

УДК 621.039.6.6

КАЛИБРОВКА МОНИТОРОВ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ИТЭР. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ СЦЕНАРИЙ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РЕАКТОРЕ

*А.А. Борисов, Н.А. Дерябина, Д.В. Марковский**НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Мгновенная мощность является ключевым параметром реактора ИТЭР. Её мониторинг с точностью несколько процентов представляет актуальную и сложную задачу нейтронной диагностики. В серии статей в ВАНТ (серия Термоядерный синтез), объединённых общим заголовком, поэтапно представлено расчётное нейтронно-физическое обоснование методики калибровки на реакторе ИТЭР для DT- и DD-режимов. Для численного интегрирования откликов детекторов ^{235}U и ^{238}U на точечные источники нейтронов 14 МэВ использована схема квадратур Гаусса, оптимальная для обработки «дорогостоящих» экспериментов. Такой подход позволил контролировать точность интегрирования в зависимости от числа узлов по координатам и, таким образом, минимизировать число облучений при заданной погрешности полного отклика монитора. В предыдущих статьях приведены расчёты по программе MCNP в модели реактора ИТЭР откликов диверторного и бланкетных мониторов на точечные изотропные источники DT- и DD-нейтронов в профиле плазмы, а также на модели реальных источников. Проведённый комплекс нейтронно-физических исследований позволил сформулировать базовые принципы калибровки, оптимальные для достижения максимальной точности при минимальной продолжительности *in situ* экспериментов на реакторе. На их основе в данной статье рекомендованы сценарии предварительной и основной экспериментальной кампаний на реакторе ИТЭР. Калибровки мониторов предлагается проводить только для DT-нейтронов, а для DD-режима использовать поправочные коэффициенты к калибровке для DT-нейтронов. Полную калибровку целесообразно проводить только с камерами ^{235}U , а камеры с ^{238}U калибровать при работе реактора по откликам камер с ^{235}U (кросс-калибровка). Для калибровки монитора в диверторе возможно применение как прямой методики измерений откликов в узловых позициях точечного источника, так и упрощённых методик с использованием концепций эквивалентных кольцевых источников и обратных распределений откликов, что позволит значительно сократить объём измерений. Показано, что монитор, основанный на усреднённых откликах горизонтальной и вертикальной нейтронных камер, обладает пространственной стабильностью при перемещениях источника и может также использоваться дополнительно к штатному монитору на уровне потоков нейтронов в детекторах на четыре порядка величины ниже, чем на первой стенке — области расположения детекторов штатных мониторов. Ввиду низкого фона в области детекторов нейтронных камер их калибровка на реакторе не требуется, поскольку она по существу является определением абсолютной эффективности детектора к нейтронам с энергией 14 МэВ — рядовой процедурой во вне реакторных условиях.

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

CALIBRATION OF ITER INSTANT POWER NEUTRON MONITORS. RECOMMENDED SCENARIO OF EXPERIMENTS ON THE REACTOR

*A.A. Borisov, N.A. Deryabina, D.V. Markovskij**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 with DT- and DD-modes of ITER are step by step considered. A scheme on the basis of Gauss quadrature, optimal for processing of «expensive» experiments is used for the numerical integration of ^{235}U and ^{238}U detector responses to the point sources of 14 MeV neutrons. Such approach allows to control accuracy of the 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. In the previous articles, MCNP calculations in ITER model of the divertor and blanket monitor responses to the point isotropic sources of DT- and DD-neutrons in the plasma profile, as well as to the real models of the sources are considered. The performed neutronics analyses have allowed formulating the basic principles of the calibration, optimal for the maximum accuracy at the minimum duration of *in-situ* experiments on the reactor. On their basis the scenarios of preliminary and basic experimental campaigns on ITER are proposed. The calibrations of monitors are proposed only with DT-neutrons, and for a DD-mode using of correction factors is recommended. The full calibration is performed only with ^{235}U chambers, and the chambers with ^{238}U are to be calibrated at the reactor operation by the responses of chambers with ^{235}U (cross-calibration). The divertor monitor can be calibrated as in direct measurements at Gauss positions of a point source, as by simplified techniques with the use of the concepts of equivalent ring sources and inverse response distributions that will allow reducing duration of the measurements considerably. It is shown that the monitor based on average responses of horizontal and vertical neutron chambers possesses spatial stability at source shifts and can be used in addition to the regular monitor at a level of neutron flux in detectors four order of value lower, than at the first wall — area of the regular detectors location. Due to low background, calibration of the detectors of the neutron chambers in the reactor is not required, as it will consist only in measuring the absolute efficiency of the detector to 14 MeV neutrons which is a standard procedure for out-of-reactor conditions.

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

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-4-55-67

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа подводит итог нейтронно-физическим исследованиям аспектов калибровки мониторов мощности ИТЭР, проведённым по заданию Российского домашнего агентства ИТЭР и Международ-

ной организации ИТЭР: «R&D on Design Procedure for ITER in-situ Neutron Calibration, IO, № 4300000212. Subtask 3: «In-situ calibration plan» [1].

Для расчётного исследования задачи нейтронной калибровки по программе MCNP созданы две модели реактора: модификация базовой модели Alite в азимутальном секторе 40° и новая модель реактора в секторе 360° . В основу методики калибровки нейтронных диагностик с помощью альтернативных квазиточечных изотропных источников DT- или DD-нейтронов была принята схема численного трёхмерного интегрирования откликов детекторов с ^{235}U и ^{238}U с помощью квадратур Гаусса. На основе расчётного анализа трёхмерных распределений откликов детекторов на точечные и круговые источники нейтронов с энергией 14 МэВ и сходимости интегралов от этих распределений в зависимости от числа узлов интегрирования даны рекомендации по выбору позиций точечного источника для калибровки откликов основного монитора нейтронного потока в диверторе (МНПД) и трёх других нейтронных диагностик, расположенных в бланкете: монитора с бериллиевым замедлителем в экваториальном порту № 1 (МНПБ), двух микрокамер деления, установленных на вакуумном корпусе реактора за модулями внешнего бланкета № 12 и № 17 (МКД-1 и МКД-2), и детекторов нейтронной активационной системы (НАС), размещённых в щелях между модулями бланкета в девяти позициях в полоидальном направлении [2, 3]. Расчёты откликов детекторов на кольцевые источники DT-нейтронов выполнены в модели Alite-R с углом раствора 40° , в модели реактора с углом раствора 360° рассчитаны азимутальные зависимости откликов мониторов на точечные изотропные источники со спектрами нейтронов DT и DD и спонтанного деления ^{252}Cf . В выбранных точках расположения идеального точечного источника по азимуту реактора проведены расчёты откликов мониторов на физические модели реальных калибровочных источников (генераторы DT- и DD-нейтронов и радионуклидный источник ^{252}Cf) [4].

На данном заключительном этапе на основе полученных расчётных данных об откликах мониторов сформулированы предложения по сценарию калибровки в предварительной и полной экспериментальных кампаниях на реакторе и даны оценки необходимых времён облучений детекторов мониторов для достижения статистической погрешности откликов $\sim 1\%$. Для планирования экспериментов даны оценки активации материалов нейтронного генератора и его транспортера после 200 ч непрерывного облучения нейтронами и соответствующей мощности биологической дозы в камере реактора после 24 ч выдержки.

В модели реактора с углом раствора 360° , дополненной моделями радиальной и вертикальной нейтронной камер, проанализирована возможность использования сигналов детекторов этих камер для мониторинга мощности реактора и приведена аргументация о нецелесообразности их калибровки на реакторе.

