откликом, рассчитанным из «обратного» распределения, и «прямым» откликом аналогично

Т а б л и ц а 6. Сравнение нормированных откликов монитора к круговому источнику и детектора к точечному источнику для ^{235}U

Узел по z, i	$Z_i, \text{см}$	Узел по r, j	$R_{ij}, \text{см}$	Монитор			Детектор			$\overline{W}_r = \frac{W_C^m}{K_\Phi^d}$	$\frac{\overline{W}_r^*}{\overline{W}_r}$
				$\overline{W}_r$	W_C^m	K_Φ^m	$\overline{W}_p$	W_C^d	K_Φ^d		
1	-189,7	1	477,4	1,84	11,1	6,01	1,64	9,79	5,96	1,86	1,01
		2	530,9	1,78	10,8	6,06	1,66	9,33	5,62	1,92	1,08
		3	609,2	1,53	9,10	5,92	1,41	7,39	5,24	1,74	1,13
		4	687,5	1,21	6,73	5,52	1,12	4,93	4,40	1,53	1,25
		5	740,9	0,96	4,04	4,19	1,00	3,90	3,90	1,04	1,08
2	-38,59	1	439,4	1,05	4,72	4,47	0,917	3,91	4,26	1,10	1,05
		2	512,7	1,12	4,84	4,30	1,03	4,12	4,02	1,20	1,06
		3	620,0	1,08	4,14	3,81	0,997	3,84	3,86	1,07	0,99
		4	727,2	1,03	4,02	3,88	0,933	3,35	3,60	1,12	1,08
		5	800,5	1,00	3,84	3,81	0,914	3,05	3,34	1,15	1,14
3	158,5	1	438,9	0,786	2,65	3,38	0,700	2,36	3,37	0,788	1,00
		2	510,2	0,839	2,66	3,18	0,761	2,39	3,15	0,846	1,01
		3	614,6	0,859	2,52	2,94	0,795	2,43	3,06	0,825	0,96
		4	719,2	0,877	2,85	3,25	0,827	2,48	3,01	0,946	1,08
		5	790,0	0,924	3,24	3,51	0,863	2,60	3,02	1,07	1,16
4	309,7	1	475,9	0,752	2,12	2,82	0,695	2,12	3,05	0,696	0,93
		2	523,4	0,766	2,36	3,09	0,714	2,07	2,91	0,814	1,06
		3	593,0	0,799	2,19	2,74	0,752	2,17	2,89	0,759	0,95
		4	662,6	0,889	2,40	2,70	0,784	2,20	2,81	0,855	0,96
		5	710,1	0,849	2,42	2,85	0,823	2,29	2,79	0,867	1,02

Т а б л и ц а 7. Сравнение нормированных откликов монитора к круговому источнику и детектора к точечному источнику для ^{238}U

