УДК 621.039.6.61

КАЛИБРОВКА НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ИТЭР. ОТКЛИКИ БЛАНКЕТНЫХ МОНИТОРОВ НА ТОЧЕЧНЫЕ И КОЛЬЦЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ DT-, DD- И CF-НЕЙТРОНОВ

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

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Мгновенная мощность является ключевым параметром ИТЭР. Её мониторинг с точностью несколько процентов представляет актуальную и сложную задачу нейтронной диагностики. В серии статей поэтапно проводится расчётное нейтронно-физическое обоснование методики калибровки нейтронных диагностик для DT- и DD-режимов ИТЭР. Для численного интегрирования откликов детекторов ^{235}U и ^{238}U на точечные источники нейтронов используется схема квадратур Гаусса, оптимальная для обработки «дорогостоящих» экспериментов. Такой подход позволяет контролировать точность интегрирования в зависимости от числа узлов по координатам и минимизировать число облучений при заданной погрешности полного отклика монитора. В модифицированных моделях ИТЭР по программе MCNP рассчитаны двумерные матрицы откликов бланкетных мониторов нейтронного потока с Be-замедлителем и микрокамер деления на кольцевые источники DT-нейтронов в профиле плазмы. На основе анализа сходимости интегралов от этих распределений в зависимости от числа узлов рекомендованы позиции точечного источника нейтронов с энергией 14 МэВ в профиле плазмы для калибровки откликов мониторов на штатный объёмный источник нейтронов. Сравнение интегралов по выбранным «экспериментальным» позициям точечного источника и «большому» числу узлов Гаусса (20) дало оценку точности интегрирования откликов бланкетных мониторов на уровне несколько процентов. В матрицах откликов на кольцевые источники возможно выделение области координат эквивалентного кольцевого источника, отклики на который практически равны соответствующим откликам на штатный объёмный источник модели Alite. Применение принципа эквивалентности кольцевого источника может сократить процедуру калибровки. Рассчитанные азимутальные распределения откликов бланкетных мониторов на точечные изотропные источники со спектрами DT-, DD- и ^{252}Cf -нейтронов выглядят качественно подобными, что в принципе делает возможной калибровку мониторов только на DT-нейтронах с последующей перенормировкой результатов для DD-нейтронов. При статистической погрешности счёта камер деления $\sim 1\%$ и реально достижимой интенсивности источника DT-нейтронов $\sim 10^{11} \text{ c}^{-1}$ для всех бланкетных мониторов время облучения на «хвосте» азимутальных распределений измеряется сутками. Снижение заданной точности счёта до 3% уменьшит необходимое для калибровки время облучения приблизительно на порядок величины. Это позволит провести азимутальное облучение монитора нейтронного потока на одном кольце за несколько суток. Для облучения микрокамер деления потребуется в 3—4 раза больше времени. Минимальная длительность облучения бланкетных мониторов с источниками DD- и ^{252}Cf -нейтронов более чем на порядок величины выше вследствие значительно меньшей интенсивности источника и почти вдвое меньших откликов мониторов.

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

CALIBRATION OF ITER INSTANT POWER NEUTRON MONITORS. RESPONSES OF BLANKET MONITORS TO POINT AND RING SOURCES OF DT-, DD- и Cf-NEUTRONS

А.А. Borisov, N.A. Deryabina, D.V. Markovskij

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Instant power is a key parameter of ITER. Its monitoring with accuracy of few percent is an actual problem representing a challenge for the neutron diagnostics. The neutronics analyses for substantiation of the calibration technique for the neutron diagnostics to be used under the ITER DT- and DD-modes of operation are step by step considered in a series of articles. A scheme based on the Gauss quadrature, optimal for processing of «expensive» experiments, is used for numerical integration of the ^{235}U and ^{238}U detector responses to the point and ring sources of 14-MeV neutrons. Such an approach allows to control the accuracy of integration depending on the number of the co-ordinate mesh points and thus to minimize the number of irradiations for the given uncertainty of the full monitor response. 2-D matrixes of the responses of the blanket neutron flux monitors with a Be moderator and fission microchambers to the ring sources of the DT-neutrons in the plasma profile are calculated with the MCNP code for the modified models of ITER. Based on the analysis of convergence integrals of these distributions, the positions of the point source of the 14-MeV neutrons in the plasma profile for calibration of the monitor responses to the regular volume neutron source are recommended depending on the number of the mesh points. Comparison of the integrals by the chosen «experimental» positions of the point source and by the «big» number (20) of the Gauss mesh points has shown that the integration accuracy of the blanket monitor responses is at the level of several percent. In the matrixes of the responses to the ring sources, the area of location of the equivalent ring source producing the responses almost equal to the corresponding responses to the regular volumetric source of the Alite model can be indicated. This can be useful for reducing the duration of the calibration procedure. The calculated azimuthal distributions of the blanket monitor responses to the isotropic point sources with spectra of the DT-, DD- and ^{252}Cf -neutrons look qualitatively similar. This, in principle, allows calibration of the monitors with the DT-neutrons only, with subsequent renormalization of the results for the DD-neutrons. For the statistical accuracy of the fission chamber counting rate of $\sim 1\%$ and the feasible intensity of the DT-neutron source of $\sim 10^{11} \text{ s}^{-1}$, for all the blanket monitors, the tails of the azimuthal distributions can be resolved by several days of irradiation. If the requirement to the counting rate accuracy is relaxed to $\sim 3\%$, this would reduce the duration of irradiation approximately by an order of magnitude. This would allow performing azimuthal irradiation of the neutron flux monitor in one ring within few days. Irradiation of the fission microchambers takes 3 to 4 times more. Minimum duration of blanket monitor irradiation with the DD- and ^{252}Cf -neutron sources is more than one order of magnitude longer because of the much lower source intensity and almost twice weaker monitor responses.