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ КАЛИБРОВКИ МОНИТОРОВ

На основании расчётного анализа нейтронно-физических аспектов калибровки мониторов мощности ИТЭР [2, 3] предложены общие базовые принципы калибровки, оптимальные, по мнению авторов, для достижения максимальной точности при минимальной продолжительности *in situ* экспериментов на реакторе (табл. 1).

Таблица 1. Базовые принципы калибровки мониторов

Принцип калибровки	Обоснование
1	2
Для интегрирования откликов используется схема Гаусса (наивысшей алгебраической точности)	Минимальное число точек локальных измерений откликов для достижения необходимой точности расчёта интегрального отклика на объёмный источник. Легко контролируется точность интегрирования в зависимости от числа координатных узлов
Все калибровки мониторов проводятся только с генератором DT-нейтронов. Калибровки для DD-режима пересчитываются от DT-калибровок к спектру DD-нейтронов	Вследствие большой анизотропии выхода нейтронов из генератора DD-нейтронов прямая калибровка сопряжена с необходимостью учёта больших (десятки процентов) и зависящих от геометрии облучения поправок при переносе результатов калибровочных измерений с нейтронным генератором на случай точечного изотропного источника в плазме. Эти поправки значительно превышают погрешность пересчёта калибровки со спектром источника DT-нейтронов к спектру DD-нейтронов (10—15%) Характерные времена облучения генератором DD-нейтронов более чем на порядок величины превышают длительность облучения генератором DT-нейтронов вследствие более низкой интенсивности DD-генератора Принципиальным недостатком калибровки с изотопным источником ^{252}Cf является большое время облучения (десятки часов) вследствие низкой интенсивности выхода

1	2
<p>Полная калибровка проводится только с камерами ^{235}U. Камеры с ^{238}U калибруются при работе реактора по откликам камер с ^{235}U (кросс-калибровка)</p>	<p>нейтронов ($\sim 10^9$ н/с). Физические достоинства источника ^{252}Cf (изотропия выхода и близость начальных энергий нейтронов ^{252}Cf- и DD-нейтронов) нивелируются необходимостью дистанционного манипулирования источником, его высокой стоимостью и значительным энерговыделением</p> <p>Наличие существенных локальных эффектов в распределениях откликов ^{238}U при перемещениях точечного источника нейтронов по азимутальному углу и по сечению камеры значительно усложняет процедуру интегрирования откликов по объёму натурального источника</p>
<p>Для калибровки монитора в диверторе возможно применение как прямой методики измерений в заданных позициях точечного источника, так и упрощённых методик с использованием концепций эквивалентных кольцевых источников и обратных распределений откликов</p>	<p>Характерные времена облучения детекторов с ^{238}U более чем на порядок величины превышают длительность облучения детекторов с ^{235}U, что на больших угловых расстояниях от источника до детектора приводит к неприемлемо большим временам облучения</p> <p>Калибровка монитора мощности на ИТЭР предоставляет уникальную возможность всесторонней экспериментальной проверки и обоснования для дальнейшего применения не только прямого подхода, но и упрощённых методик калибровки, позволяющих радикально сократить времена облучений</p> <p>Сравнение результатов калибровки МНПД прямым методом и предложенными альтернативными методами позволит повысить надёжность его калибровки в целом</p> <p>Измерения откликов камер монитора МНПБ и микрокамер деления МКД-1 и МКД-2 проводятся только «прямым методом» — облучением точечным источником в рекомендованных позициях по схеме Гаусса</p>
<p>Активационные детекторы калибруются по откликам диверторного монитора при работе ИТЭР (кросс-калибровка)</p>	<p>Диагностическая система, основанная на пакете активационных детекторов, не является монитором мгновенной мощности реактора, поскольку накопленная активность детекторов является функционалом сценария облучения. Вследствие низких уровней равновесных активностей и соответственно больших статистических погрешностей измерений при достижимой интенсивности нейтронного генератора калибровка системы до пуска реактора нецелесообразна. Она может быть проведена при работе реактора по показаниям надёжно калиброванных мониторов мгновенной мощности</p>

В развитие этих принципов далее предложены планы двух кампаний калибровки: предварительной и полной.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ КАЛИБРОВОЧНАЯ КАМПАНИЯ

Основными задачами первой кампании экспериментов на фазе 3 работы реактора длительностью ~ 2 недели являются:

- проверка адекватности аппаратурной реализации калибровки с тем, чтобы выявить её особенности и недостатки, важные для корректировки при подготовке последующего этапа полной калибровки;
- проверка адекватности расчёта ключевых нейтронно-физических функционалов в подтверждение предложенной концепции полной калибровки.

Проверка адекватности аппаратурной реализации калибровки. Предварительные работы вне реактора по подготовке аппаратурной реализации калибровки включают:

- оснащение генератора системой мониторинга выхода нейтронов 14 МэВ;
- абсолютная калибровка выхода нейтронов 14 МэВ из нейтронного генератора с точностью не хуже 2—3%;
- измерение индикатрис выхода нейтронов и скоростей деления ^{235}U и ^{238}U по азимуту и орбитальному углу;
- абсолютная калибровка чувствительности всех участвующих в калибровке камер деления с ^{235}U и ^{238}U к нейтронам 14 МэВ.

Предварительные работы на реакторе по подготовке аппаратурной реализации калибровки включают:

- тестирование функциональных возможностей манипулятора нейтронного генератора и его системы управления;
- определение точности локализации нейтронного генератора с помощью манипулятора (соответствие реального положения мишени генератора её заданным координатам);
- выбор угловых позиций для размещения обратных детекторов в реальной геометрии реактора с учётом расчётных рекомендаций.

Проверка адекватности расчёта ключевых функционалов диверторного монитора. Конфигурации и длительности облучений следующие.

1. Мишень генератора ДТ-нейтронов находится на эквивалентном кольце ($r = 680$ см, $z = -10$ см) в центральной угловой позиции (диверторный порт № 2 — напротив диверторного монитора).

Измеряются отклики штатных диверторных мониторов с камерой деления ^{235}U в портах № 2, 8 и 14 и обратного (по тороидальному обходу) распределения скоростей деления с фольгами ^{235}U .

Предполагаемое время облучения 1 сут.

Результат — тестирование базовых откликов монитора и характерных времён облучения в центральной и удалённых позициях, соотношения откликов в прямом и обратном облучениях.

2. Мишень генератора ДТ-нейтронов находится на эквивалентном кольце ($r = 680$ см, $z = -10$ см) в угловой позиции, удалённой по азимуту от монитора на $+120^\circ$ (диверторный порт № 8 — напротив диверторного монитора).

Измеряются отклики штатных диверторных мониторов с камерой деления ^{235}U в портах № 2, 8 и 14 и обратного (по тороидальному обходу) распределения скоростей деления с фольгами ^{235}U .

Предполагаемое время облучения 1 сут.

Результат — тестирование базовых откликов монитора и характерных времён облучения в центральной и удалённых по азимуту позициях, соотношения откликов в прямом и обратном облучениях.

3. Мишень генератора ДТ-нейтронов находится на эквивалентном кольце ($r = 680$ см, $z = -10$ см) в угловой позиции, удалённой по азимуту от монитора на -120° (диверторный порт № 14 — напротив диверторного монитора)¹.

Измеряется отклик штатного диверторного монитора с ^{235}U .

Предполагаемое время облучения 1 сут.

Результат — тестирование базовых откликов монитора и характерных времён облучения в центральной и удалённых по азимуту позициях, соотношения откликов в прямом и обратном облучениях.