Узел по z, i	$Z_i, \text{см}$	Узел по r, j	$R_{ij}, \text{см}$	Монитор			Детектор			$\overline{W}_r = \frac{W_C^m}{K_\Phi^d}$	$\frac{\overline{W}_r^*}{\overline{W}_r}$
				$\overline{W}_r$	W_C^m	K_Φ^m	$\overline{W}_p$	W_C^d	K_Φ^d		
1	-189,7	1	477,4	1,69	10,82	6,79	1,99	4,56	2,28	5,04	2,98
		2	530,9	1,68	11,20	6,64	2,19	13,4	6,11	1,83	1,09
		3	609,2	2,34	19,20	8,20					
		4	687,5	2,63	37,20	14,1	3,62	11,4	3,16	11,8	4,47
		5	740,9	1,04	1,909	1,83	0,810	1,89	2,33	0,818	0,78
2	-38,59	1	439,4	0,869	4,280	4,92	0,874	4,56	5,22	0,820	0,94
		2	512,7	0,931	4,580	4,92	1,09	5,16	4,70	0,974	1,05
		3	620,0	0,964	5,479	5,68	1,59	9,59	6,02	0,909	0,94
		4	727,2	1,96	22,09	11,2	3,62	11,4	3,16	6,99	3,55
		5	800,5	2,55	12,50	4,89	2,03	4,28	2,10	5,95	2,32
3	158,5	1	438,9	0,534	2,209	4,13	0,596	2,51	4,21	0,524	0,98
		2	510,2	0,554	2,550	4,60	0,685	2,67	3,89	0,654	1,18
		3	614,6	0,584	2,719	4,65	0,819	3,48	4,25	0,639	1,09
		4	719,2	0,669	3,460	5,17	1,34	7,57	5,61	0,616	0,92
		5	790,0	0,882	5,589	6,33	2,04	11,6	5,66	0,986	1,12
4	309,7	1	475,9	0,423	1,459	3,44	0,519	1,88	3,62	0,403	0,95
		2	523,4	0,434	1,750	4,03	0,556	1,97	3,55	0,492	1,13
		3	593,0	0,437	1,640	3,76	0,615	2,24	3,64	0,450	1,03
		4	662,6	0,496	1,790	3,61	0,706	2,826	4,00	0,447	0,90
		5	710,1	0,469	2,200	4,69	0,809	3,60	4,45	0,494	1,05

полученному в расчётах с ^{235}U . На этом основании предложенный методический подход с использованием «обратного» азимутального распределения можно считать адекватным требованиям калибровки, полученное разногласие «прямого» и «обратного» подходов ~10% — верхней оценкой, поскольку она

включает статистические погрешности двух некоррелированных расчётов азимутальных распределений в несколько процентов (рис. 15).

Рис. 15. «Обратные» азимутальные распределения откликов для ^{235}U (а) и ^{238}U (б)

ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ СОКРАЩЕНИЯ ЧИСЛА ПОЗИЦИЙ ОБЛУЧЕНИЯ

В проведённом анализе реализован строгий подход к определению отклика монитора, характеризующийся для рекомендованных позиций облучения масштабом погрешности собственно интегрирования на уровне нескольких процентов. Число выбранных позиций, хотя и оптимальных, всё ещё велико, и естественным продолжением проведённого анализа было бы исследование возможностей сокращения числа облучений без значительного ущерба для точности калибровки. Сокращение числа точек измерения возможно при использовании двух выявленных особенностей свойств монитора.

Как было показано, можно выбрать эквивалентный кольцевой источник, отклики к которому детекторов с ^{235}U и ^{238}U практически совпадают с откликами к штатному объёмному источнику. Это позволит отказаться от облучений монитора вдоль других контуров, т.е. уменьшить объём измерений в 20 раз. Достаточно провести измерения функции отклика монитора в зависимости от азимутального угла («прямое» распределение в рекомендованных точках) вдоль двух контуров, дающих это совпадение для каждого из делящихся детекторов, а затем вычислить интегральное по углу значение отклика. Один контур с радиусом 720 см на высоте –10 см даёт совпадение отклика для ^{235}U , второй контур с радиусом 560 см на высоте –50 см — для ^{238}U . В таком варианте число точек облучения сократится до 20.

Возможен вариант облучения вдоль общего эквивалентного контура, отклики мониторов с ^{235}U и ^{238}U к которому отличаются от откликов к штатному объёмному источнику всего лишь в пределах 3%. В этом случае для калибровки потребуется всего 14 точек облучения монитора.

Наконец, радикальное сокращение числа точек облучения возможно, если для получения «обратной» азимутальной зависимости отклика, которая близка к «прямой», использовать дополнительные детекторы, размещаемые на диверторных кассетах. Привлекательность такого подхода состоит в том, что для калибровки монитора нет необходимости перемещать источник по азимуту камеры. Для получения «обратной» зависимости потребуется 20 точек облучения в центральном сечении, если полный отклик интегрируется по переменным R и Z в профиле плазмы, или только одно одновременное облучение монитора и обратных детекторов на эквивалентном контуре.