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

ВВЕДЕНИЕ

На первом этапе работ [1] по анализу калибровки нейтронных мониторов мощности ИТЭР была рассмотрена постановка задачи калибровки монитора мощности ИТЭР, основанная на численном интегрировании откликов детекторов ^{235}U и ^{238}U на точечные источники 14-МэВ нейтронов по схеме Гаусса, оптимальной для обработки результатов «дорогостоящих» экспериментов. Такой подход позволяет контролировать точность интегрирования в зависимости от числа узлов по координатам и, таким образом, минимизировать число облучений при заданной погрешности отклика монитора. Для расчётов откликов детекторов по программе MCNP [2] с нейтронными данными FENDL-2.1 [3] были разработаны модифицированные модели реактора с углами раствора 40° и 360° на основе базовой модели реактора Alite [4] с встроенными в них моделями текущих версий нейтронных диагностик. Детальное изучение в этих моделях откликов основного штатного монитора нейтронного потока — в диверторе [5] позволило сформулировать рекомендации по выбору позиций точечного источника с энергией 14 МэВ для калибровки откликов монитора на штатный объёмный источник нейтронов в модели Alite.

Данная работа продолжает анализ процедуры калибровки трёх других нейтронных диагностик, расположенных в бланкете ИТЭР: монитора нейтронного потока с бериллиевым замедлителем в экваториальном порту № 1 [6], двух микрокамер деления [7], установленных на вакуумном корпусе реактора за модулями внешнего бланкета № 12, 17 (МКД-1 и МКД-2), и системы активационных детекторов [8], размещённых в щелях между модулями бланкета в девяти позициях в полоидальном направлении. Как и при исследовании характеристик диверторного монитора, серия расчётов откликов детекторов на кольцевые источники DT-нейтронов выполнена в модели Alite-R с углом раствора 40° и азимутальной симметрией на границах. Азимутальные зависимости откликов мониторов на точечные изотропные источники DT- и DD-нейтронов, а также на альтернативные источники нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf , рассчитывались в модели реактора с углом раствора 360° . Число точек облучения по координатам выбиралось на основании анализа сходимости интегралов от полученных распределений в зависимости от числа узлов Гаусса.

РАСЧЁТНЫЕ МОДЕЛИ НЕЙТРОННЫХ ДИАГНОСТИК

Монитор нейтронного потока с бериллиевым замедлителем (МНПБ). Монитор установлен в пенале (Drawer) крайнего диагностического защитного модуля на расстоянии 10 см от его фронтальной стенки и 30 см от нижней стенки (рис. 1, а). Монитор состоит из четырёх цилиндрических бериллиевых блоков длиной 910 и внешним диаметром 250 мм. В каждом блоке в центре располагается камера деления. Камеры имеют одинаковую конструкцию, но различаются количеством делящегося материала $^{235}\text{UO}_2$. Нижняя камера содержит 4 г двуокиси урана, вторая снизу — 200 мг, третья — 20 мг. Верхняя камера не содержит делящегося материала. Двуокись урана содержится в двух коаксиальных цилиндри-

Рис. 1. Поперечное сечение монитора с бериллиевым замедлителем

ческих слоях, суммарный объём которых составляет $6,9 \text{ см}^3$. Поток нейтронов для расчёта скорости деления урана регистрировался внутри стальной трубы радиусом 3,0 см (см. рис. 1, б).

Микрокамеры деления (МКД). Две одинаковые микрокамеры деления [6] устанавливаются за модулями бланкета: верхняя (МКД-1) — за № 12, нижняя (МКД-2) — за № 17. Микрокамера деления длиной 170 и диаметром 7 мм находится в стальном чехле цилиндрической формы длиной 200, диаметром 20 и толщиной 1 мм (рис. 2). 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. 2. Фрагмент сечения модели микрокамеры деления

Система активационных измерений. Система включает девять стальных трубочек диаметром 12 и толщиной стенок 1,5 мм, в которых установлены по три цилиндрических детектора радиусом 0,45 см и толщиной 2 мм. Трубочки размещены в щелях между модулями бланкета в полоидальном обходе реактора (рис. 3). Первый детектор в канале установлен в районе первой стенки, второй смещён от него вглубь бланкета на 10, третий — на 45 см. Для регистрации потока нейтронов с необходимой статистической точностью 3—4% вблизи первого детектора выделялся дополнительный объём, окружающий образец.

Рис. 3. Вертикальные сечения моделей реактора 40° Alite_R (а) и 360° Alite_CND (б): МНПВ — монитор в верхнем порту; РНК и ВНК — радиальная и вертикальная нейтронные камеры

Ближние к плазме детекторы находятся вблизи вертикальной плоскости симметрии модели реактора (рис. 3). Детекторы для верхнего и экваториального портов дублируются снизу (A_2 , B_2) и сверху порта (A_1 , B_1). Положение D отличается тем, что канал с детекторами находится в щели между центральной диагностической диверторной кассетой и рабочей кассетой, вследствие чего он оказывается смещённым на 25 см от плоскости симметрии модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА МОДЕЛИ РЕАКТОРА С КОЛЬЦЕВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Номинальный отклик монитора представляется в виде интеграла [1] по объёму плазменного шнура от плотности единичного объёмного источника с весом соответствующего локального отклика на точечный источник с координатами r , φ , z :

$$W_0 = 2R_0^2 N_0 \int_{Z_1}^{Z_2} dz \int_{r_1(z)}^{r_2(z)} Q(r, z) r dr \int_0^\pi w(r, \varphi, z) d\varphi. \quad (1)$$

Двумерная функция отклика монитора на кольцевые источники

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

рассчитывалась в транспорте нейтронов с кольцевыми источниками нейтронов в модели Alite_R (40°), позиции которых образуют матрицу размерностью девяти точек по радиусу и 13 точек по высоте поперечного сечения камеры реактора. Статистическая погрешность откликов монитора с бериллием на кольцевой источник не превышала 1%, микрокамер деления — 1—3%.