4. Мишень генератора ДТ-нейтронов находится в центральной угловой позиции (диверторный порт № 2 — напротив диверторного монитора) в четырёх позициях по высоте и по радиусу, смещённых на ± 50 см относительно положения эквивалентного кольца.

Измеряются отклики штатного диверторного монитора с ^{235}U .

Предполагаемое время облучения 4 сут.

Результат — тестирование радиального и высотного распределений откликов и диапазонов пространственной стабильности по радиусу и высоте.

Проверка адекватности расчёта ключевых функционалов МНПБ, МКД-1 и МКД-2. Конфигурации и длительности облучений:

— тестирование характерного времени облучения камеры монитора МНПБ в порту № 1 с источником в центральном сечении и в наиболее удалённой по азимуту позиции ($\sim 120^\circ$). Предполагаемое время облучения 2 сут;

— тестирование характерного времени облучения двух микрокамер деления МКД-1 и МКД-2 в порту № 1 с источником в центральном сечении и в наиболее удалённой по азимуту позиции ($\sim 120^\circ$).

Предполагаемое время облучения 2 сут.

ПОЛНАЯ КАЛИБРОВОЧНАЯ КАМПАНИЯ

Для калибровки диверторного монитора МНПД [2] предлагаются следующие этапы облучений прогрессирующей сложности:

— одно облучение монитора в позиции источника на эквивалентном кольце напротив монитора и одновременно набора детекторов обратного распределения вдоль азимута камеры;

— три облучения монитора в позициях источника на эквивалентном кольце, соответствующих 3-точечному интегрированию по Гауссу по контуру камеры в пределах азимутального угла $0\text{—}180^\circ$;

¹ При дефиците времени в предварительной кампании этот пункт может быть опущен при условии выполнения пункта 2.

— 20 облучений монитора в позициях источника в 20 узлах Гаусса в профиле плазмы напротив монитора и одновременно набора детекторов обратного распределения вдоль азимута камеры;

— 60 облучений монитора в позициях источника в 20 узлах Гаусса в профиле плазмы и трёх узлах по контуру камеры в пределах азимутального угла 0—180°.

Как показали расчёты, несмотря на значительно меньшую сложность по сравнению с подробной схемой интегрирования, более простые схемы, основанные на выявленной расчётным путём эквивалентности плазменного шнура круговому источнику и точечного азимутального распределения откликов обратному распределению, также способны обеспечить точность калибровки в соответствии с заданными требованиями (в пределах нескольких процентов). С методической точки зрения в целях выработки общего подхода к калибровке монитора мощности в термоядерных установках целесообразно выполнение всего указанного комплекса измерений, тем более что большая его часть преемственна в различных этапах.

Полная схема численного интегрирования по Гауссу отклика диверторного монитора МНПД на объёмный источник в плазме предусматривает измерение распределений:

- по азимуту (получение отклика на круговой источник);
- по радиусу;
- по высоте.

Для достижения точности интегрирования азимутальной функции отклика ^{235}U в пределах 2—3% достаточно трёх узлов Гаусса на интервале 0—180°. Для интегрирования вкладов от круговых источников нейтронов в поперечном сечении плазмы с точностью 1—2% рекомендованы пять узлов по радиусу и четыре узла по высоте. Указанная схема интегрирования («прямая») предполагает фиксацию источника нейтронов в 20 точках в полоидальном сечении и в трёх точках по контуру камеры в пределах азимутального угла 0—180°. Общее число облучений составляет 60. Координаты позиций источника по этой схеме приведены в [2, 3].

В случае использования для интегрирования по азимуту «обратных» распределений откликов отпадает необходимость облучений в азимутальных узлах, и общее число облучений, таким образом, может быть уменьшено до 20. Проведённые расчётные исследования не свидетельствуют о существенной потере точности интегрирования при использовании «обратных» распределений. Более того, коррелированность обратного распределения (одновременное измерение в одном облучении) повышает точность интегрирования по сравнению с «прямой» схемой вследствие меньшей статистической погрешности измерения распределения.

С учётом изложенного целесообразно выбрать такую последовательность калибровки, чтобы на первом этапе облучений получить в узлах центрального сечения камеры отклики на все позиции источника как штатного монитора, так и трёх обратных детекторов, распределённых в узлах интегрирования по азимутальному углу. На следующем этапе при проведении облучений по азимутальному углу для каждой такой позиции поперечного сечения появится возможность сравнения прямой и обратной азимутальной зависимостей. Анализ полученных результатов позволит уточнить необходимость дальнейших облучений в азимутальных узлах.

Оценки минимальных длительностей облучения для достижения точности счёта порядка $\varepsilon = 1/\sqrt{N} = 1\%$ в рекомендованных позициях источника приведены в табл. 2. В угловой позиции 20° суммарное время облучения монитора нейтронного потока в диверторе в 20 точках поперечного сечения камеры составляет ~1,5 мин, в позиции 90° — ~8,2 и в 160° — ~35,2 мин. Таким образом, чистое время эксперимента для калибровки монитора нейтронного потока в диверторе с ИК, содержащей 300 мг ^{235}U , составит ~45 мин.

Т а б л и ц а 2. Минимальная длительность t_i облучения диверторного монитора с 300 мг ^{235}U в рекомендованных позициях точечного источника r_i, z_i

Φ_i , град.	z_i , см				t_i , мин				Сумма t_i , мин
	-190	-38,6	159	310					
	r_i , см								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	477	439	439	476	0,029	0,068	0,101	0,079	0,277
	531	513	510	523	0,035	0,059	0,097	0,107	0,298
	609	620	615	593	0,041	0,070	0,104	0,113	0,328

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
90	688	727	719	663	0,049	0,070	0,090	0,102	0,311
	741	800	790	710	0,076	0,072	0,080	0,100	0,328
	477	439	439	476	0,487	0,366	0,379	0,533	1,76
	531	513	510	523	0,488	0,403	0,415	0,444	1,75
	609	620	615	593	0,456	0,360	0,436	0,415	1,66
	688	727	719	663	0,357	0,380	0,377	0,494	1,60
160	741	800	790	710	0,439	0,317	0,327	0,383	1,46
	477	439	439	476	1,90	2,12	2,45	1,65	8,12
	531	513	510	523	1,78	1,87	2,02	1,69	7,36
	609	620	615	593	1,56	2,30	1,82	1,93	7,61
	688	727	719	663	1,33	1,50	1,75	1,50	6,08
	741	800	790	710	1,64	1,36	1,32	1,75	6,07

Схема измерений при калибровке мониторов МНПБ, МКД-1 и МКД-2. Рекомендуемые на основании проведённого анализа позиции точечного источника в профиле плазмы для калибровки откликов бланкетных мониторов МНПБ, МКД-1 и МКД-2 представлены в [2]. Число позиций источника в предложенной схеме составляет $5 \times 6 = 30$. Поскольку использование для рассматриваемых мониторов «обратных» азимутальных зависимостей откликов, рассмотренных ранее для диверторного монитора МНПД, невозможно, полное число позиций расположения точечного источника равно произведению числа позиций источника в поперечном сечении камеры и числа азимутальных позиций (формула (6) в [2]).

Приведённые оценки времён облучения в табл. 3—5 соответствуют «прямому» подходу, когда одинаково ограничена относительная статистическая погрешность определения откликов в каждом из узлов интегрирования по схеме Гаусса. Как следует из табл. 4, 5, это приводит к неприемлемо длительным временам облучения мониторов МКД-1 и МКД-2 с низким содержанием ^{235}U в камерах деления в удалённых по азимуту положениях от источника.