ВЫВОДЫ

Постановка задачи калибровки монитора мощности ИТЭР основывается на схеме численного интегрирования откликов детекторов ^{235}U и ^{238}U к точечным источникам нейтронов 14 МэВ на основе квадратуры Гаусса, характерной для концепции «дорогостоящих» экспериментов. Такой подход позволяет легко контролировать точность интегрирования в зависимости от числа узлов по координатам и таким образом минимизировать число облучений при заданной погрешности полного отклика монитора.

На основе анализа рассчитанного трёхмерного распределения откликов детекторов к точечным и круговым источникам даны рекомендации по выбору позиций точечного источника нейтронов 14 МэВ для калибровки откликов монитора нейтронного потока в диверторе к штатному источнику нейтронов модели ИТЭР Alite. Полное число позиций источника в поперечном сечении камеры ИТЭР в предложенной схеме составляет $5 \times 4 = 20$. Для достижения точности интегрирования азимутального распределения откликов ^{235}U в пределах 2—3% достаточно четырех узлов Гаусса на интервале 0—180°. При той же точности для ^{238}U необходимо не менее 14 узлов. Это обусловлено немонотонным азимутальным распределением откликов ^{238}U , вызванным наличием щелевого эффекта в диверторных кассетах. Таким образом, итоговое число необходимых точек облучения для ^{235}U может составить 80, для ^{238}U — 280. Отношение полных откликов к штатному объёмному источнику, полученных с рекомендованным набором точек облучения и максимальным числом точек по каждой координате (20), составило 1,026 и 0,982 соответственно для ^{235}U и ^{238}U . Это даёт оценку погрешности предложенной схемы интегрирования откликов в несколько процентов.

Для определения откликов к кольцевым источникам могут использоваться «обратные» азимутальные распределения, когда в одном облучении с источником в центральной позиции отклики измеряются дополнительными делящимися детекторами вдоль кольца на уровне монитора. Это позволяет «подменить» «прямые» азимутальные зависимости, для получения которых требуются многократные облуче-

ния в узлах, и таким образом в разы сократить время облучения. Полученное согласие «прямого» и «обратного» подходов к определению полного отклика в пределах ~10% свидетельствует об адекватности этого метода требованиям калибровки.

Проведённый анализ откликов к кольцевым источникам позволил определить положение кольцевого источника, эквивалентного штатному объёмному. Замена облучений в профиле плазмы облучением на этом кольце позволит уменьшить общее число облучений каждого детектора в 20 раз.

REFERENCES

1. **Summary** of the ITER. Final Design Report, July 2001.
2. **Technical** Specifications of the Contract IO/10/4300000212 on R&D Design Procedure for ITER In-situ Neutron Calibration. IDM UID # 3BQSQ6.
3. **Krylov V.I., Shul'gina L.T.** Reference book on numerical integration. — M.: Nauka (Science), 1966, p. 38 (in Russian).
4. **DDD 55.BC** Divertor DNFM, IDM UID # 47LJLH, 22/06/2011.
5. **MCNP-4A** General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A. Ed J.F. Briesmeister. LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1993.
6. **System** Design Description (DDD) of 55B3 Micro Fission Chambers, IDM UID # 3T46BH, 04.10.2010.
7. **55.B4 Neutron** Flux Monitor System in Equatorial Port #7 (Occluded), IDM UID # 3LTSG4, 21.07.2010.
8. **System** Design Description (DDD) Diagnostic Neutron Activation System, IDM UID # 3UYPYF, 01.11.2010.

AUTHORS

Borisov A.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Borisov_AA@nrcki.ru

Deryabina N.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Markovskiy D.V. NRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; markd@nfi.kiae.ru

Received 5 June 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 3, pp. 31—48.