Значения откликов трёх камер деления монитора с бериллиевым замедлителем и микрокамер деления на штатные объёмные источники DT- и DD-нейтронов представлены в табл. 1. Отклики этих мониторов на кольцевые источники DT-нейтронов даны в табл. 2, 3. В табл. 4, 5 приведены скорости активации детекторов активационной системы в ближайшей к первой стенке реактора позиции для штатных объёмных DT- и DD-источников. Все результаты расчёта нормированы на один нейтрон источника в реакторе.

Таблица 1. Отклики бланкетных мониторов W_0 (10^{-31} дел./н./ядро U5) на штатные объёмные DT- и DD-источники (с координатами центра $Z = 60$ см, $R = 640$ см)

Источник	Монитор					
	МНПБ				МКД-1	МКД-2
	4 г	200 мг	20 мг	—	10 мг	10 мг
DT	3,23	3,94	3,41	2,32	4,96	4,47
DD	1,94	2,44	2,09	1,37	2,03	2,25

Таблица 2. Матрица откликов $W_\phi^{235}(r, z)$ (10^{-31} дел./н./ядро U5) монитора МНПБ с 4 г $^{235}\text{UO}_2$ в зависимости от положения на оси Z кольцевого DT-источника радиусом R

Z , см	R , см								
	440	500	560	600	640	680	720	760	820
350	—	2,01	1,77	1,61	1,49	1,33	—	—	—
280	—	2,47	2,24	2,10	1,87	1,64	1,39	—	—
210	3,07	2,99	2,85	2,76	2,63	2,33	1,97	1,57	1,38
170	3,26	3,19	3,22	3,16	3,15	2,99	2,75	2,23	1,68
130	3,38	3,43	3,49	3,58	3,70	3,74	3,80	3,51	2,73
90	3,36	3,40	3,57	3,82	4,00	4,34	4,83	5,30	5,10
60	3,19	3,30	3,47	3,67	3,95	4,36	5,04	6,28	9,49
30	3,07	3,08	3,23	3,43	3,68	4,00	4,59	5,44	8,93
–10	2,79	2,83	2,87	2,94	3,09	3,24	3,43	3,57	3,43
–50	2,61	2,60	2,62	2,65	2,63	2,63	2,44	2,30	1,47
–90	2,26	2,25	2,14	2,12	2,05	1,90	1,64	1,33	1,12
–160	1,73	1,69	1,59	1,49	1,32	1,18	1,08	0,977	—
–230	—	1,25	1,14	1,10	1,02	0,975	—	—	—

Таблица 3. Матрицы откликов $W_\phi^{235}(r, z)$ (10^{-31} дел./н./ядро U5) микрокамер деления МКД-1 и МКД-2 в зависимости от положения на оси Z кольцевого DT-источника радиусом R

Z , см	R , см								
	440	500	560	600	640	680	720	760	820
350	—	3,10	3,18	3,17	3,02	2,56	—	—	—
		2,70	2,49	2,46	2,38	2,32			
280	—	4,70	5,60	6,39	7,67	10,9	16,2	—	—
		2,93	2,76	2,74	2,51	2,32			
210	5,14	5,74	6,81	7,63	9,11	10,5	11,5	9,13	5,94
		3,34	3,36	3,20	2,85	2,77			
170	5,34	6,19	6,85	7,39	8,02	8,71	7,83	5,64	3,16
		3,61	3,67	3,53	3,22	3,02			
130	5,44	5,81	6,48	6,85	7,0	6,79	5,77	4,08	2,33
		3,98	3,86	3,68	3,57	3,29			
90	5,28	5,80	6,24	6,10	5,85	5,64	4,63	3,42	1,79
		4,29	4,26	4,09	3,85	3,82			
60	5,36	5,51	5,66	5,28	5,19	4,82	3,83	3,01	1,76
		4,46	4,60	4,45	4,29	4,05			
30	4,90	5,18	5,16	5,05	4,87	4,12	3,42	2,63	1,82
		4,44	4,68	4,85	4,82	4,44			
–10	4,79	4,90	4,56	4,41	4,17	3,57	3,03	2,49	1,86
		4,74	5,00	5,22	5,36	5,28			
–50	4,43	4,42	4,24	4,01	3,66	3,23	2,80	2,21	1,82
		4,82	5,26	5,68	5,94	6,17			
–90	4,07	3,87	3,81	3,60	3,21	2,76	2,60	2,25	1,94
		4,72	5,41	5,81	6,21	6,81			
–160	3,50	3,62	3,24	3,11	2,92	2,64	2,3	2,10	—
		4,11	4,59	5,29	6,43	7,63			
–230	—	3,03	2,80	2,69	2,41	2,26	—	—	—
		3,22	3,63	3,91	4,49	5,77			

Т а б л и ц а 4. Скорости активации (10^{-32} реакц./н./ядро) детекторов активационной системы для штатного объёмного ДТ-источника с координатами центра $Z = 60$ см, $R = 640$ см