Таблица 3. Минимальная длительность t_i облучения бланкетного монитора МНПБ в рекомендованных позициях точечного источника r_i, z_i

φ_i , град.	z_j , см						t_i , мин					
	-210	-131	-9	129	251	330						
	r_i , см											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5,2	476	468	439	439	457	485	0,284	0,202	0,14	0,116	0,152	0,16
	525	527	512	512	519	526	0,296	0,210	0,138	0,114	0,154	0,176
	598	614	620	620	609	587	0,324	0,230	0,130	0,108	0,168	0,218
	670	701	727	727	699	648	0,374	0,282	0,112	0,104	0,22	0,252
	720	761	800	800	760	690	0,392	0,35	0,110	0,128	0,268	0,244
25	476	468	439	439	457	485	0,568	0,404	0,280	0,232	0,302	0,318
	525	527	512	512	519	526	0,588	0,418	0,276	0,228	0,308	0,352
	598	614	620	620	609	587	0,646	0,460	0,258	0,214	0,336	0,436
	670	701	727	727	699	648	0,746	0,564	0,226	0,208	0,44	0,502
	720	761	800	800	760	690	0,782	0,70	0,218	0,258	0,536	0,488
58	476	468	439	439	457	485	0,962	0,686	0,476	0,394	0,514	0,538
	525	527	512	512	519	526	0,998	0,708	0,466	0,386	0,522	0,598
	598	614	620	620	609	587	1,09	0,78	0,438	0,364	0,57	0,738
	670	701	727	727	699	648	1,26	0,956	0,382	0,352	0,744	0,85
	720	761	800	800	760	690	1,32	1,18	0,37	0,436	0,908	0,828
95	476	468	439	439	457	485	3,46	2,48	1,71	1,42	1,85	1,94
	525	527	512	512	519	526	3,6	2,56	1,68	1,39	1,88	2,14
	598	614	620	620	609	587	3,94	2,8	1,58	1,31	2,04	2,66
	670	701	727	727	699	648	4,56	3,44	1,37	1,27	2,68	3,06
	720	761	800	800	760	690	4,78	4,28	1,33	1,57	3,26	2,98
127	476	468	439	439	457	485	34,2	24,4	16,9	14,0	18,3	19,2
	525	527	512	512	519	526	35,6	25,2	16,6	13,7	18,6	21,2
	598	614	620	620	609	587	39,0	27,8	15,6	13,0	20,2	26,2
	670	701	727	727	699	648	45,2	34,0	13,6	12,5	26,6	30,4
	720	761	800	800	760	690	47,2	42,2	13,2	15,5	32,4	29,6

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
148	476	468	439	439	457	485	59,4	42,2	29,2	24,2	31,6	33,2
	525	527	512	512	519	526	61,6	43,6	28,8	23,8	32,2	36,8
	598	614	620	620	609	587	67,6	48,0	27,0	22,4	35,0	45,4
	670	701	727	727	699	648	78,0	59,0	23,4	21,6	45,8	52,4
	720	761	800	800	760	690	81,6	73,2	22,8	26,8	56,0	51,0

Т а б л и ц а 4. Минимальная длительность t_i облучения микрокамеры деления МКД-1 в рекомендованных позициях точечного источника r_i, z_i

φ_i , град.	z_p , см						t_i , мин					
	-210	-131	-9	129	251	330						
	r_i , см											
5,2	476	468	439	439	457	485	71,8	61,3	47,7	42,0	45,1	64,2
	525	527	512	512	519	526	74,1	63,3	47,2	38,4	41,0	61,8
	598	614	620	620	609	587	81,1	71,0	53,0	33,1	31,7	56,8
	670	701	727	727	699	648	94,7	89,6	77,7	41,9	18,4	51,2
	720	761	800	800	760	690	100	105	110	78,9	17,2	42,9
25	476	468	439	439	457	485	143	122	95,2	83,9	90,0	128
	525	527	512	512	519	526	147	126	94,2	76,7	81,9	123
	598	614	620	620	609	587	162	141	105	66,1	63,2	113
	670	701	727	727	699	648	189	178	155	83,7	36,8	102
	720	761	800	800	760	690	201	211	220	157	34,4	85,7
58	476	468	439	439	457	485	242	207	161	142	152	217
	525	527	512	512	519	526	250	214	159	130	138	209
	598	614	620	620	609	587	274	240	179	112	107	192
	670	701	727	727	699	648	320	303	262	141	62,3	173
	720	761	800	800	760	690	340	358	373	266	58,2	145
95	476	468	439	439	457	485	877	748	582	513	551	784
	525	527	512	512	519	526	905	773	577	469	501	755
	598	614	620	620	609	587	991	868	648	404	387	694
	670	701	727	727	699	648	1157	1095	949	512	225	625
	720	761	800	800	760	690	1230	1293	1348	964	210	524
127	476	468	439	439	457	485	8680	7408	5765	5083	5450	7764
	525	527	512	512	519	526	8960	7648	5709	4648	4959	7477
	598	614	620	620	609	587	9810	8587	6414	4001	3830	6871
	670	701	727	727	699	648	11 446	10 835	9390	5070	2226	6185
	720	761	800	800	760	690	12 174	12 797	13 337	9536	2081	5190
148	476	468	439	439	457	485	15 001	12 802	9963	8784	9419	13 417
	525	527	512	512	519	526	15 485	13 217	9865	8032	8569	12 922
	598	614	620	620	609	587	16 954	14 839	11 085	6915	6619	11 875
	670	701	727	727	699	648	19 780	18 725	16 227	8761	3847	10 688
	720	761	800	800	760	690	21 038	22 116	23 047	16 480	3596	8969

Таблица 5. Минимальная длительность t_i облучения микрокамеры деления МКД-2 в рекомендованных позициях точечного источника r_i, z_i

φ_i , град.	z_j , см						t_i , мин					
	-210	-131	-9	129	251	330						
	r_i , см											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5,2	476	468	439	439	457	485	31,2	24,0	23,4	27,8	34,5	40,1
	525	527	512	512	519	526	29,1	21,4	22,0	28,9	34,8	41,4
	598	614	620	620	609	587	24,1	16,6	20,9	32,2	40,4	43,5
	670	701	727	727	699	648	17,3	12,2	28,3	42,8	47,8	46,3
	720	761	800	800	760	690	15,1	10,9	47,6	54,0	52,4	48,1
25	476	468	439	439	457	485	62,3	47,8	46,8	55,5	68,8	80,0
	525	527	512	512	519	526	58,0	42,7	44,0	57,8	69,5	82,6
	598	614	620	620	609	587	48,1	33,2	41,7	64,4	80,6	86,9
	670	701	727	727	699	648	34,5	24,4	56,4	85,4	95,5	92,4
	720	761	800	800	760	690	30,1	21,7	95,0	107	104	96,0
58	476	468	439	439	457	485	105,5	81,0	79,3	94,1	116	135
	525	527	512	512	519	526	98,3	72,3	74,5	97,9	117	140
	598	614	620	620	609	587	81,6	56,3	70,8	109	136	147
	670	701	727	727	699	648	58,5	41,3	95,6	144	161	156
	720	761	800	800	760	690	51,1	36,7	161	182	177	162
95	476	468	439	439	457	485	381	292	286,5	340	421	490
	525	527	512	512	519	526	355	261	269,3	353	425	505

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
127	598	614	620	620	609	587	294	203	255,6	394	493	532
	670	701	727	727	699	648	211	149	345,4	522	584	565
	720	761	800	800	760	690	184	132	581,6	659	640	587
	476	468	439	439	457	485	3771	2896	2834	3363	4167	4849
	525	527	512	512	519	526	3514	2585	2664	3499	4209	5004
	598	614	620	620	609	587	2914	2010	2528	3899	4885	5264
148	670	701	727	727	699	648	2091	1476	3417	5171	5782	5595
	720	761	800	800	760	690	1825	1313	5753	6525	6340	5813
	476	468	439	439	457	485	6516	5005	4897	5812	7202	8379
	525	527	512	512	519	526	6073	4467	4603	6046	7274	8649
	598	614	620	620	609	587	5036	3474	4370	6738	8442	9097
	670	701	727	727	699	648	3614	2551	5905	8936	9993	9670
	720	761	800	800	760	690	3154	2269	9943	11 277	10 956	10 047

Ранее в работе [3] было показано, что более рациональным является «взвешенный» подход, в котором ограничивается не относительная погрешность определения локальных откликов, а относительная погрешность определения интеграла от распределения. Допустимая относительная погрешность определения отклика в индивидуальной угловой позиции в этом случае обратно пропорциональна его вкладу в интеграл и может быть намного больше погрешности определения интеграла в целом. Это позволит значительно уменьшить время облучения удалённых мониторов без снижения точности расчёта интеграла.

РАДИАЦИОННЫЙ ФОН ОТ НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Для анализа радиационной обстановки в конце экспериментальной кампании вблизи нейтронного генератора (НГ) была принята модель генератора, расположенная в модели реактора с углом раствора 360° в горизонтальной плоскости параллельно оси Y [4] с центром мишени в точке $(680, 0, -10)$. Потоки нейтронов для интенсивности источника 10^{11} н/с, рассчитанные в 100-групповой энергетической шкале во всех элементах модели, использовались в расчёте по программе FISPACT [11] активации материалов конструкции НГ и манипулятора в течение непрерывного облучения 200 ч, соответствующего ресурсу мишени. Транспорт γ -излучения рассчитывался в исходной геометрической модели для MCNP с радиоактивными источниками после 24 ч выдержки. Результаты расчёта потока γ -квантов пересчитывались в эквивалентную биологическую мощность дозы согласно стандарту ANSI/ANS-6.1.1-1977.

На рис. 1 показаны распределения мощности дозы в камере реактора на высоте $Z = -10$ см: вдоль оси X в плоскостях $PY = 0$ см и $PY = 100$ см (а) и вдоль оси Y в плоскости $PX = 680$ см (б). Видно, что за границей сферы радиусом 1 м вокруг НГ мощность дозы спадает на четыре порядка величины в сравнении с зоной мишенного узла и не превышает 15 мкЗв/ч.

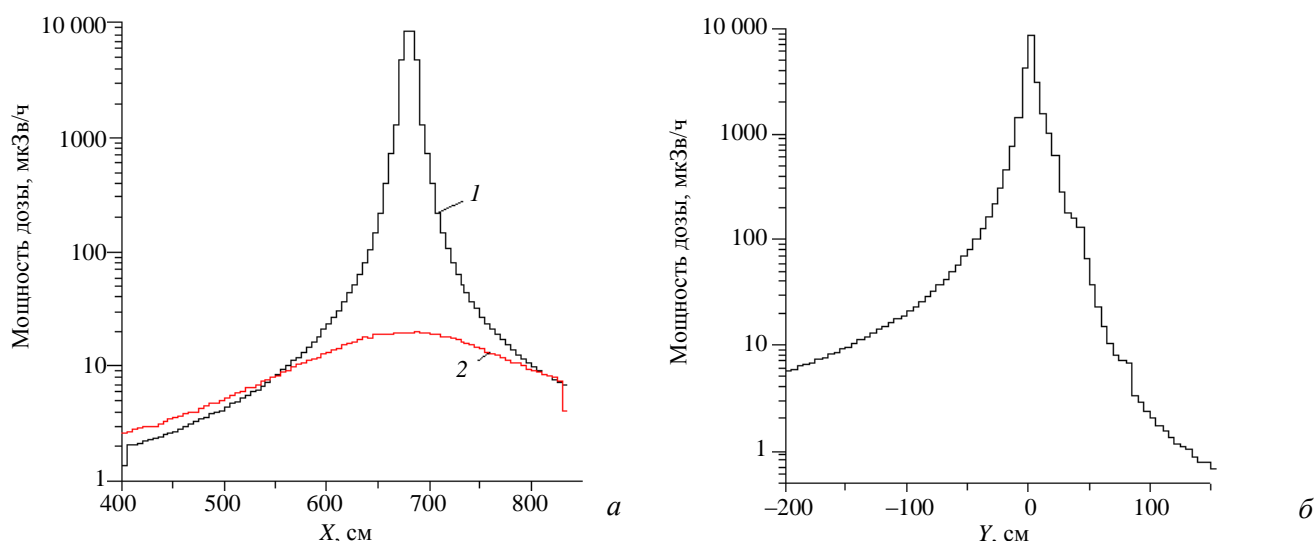


Рис. 1. Мощность дозы в камере реактора после 24 ч выдержки материалов НГ, работавшего 200 ч с интенсивностью 10^{11} н/с: а — $PY = 0$ см (1) и $PY = 100$ см (2), $Z = -10$ см; б — $PX = 680$ см, $Z = -10$ см

НЕЙТРОННЫЕ КАМЕРЫ В КАЧЕСТВЕ МОНИТОРА МОЩНОСТИ

Известно, что основным назначением горизонтальной и вертикальных нейтронных камер ИТЭР является регистрация хордовых потоков нейтронов из плазмы, используемых для восстановления образа двумерного распределения плотности термоядерных реакций. Однако детекторы нейтронных камер можно использовать и в качестве вспомогательного монитора мощности ИТЭР, поскольку они «видят» всю плазму. При перемещении плазменного шнура относительно системы коллиматоров имеет место эффект компенсации величины полного (среднего) потока в системе коллиматоров, когда фрагменты источника, покидающие поле зрения одного коллиматора, попадают в поле зрения другого. Поэтому суммарный отклик нейтронных камер должен слабо зависеть от формы и положения источника первичных нейтронов.

Вертикальная нейтронная камера (ВНК) в диверторном порту № 14 ИТЭР. Она представляет собой защитную сборку (рис. 2) с блоком из шести цилиндрических детекторов высотой 30 см и диаметром 4,4 см. Пять детекторов «видят» плазму через каналы коллиматоров диаметром 3,5 см, координаты которых приведены в табл. 6. Шестой детектор не имеет коллиматора.

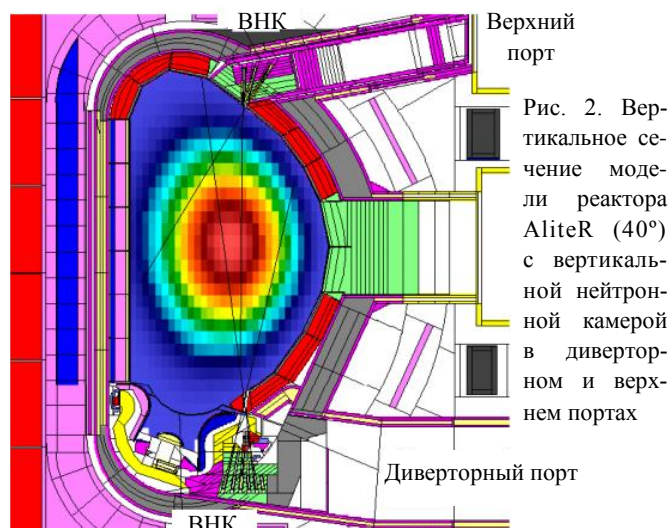


Рис. 2. Вертикальное сечение модели реактора AliteR (40°) с вертикальной нейтронной камерой в диверторном и верхнем портах

Таблица 6. Геометрические параметры коллиматоров модели диверторной ВНК в модели реактора AliteR

Угол наклона оси канала к оси +X, град.	Координаты пересечения оси канала с дном детектора, см	
	X	Z
76,0	612,6	-502,2
81,0	633,3	-502,8
86,2	651,7	-503,1
92,3	669,7	-503,1
98,0	686,7	-502,8
98,0	701,8	-502,8

Оси коллиматоров лежат в вертикальной плоскости симметрии модернизированной модели AliteR с углом раствора 40°. В модуле бланкета реактора и в теле диагностической кассеты коллиматоры ВНК продолжены сквозными каналами радиусом 1,75 см. В теле диверторной кассеты в её верхней части каналы коллиматоров объединены прямоугольной полостью шириной 1,75 см.