Реакция	$T_{1/2}$	Положение детектора								
		A_1	A_2	B_1	B_2	C	D	E	F	G
$^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$	78,4 ч	5,40	5,27	8,53	8,90	8,26	0,392	3,13	7,72	3,76
$^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$	12,7 ч	8,25	8,11	13,0	13,6	12,2	0,61	4,84	11,8	5,81
$^{65}\text{Cu}(n, \gamma)^{66}\text{Cu}$	5,1 мин	7,37	8,48	8,66	8,86	5,72	1,87	5,81	9,42	7,36
$^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$	9,7 мин	3,98	3,91	6,30	6,57	6,01	0,292	2,33	5,70	2,79
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	12,7 ч	15,5	17,1	17,8	18,0	11,0	0,397	12,0	19,5	15,1
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	15,0 ч	1,22	1,20	1,92	2,00	1,73	0,092	0,727	1,74	0,87
$^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$	9,4 мин	0,838	0,829	1,30	1,35	1,12	0,066	0,504	1,18	0,60
$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	2,57 ч	1,15	1,13	1,81	1,87	1,63	0,087	0,68	1,63	0,82
$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	312 сут	4,83	4,84	7,41	7,69	5,94	0,411	2,96	6,69	3,58
$^{54}\text{Fe}(n, 2n)^{53}\text{Fe}$	8,5 мин	0,024	0,023	0,038	0,039	0,039	0,0017	0,013	0,03	0,016
$^{47}\text{Ti}(n, p)^{47}\text{Sc}$	3,35 сут	1,62	1,61	2,50	2,60	2,12	0,132	0,982	2,26	1,18
$^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$	43,7 ч	0,589	0,579	0,928	0,967	0,846	0,0442	0,348	0,83	0,419
$^{59}\text{Co}(n, p)^{59}\text{Fe}$	44,6 сут	0,527	0,520	0,826	0,860	0,731	0,0407	0,314	0,74	0,378
$^{59}\text{Co}(n, \alpha)^{56}\text{Mn}$	2,58 ч	0,293	0,289	0,462	0,481	0,420	0,0220	0,174	0,41	0,209
$^{59}\text{Co}(n, 2n)^{58}\text{Co}$	70,8 сут	6,29	6,17	9,93	10,4	9,36	4,63	3,68	8,99	4,42

Т а б л и ц а 5. Скорость активации (10^{-32} реакц./н./ядро) медного детектора активационной системы для штатного объёмного DD-источника с координатами центра $Z = 60$ см, $R = 640$ см

Реакция	Положение детектора								
	A_1	A_2	B_1	B_2	C	D	E	F	G
$^{65}\text{Cu}(n, \gamma)^{66}\text{Cu}$	6,36	7,27	7,59	7,37	4,93	1,80	4,74	8,07	6,51

МИНИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ ОБЛУЧЕНИЯ МОНИТОРОВ ПРИ КАЛИБРОВКЕ С ИСТОЧНИКОМ ДТ-НЕЙТРОНОВ

Камеры деления с ^{235}U . Предварительная оценка минимального времени облучения рассматриваемых бланкетных мониторов необходима для понимания возможности и целесообразности их калибровки в ИТЭР с помощью генератора ДТ-нейтронов, обладающего максимально достижимой интенсивностью $\sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$, и, соответственно, необходимости подробного расчётного анализа процедуры интегрирования их локальных откликов.

Оценки проведены в сравнении с облучением монитора нейтронного потока в диверторе (МНПД) [1]. Единичный отклик ^{235}U в МНПД на один нейтрон штатного источника равен $W_\phi^{235} = 4,97 \cdot 10^{-29} \text{ н.}^{-1} \cdot \text{ядро}^{-1}$. Число ядер ^{235}U в 30 мг камеры деления этого монитора составляет $N^{235} = 0,602 \cdot 10^{24} \cdot 30 \cdot 10^{-3} / 235 = 7,68 \cdot 10^{19}$. Выход нейтронов компактного генератора нейтронов, в качестве прототипа которого рассматривается перспективная разработка НГ-24, практически ограничен величиной $Y_{\text{NG}} \approx 10^{11} \text{ с}^{-1}$. При такой интенсивности источника скорость счёта (при эффективности, равной единице) камеры деления МНПД с указанным содержанием урана равна

$$F^{235} = W_0^{235} \cdot N^{235} \cdot Y_{\text{NG}} = 4,97 \cdot 10^{-29} \text{ н.}^{-1} \cdot \text{ядро}^{-1} \cdot 7,68 \cdot 10^{19} \text{ ядер} \cdot 10^{11} \text{ н.с}^{-1} = 382 \text{ с}^{-1}.$$

Оценки минимального времени облучения бланкетных мониторов для достижения статистической точности откликов $\sim 1\%$ (т.е. числа счётов $\sim 10^4$) при заданной интенсивности штатного объёмного источника нейтронов даны в табл. 6.

Т а б л и ц а 6. Характерные длительности облучения мониторов

Монитор	Содержание $^{235}\text{UO}_2$	N^{235}	$W_0^{235}, \text{ н.}^{-1} \cdot \text{ядро}^{-1}$	$F^{235}, \text{ с}^{-1}$	$T_0^{235}, = 10^4 / F^{235}$
МНПД	30 мг	$7,68 \cdot 10^{19}$	$4,97 \cdot 10^{-29}$	382	26 с ($\sim 0,5$ мин)
	4 г	$9,0 \cdot 10^{21}$	$3,23 \cdot 10^{-31}$	290	34 с ($\sim 0,5$ мин)
МНПБ	200 мг	$4,5 \cdot 10^{20}$	$3,94 \cdot 10^{-31}$	17,7	564 с ($\sim 9,4$ мин)
	20 мг	$4,5 \cdot 10^{19}$	$2,32 \cdot 10^{-31}$	1,04	9582 с ($\sim 2,66$ ч)
МКД-1	10 мг	$2,25 \cdot 10^{19}$	$4,96 \cdot 10^{-31}$	4,5	2222 с (~ 37 мин)
МКД-2	10 мг	$2,25 \cdot 10^{19}$	$4,47 \cdot 10^{-31}$	4,0	2500 с (~ 42 мин)

Отклики на кольцевые источники варьируют в поперечном сечении камеры приблизительно в 2 раза относительно отклика на эквивалентное кольцо, соответствующее штатному источнику (см. табл. 2, 3). Однако по азимуту камеры отклик на точечный источник спадает почти на два по-

рядка величины. Из этого можно сделать вывод о том, что камеры монитора МНПБ могут быть калиброваны в пределах суточного облучения, в то время как для микрокамер МКД-1 и МКД-2 требуется в несколько раз большее время облучения в точках, наиболее удалённых по азимуту от источника нейтронов.