Вертикальная нейтронная камера в верхнем порту № 18. Эта камера состоит из двух стальных детекторных блоков, установленных в защитном диагностическом модуле. Каждый блок имеет три детекторных объема высотой 30 см и внутренним радиусом 2,2 см, в которые нейтронное излучение плазмы попадает через пустые каналы коллиматоров диаметром 3,5 см. Оси каналов коллиматоров и оси детекторных объемов каждого блока лежат в плоскостях, нормальных оси Y реактора, но смещённых от плоскости симметрии модели на 8,5 см в противоположные стороны. Углы наклона осей коллиматоров и их опорные точки в модели приведены в табл. 7.

На рис. 2 показаны границы области плазмы, видимой детекторами обеих вертикальных нейтронных камер.

Таблица 7. Геометрические параметры коллиматоров модели верхней ВНК в модели реактора AliteR

Детекторный блок	№ детектора	Координата пересечения оси коллиматора с дном детектора, см			Угол наклона оси коллиматора к оси +Z, град.
		X	Y	Z	
А	1	659,3	-8,5	477,3	1,6
	3	686,6	-8,5	481,1	15,9
	5	723,4	-8,5	486,2	32,1
Б	2	671,9	8,5	478,9	8,13
	4	704,4	8,5	483,4	24,5
	6	747,4	8,5	491,9	39,39

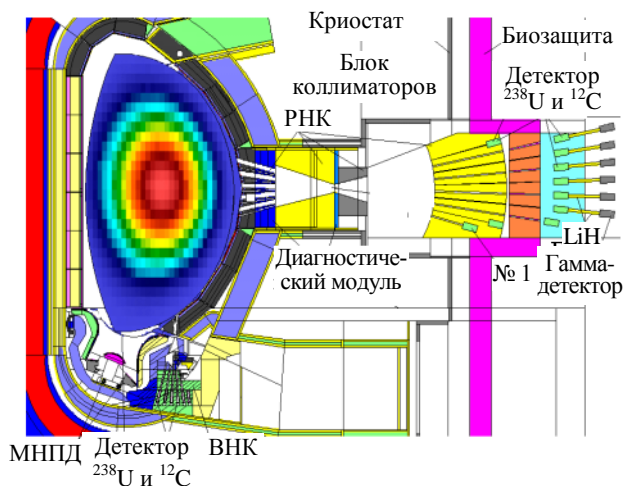


Рис. 3. Вертикальное сечение модели Alite-CND (совмещено: реактор $PY = 10$ и дивертор $PY = 0$)

Радиальная нейтронная камера (РНК, рис. 3). Камера состоит из восьми внутренних каналов радиусом 2,5 см в крайнем диагностическом модуле и 20 внешних каналов в центральном модуле экваториального порта № 1. Внешние каналы сгруппированы в два пучка по 10 коллиматоров в двух параллельных плоскостях XZ с координатами $Y = 10$ см и $Y = -7$ см. В зоне порта каналы объединены сужающейся по вертикали полостью. Фокусы двух наборов каналов расположены в плоскости YZ , $X = 1047$ см на высоте $Z = 62$ см.

Геометрические параметры каналов РНК приведены в табл. 8. Ось канала № 10 в плоскости $PY = 10$ см в точке фокуса пересекает ось X под углом $13,6^\circ$ и является верхней осью в модели, ось канала № 1 пересекает ось X под углом $-17,0^\circ$ и является нижней осью. В защитном модуле экваториального

порта каналы коллиматоров имеют радиус R_1 , в коллиматоре радиус канала — R_2 .

Таблица 8. Геометрические параметры каналов РНК

№ канала	$PY = 10$ см			$PY = -7$ см		
	Угол к оси $+X$, град.	R_1 , см	R_2 , см	Угол к оси $+X$, град.	R_1 , см	R_2 , см
1	-17,0	2,0	0,5	-15,3	6,5	2,0
2	-13,6	6,5	2,0	-11,9	2,0	0,5
3	-10,2	2,0	0,5	-8,5	6,5	2,0
4	-6,8	6,5	2,0	-5,1	2,0	0,5
5	-3,4	2,0	0,5	-1,7	6,5	2,0
6	0	6,5	2,0	1,7	2,0	0,5
7	3,4	2,0	0,5	5,1	6,5	2,0
8	6,8	6,5	2,0	8,5	2,0	0,5
9	10,2	2,0	0,5	11,9	6,5	2,0
10	13,6	6,5	2,0	15,3	2,0	0,5

Отклики ВНК и РНК на штатный источник нейтронов реактора. Поскольку вклады фоновых нейтронов в хордовый поток первичных нейтронов в детекторе канала нейтронной камеры малы, задача определения хордового потока сводится к интегрированию вкладов от штатного объёмного источника, распределённого в конусе коллиматора, в заданной геометрической конфигурации канала в реакторе. Потоки нейтронов в каналах коллиматоров камер рассчитывались по специально разработанной программе численного интегрирования потока нейтронов в точке расположения детектора от источников вдоль луча коллиматора, пересекающего штатный источник модели реактора A-lite, заданный в сечении r, z матрицей ячеек 40×40 . Скорости детектирующих реакций получены умножением потока на сечения деления ионизационных камер при соответствующей энергии первичных нейтронов.

На рис. 4—6 показаны распределения хордовых потоков и их средних значений в 10 коллиматорах радиальной нейтронной камеры с радиусом отверстия 2 см и коллиматорах нижней и верхней верти-