Активационные детекторы. Диагностическая система, основанная на пакете активационных детекторов, в общем случае не может служить монитором мгновенной мощности реактора, поскольку накопленная в них активность является функционалом сценария облучения за время пуска реактора. Такая система способна лишь в стационарном режиме отображать уровень мощности реактора через значение равновесной активности детектора по истечении времени облучения не менее 2—3 периодов полураспада его вторичного изотопа. Её недостатком является и разовый характер использования самих детекторов — таблеток, доставляемых из зоны облучения в зону измерения активности с помощью пневматической почты. Вследствие этого к погрешности калибровки добавляется и отклонение ядерно-физических свойств детекторов от среднего значения.

Периоды полураспада детекторов варьируют от нескольких минут до сотен часов (см. табл. 4). Практически все они являются пороговыми, сечения реакций активации нейтронами 14 МэВ не превышают 1 барн. Детекторы представляют собой цилиндрические таблетки радиусом 0,45 и высотой 0,2 см при объёме 0,128 см³. Равновесные активности при интенсивности 10¹¹ н/с штатного источника нейтронов 14 МэВ, рассчитанные из скоростей активации детекторов в табл. 4, приведены в табл. 7.

Таблица 7. Равновесные активности детекторов при интенсивности источника 10¹¹ н/с, Бк

Реакция	T _{1/2}	Положение детектора								
		A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C	D	E	F	G
⁹⁰ Zr(n, 2n) ⁸⁹ Zr	78,4 ч	30,0	29,3	47,6	49,6	46,0	2,18	17,4	42,8	20,9
⁶⁵ Cu(n, 2n) ⁶⁴ Cu	12,7 ч	87,6	86,0	138	144	129	6,48	51,2	125	61,6
⁶⁵ Cu(n, γ) ⁶⁶ Cu	5,1 мин	78,0	90,0	91,6	94,0	60,8	19,8	61,6	100	78,0
⁶³ Cu(n, 2n) ⁶² Cu	9,7 мин	43,6	42,8	68,8	71,6	65,6	3,18	25,4	62,4	30,4
⁶³Cu(n, γ)⁶⁴Cu	12,69 ч	169	186	194	196	120	4,32	131,2	212	165
²⁷ Al(n, α) ²⁴ Na	15,0 ч	10,2	10,1	16,2	16,8	14,6	0,77	6,12	14,6	7,4
²⁷ Al(n, p) ²⁷ Mg	9,4 мин	7,08	7,0	10,9	11,4	9,44	0,55	4,24	9,96	5,12
⁵⁶ Fe(n, p) ⁵⁶ Mn	2,57 ч	12,4	12,2	19,6	20,2	17,6	0,94	7,36	17,6	8,92
⁵⁴ Fe(n, p) ⁵⁴ Mn	312 сут	54,4	54,4	83,2	86,4	66,8	4,6	33,2	75,2	4,04
⁵⁴ Fe(n, 2n) ⁵³ Fe	8,5 мин	0,273	0,260	0,432	0,448	0,44	0,02	0,154	0,39	0,18
⁴⁷ Ti(n, p) ⁴⁷ Sc	3,4 сут	11,9	11,8	18,4	19,1	15,6	0,97	7,24	16,6	8,68
⁴⁸ Ti(n, p) ⁴⁸ Sc	43,7 ч	4,28	4,2	6,72	7,0	6,12	0,32	2,52	6,08	3,03
⁵⁹ Co(n, p) ⁵⁹ Fe	45 сут	6,12	6,04	9,6	10,0	8,52	0,47	3,65	8,68	4,4
⁵⁹ Co(n, α) ⁵⁶ Mn	2,58 ч	3,41	3,36	5,36	5,6	4,88	0,25	2,02	4,84	2,43
⁵⁹ Co(n, 2n) ⁵⁸ Co	71 сут	73,2	72,0	115	121	108	54,0	42,8	105	51,6

Калибровка активационной системы предполагает определение связи активностей детекторов, облучённых при различных положениях точечного источника, с активностями при облучении стационарным штатным источником нейтронов. Приведённые в табл. 7 значения дают масштаб ожидаемых средних равновесных активностей детекторов по азимуту эквивалентного кольца источника. Допустимая статистическая погрешность калибровки детектора ~10% ограничивает его минимальную равновесную активность величиной ~100 Бк. По этому критерию следует исключить из рассмотрения все детекторы, кроме ⁶³Cu(n, γ)⁶⁴Cu. Однако и у этого детектора равновесные активности для удалённых по азимуту положений точечного источника будут намного меньше указанных в таблице, что увеличит статистическую погрешность калибровки. При периоде полураспада этого детектора 12,7 ч максимальное время его облучения составляет сутки независимо от положения источника.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что в условиях ограниченной интенсивности нейтронного генератора надёжная калибровка предложенного набора активационных детекторов не представляется возможной. Она, по-видимому, и не является обязательной, поскольку система активационных детекторов служит лишь дополнением к системам мониторинга мгновенной мощности реактора с помощью камер деления и может калиброваться при работе реактора по показаниям предварительно надёжно калиброванных мониторов мгновенной мощности. На этом основании подробное расчётное исследование процедуры её калибровки не проводилось.

ИНТЕГРИРОВАНИЕ ОТКЛИКОВ МОНИТОРОВ ПО РАДИУСУ РЕАКТОРА

Отклики бланкетных мониторов на кольцевые источники $W_{\phi}(r, z)$ по радиусу реактора интегрировались по методике, разработанной ранее для диверторного монитора МНПД [1], с весом профиля источника $Q(r, z)$, заданным в модели Alite двумерной матрицей колец размерностью 40×40 .