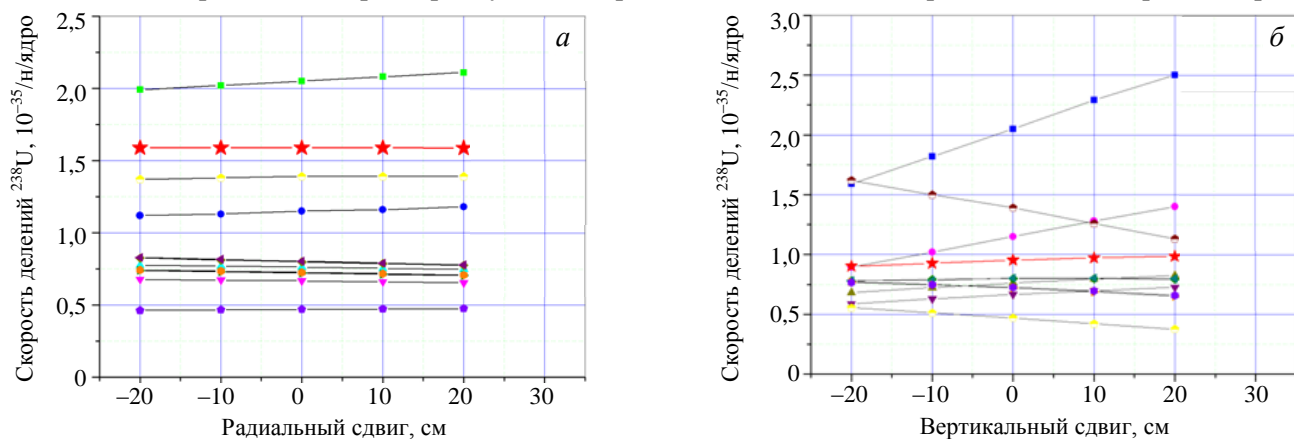


Рис. 4. Зависимость откликов радиальной камеры с коллиматорами радиусом 2 см от радиального (а: ■ — канал 1; ● — 2; ▲ — 3; ▼ — 4; ◆ — 5; ◀ — 6; ▶ — 7; ○ — 8; ● — 9; ■ — 10; ★ — среднее) и вертикального (б: ■ — канал 1; ● — 2; ▲ — 3; ▼ — 4; ◆ — 5; ◀ — 6; ▶ — 7; ○ — 8; ● — 9; ■ — 10; ★ — среднее) сдвигов штатного источника нейтронов

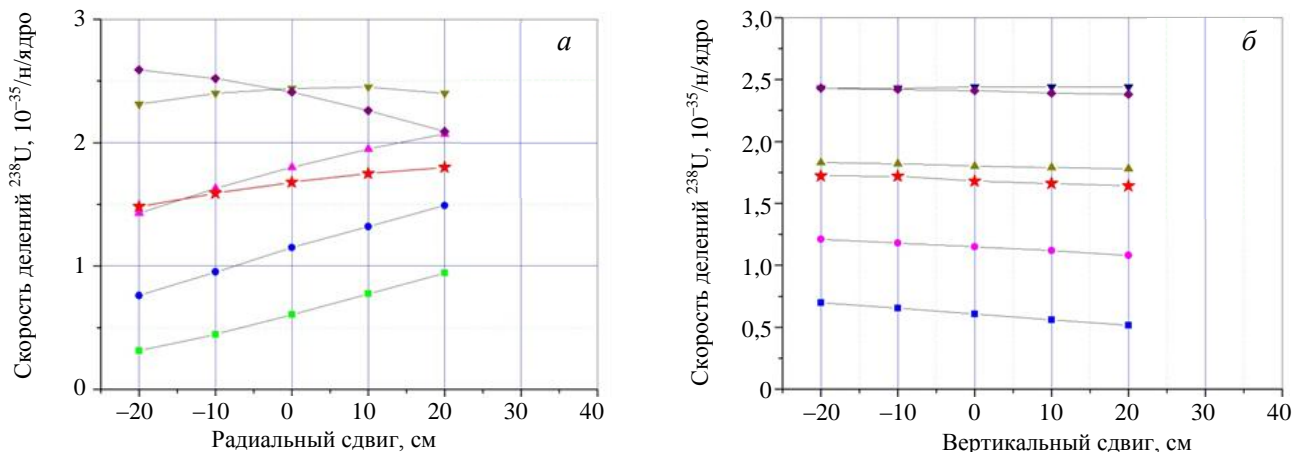


Рис. 5. Зависимость откликов нижней вертикальной камеры от радиального (а: ■ — канал 1; ● — 2; ▲ — 3; ▼ — 4; ◆ — 5; ★ — среднее) и вертикального (б: ■ — канал 1; ● — 2; ▲ — 3; ▼ — 4; ◆ — 5; ★ — среднее) сдвигов штатного источника нейтронов

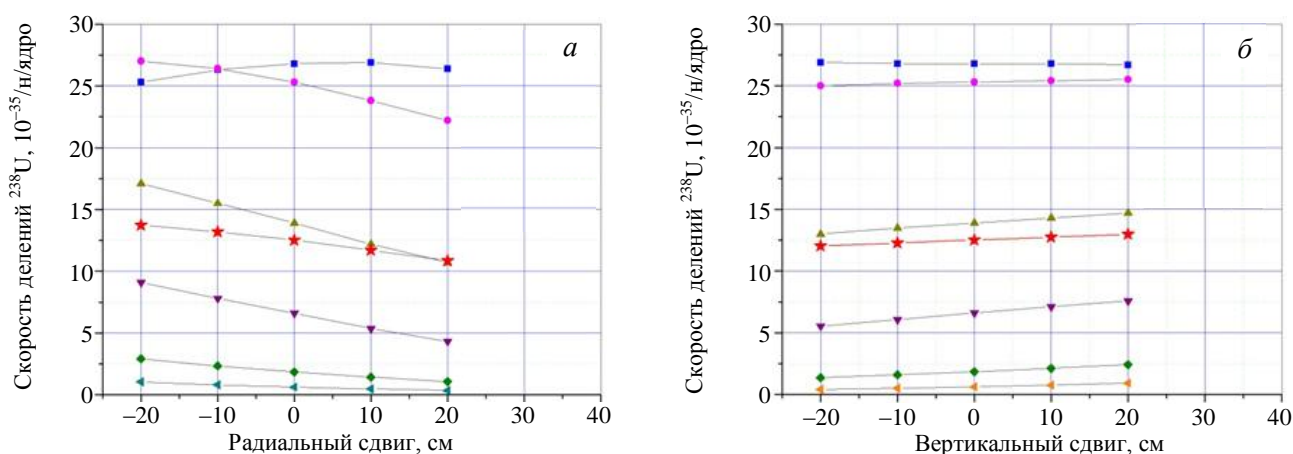


Рис. 6. Зависимость откликов верхней вертикальной камеры от радиального (а) и вертикального (б) сдвигов штатного источника нейтронов: ■ — канал 1; ● — 2; ▲ — 3; ▼ — 4; ◆ — 5; ◀ — 6; ★ — среднее

кальных камер при радиальном и вертикальном перемещениях штатного источника относительно его центрального положения. Виден эффект компенсации среднего потока по камерам, каждая из которых по-своему чувствительна к перемещению шнура. При радиальном перемещении шнура в пределах ±20 см на рис. 4 хордовые потоки в РНК изменяются незначительно. В то же время при вертикальном сдвиге распределение потоков по сканирующим коллиматорам перемещается подобным образом вдоль направления движения источника. В вертикальных камерах наблюдается обратная картина. Таким образом, монитор, основанный на усреднённых откликах горизонтальной и вертикальной нейтронных камер, обладает пространственной стабильностью при перемещениях источника и может использоваться наравне с штатным монитором при уровне потоков нейтронов в детекторах на четыре порядка величины ниже, чем на первой стенке — области расположения детекторов штатных мониторов.

О целесообразности калибровки детекторов нейтронных камер. Хордовые потоки нейтронных камер формируются каналами коллиматоров и за вычетом малого вклада рассеянных нейтронов представляют собой поток первичных нейтронов, суммарно созданный изотропными источниками нейтронов в объёме плазмы внутри конуса коллиматора. Интенсивность хордового потока определяется положением детектора коллиматора относительно плазмы (обратно пропорциональна квадрату расстояния до точек источника), углом раствора конуса коллиматора с вершиной в точке детектора (длина и диаметр канала) и углом сканирования плазмы данной хордой.