Матрицы откликов $W_{\phi}^{235}(r, z)$ на кольцевые источники для монитора МНПБ и двух микрокамер деления (верхней МКД-1 и нижней МКД-2) в девяти точках по радиусу и 13 точках по высоте реактора (см. табл. 2, 3), нормированные на расчётную величину отклика соответствующего монитора на штатный объёмный источник модели Alite, представлены в табл. 8—10. Пустые позиции в таблицах соответствуют областям нулевой плотности штатного источника.

Т а б л и ц а 8. Матрица $W_{\phi}^{235}(r, z)$ откликов $^{235}\text{U}(n, f)$ монитора МНПБ с 4 г $^{235}\text{UO}_2$ на кольцевые ДТ-источники, нормированных на отклик на штатный объёмный источник

Z, см	R, см								
	440	500	560	600	640	680	720	760	820
–230		0,387	0,352	0,340	0,315	0,301			
–160	0,535	0,523	0,492	0,461	0,408	0,365	0,334	0,302	
–90	0,699	0,696	0,662	0,656	0,634	0,588	0,507	0,411	0,346
–50	0,808	0,804	0,811	0,820	0,814	0,814	0,755	0,712	0,455
–10	0,863	0,876	0,888	0,910	0,956	1,003	1,061	1,099	1,068
30	0,950	0,953	1,000	1,061	1,139	1,238	1,421	1,684	2,764
60	0,987	1,021	1,074	1,136	1,222	1,349	1,560	1,944	2,947
90	1,040	1,052	1,105	1,182	1,238	1,343	1,495	1,640	1,578
130	1,046	1,061	1,080	1,108	1,145	1,157	1,176	1,086	0,845
170	1,009	0,987	0,996	0,978	0,975	0,925	0,851	0,690	0,520
210	0,854	0,854	0,854	0,854	0,814	0,721	0,609	0,486	0,427
280		0,764	0,693	0,650	0,578	0,507	0,430		
350		0,622	0,547	0,498	0,461	0,411			

Т а б л и ц а 9. Матрица $W_{\phi}^{235}(r, z)$ откликов $^{235}\text{U}(n, f)$ МКД-1 на кольцевые ДТ-источники, нормированных на отклик на штатный объёмный источник

Z, см	R, см								
	440	500	560	600	640	680	720	760	820
–230		0,610	0,564	0,542	0,485	0,455			
–160	0,705	0,729	0,653	0,627	0,588	0,532	0,463	0,423	
–90	0,820	0,780	0,768	0,725	0,647	0,556	0,524	0,453	0,391
–50	0,893	0,891	0,854	0,808	0,737	0,651	0,564	0,445	0,366
–10	0,965	0,987	0,919	0,889	0,840	0,719	0,610	0,502	0,375
30	0,987	1,044	1,040	1,018	0,981	0,830	0,689	0,530	0,366
60	1,080	1,110	1,141	1,064	1,046	0,971	0,772	0,606	0,354
90	1,064	1,169	1,258	1,229	1,179	1,137	0,933	0,689	0,360
130	1,096	1,171	1,306	1,381	1,411	1,368	1,163	0,822	0,469
170	1,076	1,247	1,381	1,489	1,616	1,756	1,578	1,137	0,637
210	1,076	1,247	1,381	1,538	1,836	2,116	2,318	1,840	1,197
280		0,947	1,129	1,288	1,546	2,197	3,266		
350		0,625	0,641	0,639	0,608	0,516			

Т а б л и ц а 10. Матрица $W_{\phi}^{235}(r, z)$ откликов $^{235}\text{U}(n, f)$ МКД-2 на кольцевые ДТ-источники, нормированных на отклик на штатный объёмный источник

Z, см	R, см								
	440	500	560	600	640	680	720	760	820
–230		0,720	0,812	0,874	1,004	1,290			
–160	0,919	1,026	1,183	1,438	1,706	2,062	2,527	3,042	
–90	1,055	1,210	1,299	1,389	1,523	1,633	1,653	1,221	0,747
–50	1,078	1,176	1,270	1,328	1,380	1,315	1,210	0,894	0,442
–10	1,060	1,118	1,167	1,199	1,181	1,096	0,921	0,691	0,438
30	0,993	1,046	1,085	1,078	0,993	0,901	0,800	0,583	0,431
60	0,997	1,029	0,995	0,959	0,906	0,794	0,673	0,532	0,400
90	0,959	0,953	0,914	0,861	0,854	0,747	0,621	0,548	0,395
130	0,890	0,863	0,823	0,798	0,736	0,668	0,597	0,496	0,442
170	0,807	0,821	0,789	0,720	0,675	0,608	0,559	0,474	0,438
210	0,807	0,821	0,789	0,637	0,619	0,579	0,512	0,469	0,434
280		0,655	0,617	0,612	0,561	0,519	0,476		
350		0,604	0,557	0,550	0,532	0,519			

В таблицах жирным шрифтом отмечены области значений r, z , где отклики на кольцевые источники $W_{\phi}^{235}(r, z)$ практически совпадают с откликами на штатный источник (т.е. нормированные отклики в пределах $\pm 5\%$ равны 1). Наилучшее соответствие указанных откликов достигается в точках профиля $r = 440\text{—}680$ см, $z = -10\text{—}60$ см для монитора МНПБ, $r = 440\text{—}680$ см, $z = 30\text{—}60$ см для МКД-1 и $r = 440\text{—}640$ см, $z = 30\text{—}60$ см для МКД-2.