В идеальном случае, когда вклад рассеянных нейтронов мал, а абсолютная эффективность регистрации детектором термоядерных нейтронов известна, отклик калиброванного детектора (хордовый поток) даёт абсолютную информацию о «светимости» интегрального источника первичных нейтронов внутри конуса коллиматора. При отсутствии фонового вклада рассеянных нейтронов экспериментальная калибровка хордового потока с квазиточечным источником нейтронов на реакторе не требуется, поскольку

при известной эффективности регистрации термоядерных нейтронов детектором абсолютная величина хордового потока, создаваемого точечным источником, определяется по простой формуле. Более того, в случае проведения экспериментальной калибровки на её погрешности неизбежно скажутся неопределённости конфигурации облучения (анизотропия выхода нейтронов из источника, рассеяние нейтронов окружающими конструкциями и т.д.).

Калибровка нейтронных камер с точечным источником нейтронов может быть актуальна, если есть необходимость экспериментальной оценки относительных величин поправок на вклады фоновых нейтронов в показания детекторов. Можно выделить три возможных категории фона: нейтроны, отражённые в канал коллиматора от первой стенки, противоположной каналу реактора, первичные нейтроны, рассеянные вдоль канала коллиматора, и нейтроны, попавшие в детектор из окружающих его конструкций. Благоприятным обстоятельством для ограничения вкладов фоновых нейтронов являются высокие пороги реакций регистрации их детекторами нейтронных камер: $^{238}\text{U}(n, f)$ (~0,5 МэВ) и $^{12}\text{C}(n, \alpha)$ (~8 МэВ).

Расчёты упрощённых моделей пустого канала из защитного материала, имитирующего коллиматор, с отражателем, имитирующим противоположную стенку камеры, показали, что вклад нейтронов, рассеянных в детектор канала отражателем, во всех случаях практически равен нулю (не превышает десятые доли процента).

Вклад первичных нейтронов, рассеянных вдоль канала коллиматора, зависит от конфигурации канала. В узком и длинном канале № 5 радиальной камеры с радиусом внутреннего отверстия 0,5 см вклад фона в суммарный поток нейтронов в детекторе в энергетическом интервале выше 0,1 МэВ равен нулю с точностью до статистической погрешности в доли процента. В таком же канале с радиусом отверстия 2 см фон потока нейтронов в детекторе составляет ~1%. В канале нижней вертикальной камеры с радиусом отверстия 1,75 см фоновый поток в детекторе нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ также близок к ~1%. Максимальный уровень фонового потока нейтронов в энергетическом интервале выше 0,1 МэВ соответствует самому короткому каналу № 1 верхней вертикальной камеры — ~5%. Однако в отклике скорости делений на ^{238}U это даёт лишь доли процента от величины полезного сигнала.

Для оценки вклада нейтронов, попавших в детектор помимо канала из окружающих детектор конструкций, проведён расчёт потоков нейтронов в нижней кассете вертикальной нейтронной камеры с точечным изотропным источником нейтронов с энергией 14 МэВ, расположенным в её фокусе. Суммарный поток фоновых нейтронов с энергией от 0,1 до 10,5 МэВ, дошедших до детектора, составил ~3% от потока в группе источника. Вклад этого потока в скорость делений на ^{238}U не превышает ~0,5% вследствие резкого спада сечения деления при энергии нейтронов ниже 10 МэВ.

Проведённый расчётный анализ подтверждает предположение о малости относительных вкладов фоновых нейтронов в отклики камер деления с ^{238}U в каналах коллиматоров. Этот вывод соответствует и откликам алмазных детекторов, поскольку преобладающая часть откликов в обоих случаях определяется первичными нейтронами. Отсюда следует вывод о том, что калибровка детекторов нейтронных камер на реакторе не имеет смысла, поскольку она фактически представляет собой определение абсолютной эффективности детектора к нейтронам с энергией 14 МэВ, что является стандартной процедурой для вне-реакторного стенда с генератором 14-МэВ-ных нейтронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый комплекс исследований нейтронно-физических аспектов калибровки мониторов мощности ИТЭР [2—4] позволил сформулировать базовые принципы калибровки, оптимальные для достижения максимальной точности при минимальной продолжительности *in situ* экспериментов на реакторе. На их основе предложены сценарии предварительной и основной экспериментальной кампаний на реакторе ИТЭР.

Для интегрирования локальных откликов на точечные источники по трём координатам в объёме плазменного шнура используется метод Гаусса. Калибровки мониторов проводятся только для DT-нейтронов, для DD-режима используются поправочные коэффициенты. Полная калибровка проводится только с камерами ^{235}U , камеры с ^{238}U калибруются при работе реактора по откликам камер с ^{235}U (кросс-калибровка). Для калибровки монитора в диверторе возможно применение как прямой методики

измерений в узловых позициях точечного источника, так и упрощённых методик с использованием концепций эквивалентных кольцевых источников и обратных распределений откликов, что способно значительно сократить объём измерений. Активационные детекторы калибруются по откликам диверторного монитора при работе ИТЭР.

Монитор, основанный на усреднённых откликах горизонтальной и вертикальной нейтронных камер, обладает пространственной стабильностью при перемещениях источника и может использоваться дополнительно к штатному монитору на уровне потоков нейтронов в детекторах на четыре порядка величины ниже, чем на первой стенке — области расположения детекторов штатных мониторов. Ввиду низкого фона калибровка детекторов нейтронных камер на реакторе не требуется, поскольку она сводится к определению абсолютной эффективности детектора к нейтронам с энергией 14 МэВ, что является стандартной процедурой для вне реакторных условий.

REFERENCES

1. **Technical Specifications of the Contract IO/10/4300000212 on R&D Design Procedure for ITER in-situ Neutron Calibration (IDM UID # 3BQSQ6).**
2. **Borisov A.A., Deryabina N.A., Markovskiy D.V.** Calibration of ITER instant power neutron monitors. Statement of a problem and neutronics analysis of reactor model with point sources of 14-MeV. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 3, pp. 31—48 (in Russian).
3. **Borisov A.A., Deryabina N.A., Markovskiy D.V.** Calibration of ITER instant power neutron monitors. Responses of blanket monitors to point and ring sources of DT-, DD- и Cf-neutrons. — In the same place, issue 4, pp. 79—95 (in Russian).
4. **Borisov A.A., Deryabina N.A., Markovskiy D.V.** Calibration of ITER instant power neutron monitors. Responses of monitors to the models of real sources of DT-, DD- и Cf-neutrons. — In the same place, 2016, vol. 39, issue 2, pp. 44—57 (in Russian).
5. **Report «Subtask 2: MCNP modeling of sources and accuracy assessment, calibration optimization».** Service Contract IO/10/4300000315 R&D on Design Procedure for ITER in-situ Neutron Calibration, 2012.
6. **55B4 Neutron Flux Monitor System in Equatorial Port #7 (Occluded).** IDM UID # 3LTSG4, 21.07.2010.
7. **Load Specification for NFM, PBS4, in EPP # 1, 7, 8, 17 of 22.01.2013 (IDM UID BGUCMP).**
8. **System Design Description (DDD) Diagnostic Neutron Activation System.** IDM UID # 3UYPYF, 01.11.2010.
9. **55B2_VNC Vertical Neutron Camera (RF) (Action 1 to L. Bertalot).**
10. **55B1_RNC Radial Neutron Camera and EU.**
11. **Forrest R.A.** The European Activation System: EASY-2007. Overview. Issue 1. EASY Documentation Series, UKAEA FUS 533, EURATOM/UKAEA Fusion Association, January 2007.
12. **The European Activation File 2007 (See [11]).**

AUTHORS

Borisov A.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Borisov_AA@nrcki.ru

Deryabina N.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;

Markovskij D.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; markd@nfi.kiae.ru

Received 4 July 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 4, pp. 55—67.