Относительные отклики на кольцевые источники в табл. 8—10 интегрировались по радиусу для каждого z в индивидуальных границах по R , внутри которых источник отличен от нуля. В качестве таких границ принимались середины нулевых зон источника, ближайших слева и справа к ненулевому источнику в данной строке по z . Таким образом, каждое интегрируемое распределение источника по R начиналось и заканчивалось нулевыми значениями интенсивности источника.

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. Исходные данные для интегрирования по радиусу реактора иллюстрируются на рис. 4—6. В центральном сечении по высоте, дающем наибольший вклад в инте-

Рис. 4. Отклики $^{235}\text{U}(n, f)$ на кольцевые источники на высоте Z (см) для монитора МНПБ: a — радиальные распределения; b — поверхность откликов; $Z = -230$ ($\square$), -160 ($\circ$), -90 (Δ), -50 (∇), -10 ($\diamond$), 30 ($\triangleleft$), 60 ($\triangleright$), 90 ($\circ$), 130 ($\star$), 170 ($\square$), 210 (I), 280 ($\times$), 350 ($\ast$)

Рис. 5. Отклики $^{235}\text{U}(n, f)$ на кольцевые источники на высоте Z (см) для монитора МКД-1: a — радиальные распределения; b — поверхность откликов; $Z = -230$ ($\square$), -160 ($\circ$), -90 (Δ), -50 (∇), -10 ($\diamond$), 30 ($\triangleleft$), 60 ($\triangleright$), 90 ($\circ$), 130 ($\star$), 170 ($\square$), 210 (I), 280 ($\times$), 350 ($\ast$)

Рис. 6. Отклики $^{235}\text{U}(n, f)$ на кольцевые источники на высоте Z (см) для монитора МКД-2: a — радиальные распределения; b — поверхность откликов; $Z = -230$ ($\square$), -160 ($\circ$), -90 (Δ), -50 (∇), -10 ($\diamond$), 30 ($\triangleleft$), 60 ($\triangleright$), 90 ($\circ$), 130 ($\star$), 170 ($\square$), 210 (I), 280 ($\times$), 350 ($\ast$)

гнал от отклика, подынтегральная функция и её компоненты на рис. 7 имеют гладкий вид. Такой же характер имеют и поверхности подынтегральной функции для трёх мониторов на рис. 8.

Сходимость величины интеграла по радиусу источника в зависимости от числа узлов Гаусса показана на рис. 9. Для измерений откликов по радиусу можно рекомендовать пять узлов — колец облучения.

Рис. 7. 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_ϕ^{235} МНПБ (□), W_ϕ^{235} МКД-1 (○), W_ϕ^{235} МКД-2 (△), $Q(r, 60)W_\phi^{235}r$ МНПБ (■), $Q(r, 60)W_\phi^{235}r$ МКД-1 (●), $Q(r, 60)W_\phi^{235}r$ МКД-2 (▲)

Рис. 9. Сходимость интеграла по радиусу при $Z = 60$ см в зависимости от числа узлов Гаусса: ■ — МНПБ; ● — МКД-1; ▲ — МКД-2

Рис. 8. Поверхности подынтегральных функций откликов мониторов $Q(r, z)W_\phi(r, z)$: а — МНПБ; б — МКД-1; в — МКД-2

ИНТЕГРИРОВАНИЕ ОТКЛИКОВ МОНИТОРОВ С КАМЕРАМИ ДЕЛЕНИЯ ПО ВЫСОТЕ РЕАКТОРА

Высотные распределения подынтегральной функции $W_r(z)$ для трёх мониторов, интегрированные по радиусу с максимальным числом узлов $N = 20$, показаны рис. 10. Сходимость интегралов от этих распределений в зависимости от числа узлов иллюстрируется на рис. 11. Видно, что для интегрирования

Рис. 10. Высотные распределения подынтегральной функции $W_r(z)$ бланкетных мониторов после интегрирования по радиусу с числом узлов 6 и 20: ■ — МНПБ G20; ■ — МКД-1 G20; ■ — МКД-2 G20; ★ — МНПБ G6; ★ — МКД-1 G6; ★ — МКД-2 G6

Рис. 11. Сходимость интегралов по высоте в зависимости от числа узлов Гаусса: ■ — МНПБ; ● — МКД-1; ▲ — МКД-2

распределения монитора МНПБ необходимо шесть узлов Гаусса, в то время как для мониторов МКД-1 и МКД-2 достаточно четырёх—пяти узлов.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПОЗИЦИИ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

Рекомендуемые на основании проведённого анализа позиции точечного источника в профиле плазмы для калибровки отклика мониторов МНПБ, МКД-1 и МКД-2 приведены в табл. 11.

Т а б л и ц а 11. Рекомендуемые позиции точечного источника

Номер узла по Z, i	Узлы Гаусса		Z_i , см	Номер узла по R, j	Узлы Гаусса		Границы источника Alite		R_{ij} , см
	x_i	A_i			x_j	A_j	$R1_i$	$R2_i$	
1	−0,9324	0,1713	−210,3	1	−0,90617	0,23692	463,8	733,1	476,5
				2	−0,53846	0,47862			525,9
				3	0	0,56888			598,5
				4	0,53846	0,47862			670,9
				5	0,90617	0,23692			720,5
2	−0,6612	0,3607	−131,4	1	−0,90617	0,23692	453,1	776,2	468,2
				2	−0,53846	0,47862			527,6
				3	0	0,56888			614,6
				4	0,53846	0,47862			701,6
				5	0,90617	0,23692			761,0
3	−0,2386	0,4679	−9,02	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			727,3
				5	0,90617	0,23692			800,5
4	0,2386	0,4679	129,0	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			727,3
				5	0,90617	0,23692			800,5
5	0,6612	0,3607	251,4	1	−0,90617	0,23692	442,3	776,2	457,9
				2	−0,53846	0,47862			519,4
				3	0	0,56888			609,2
				4	0,53846	0,47862			699,1
				5	0,90617	0,23692			760,5
6	0,9324	0,1713	330,3	1	−0,90617	0,23692	474,6	700,8	485,2
				2	−0,53846	0,47862			526,8
				3	0	0,56888			587,7
				4	0,53846	0,47862			648,6
				5	0,90617	0,23692			690,2

Эффективность представленной схемы интегрирования демонстрируется на рис. 10 в сравнении интегральных откликов по выбранным для измерений радиальным позициям (точки G6) с максимально точным интегрированием при числе узлов по радиусу 20 (кривые G20). Отношения интегралов составили 1,01, 0,997 и 0,996 для мониторов МНПБ, МКД-1 и МКД-2 соответственно.

Полное число позиций источника в поперечном сечении камеры ИТЭР в предложенной схеме составляет $5 \times 6 = 30$. В отличие от рассмотренного ранее случая калибровки МНПД, где вспомогательные детекторы могли располагаться по азимуту на поверхности камеры, использование для рассматриваемых мониторов, расположенных в глубине бланкета, «обратных» азимутальных зависимостей откликов невозможно. Поэтому полное число позиций расположения точечного источника является произведением числа точек в профиле плазмы на число азимутальных позиций.

АЗИМУТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛИКОВ БЛАНКЕТНЫХ МОНИТОРОВ НА ТОЧЕЧНЫЕ ИЗОТРОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ DT-, DD- И Cf-НЕЙТРОНОВ

Модернизированная расчётная модель ИТЭР с углом раствора 360°. На начальном этапе работы была обновлена модель реактора с углом раствора 360°, созданная для обоснования методики калибровки нейтронных диагностик. В неё были перенесены из модели Alite_R с углом раствора 40° блоки

экваториального порта № 1 с монитором нейтронного потока, микрокамер деления и активационных датчиков (см. рис. 3, а). Они без изменения были размещены в полной модели реактора с углом 360° . На рис. 3 показаны вертикальные сечения двух моделей в плоскости $Y = 0$, в которых рассчитывались отклики бланкетных мониторов, на рис. 12 представлено горизонтальное сечение полной модели с углом 360° . Основным отличием этих двух расчётных моделей является отсутствие в полной модели элементов реактора за внешней частью вакуумного корпуса, таких, как магниты, криостат и биозащита, которые, по мнению авторов, не должны оказывать заметного влияния на отклики бланкетных мониторов. Кроме того, в полную модель не была перенесена модель вертикальной нейтронной камеры. Она была заменена на блок железобетонной защиты.

Рис. 12. Горизонтальное сечение модели реактора 360° Alite_CND на высоте $Z = 60$ см

В табл. 12 сравниваются отклики мониторов на штатный объёмный источник ДТ-нейтронов для обеих моделей. Отклики монитора с бериллиевым замедлителем при использовании штатного объёмного источника, заданного в виде матрицы кольцевых источников и матрицы ячеек, для этих двух моделей совпадают так же, как и для эквивалентного кольцевого источника радиусом 560 см на высоте 30 см. Абсолютное значение отклика монитора с бериллием для обновлённой конфигурации экваториального порта в 6 раз больше, чем в расчётах конструкции реактора на первом этапе. Отклики микрокамер деления в двух моделях различаются на 30—40%. Этим подтверждается сильная зависимость откликов детекторов с ^{235}U от конструктивных решений вблизи мест расположения детекторов нейтронной диагностики и их моделирования в расчётах.

Т а б л и ц а 12. Сравнение откликов бланкетных мониторов ($W_0 = 10^{-31}$ дел./н./ядро U) на штатный объёмный источник и эквивалентный кольцевой источник ДТ-нейтронов в моделях Alite_R (40°) и Alite_CND (360°)

Источник	Угол	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2
Матрица колец	40°	3,23	5,14	4
	360°	3,25	4,02	2,96
	$40^\circ/360^\circ$	0,991	1,28	1,44
Матрица ячеек	40°	3,23	4,96	4,47
	360°	3,23	3,94	3,05
	$40^\circ/360^\circ$	0,998	1,26	1,46
Эквивалентное кольцо, $z = 30$ см, $r = 560$ см	40°	3,23	5,15	4,85
	360°	3,22	4,14	3,40
	$40^\circ/360^\circ$	1,003	1,24	1,42

Расчёты азимутальных зависимостей откликов бланкетных мониторов — скоростей деления ^{235}U на идеальные точечные изотропные источники со спектрами нейтронов ДТ, DD и ^{252}Cf были проведены для модели с углом 360° Alite_CND с шагом $6,6^\circ$ вдоль кольца источника радиусом 560 см на высоте 30 см, принятого в качестве эквивалентного штатному объёмному источнику ИТЭР. Скорости делений в мониторах для разных типов источников даны в табл. 13, 14.

Т а б л и ц а 13. Единичные отклики камер деления ^{235}U на позиции точечных ДТ- и DD-источников на эквивалентном кольце $R = 560$ см, $Z = 30$ см, 10^{-30} дел./н./атом

φ, град	ДТ-источник			DD-источник		
	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2
1	2	3	4	5	6	7
0	2,52	2,46	2,15	1,56	0,799	0,791
6,6	2,69	2,30	2,00	1,64	0,762	0,731
13,3	1,39	1,86	1,56	0,882	0,654	0,606
20	0,861	1,33	1,14	0,586	0,485	0,469
26,6	0,581	0,994	0,813	0,409	0,361	0,355
33,3	0,423	0,693	0,581	0,300	0,235	0,262
40	0,317	0,500	0,412	0,231	0,200	0,188

1	2	3	4	5	6	7
46,6	0,246	0,434	0,316	0,176	0,177	0,138
53,3	0,202	0,315	0,258	0,149	0,133	0,115
60	0,169	0,267	0,236	0,125	0,130	0,114
66,6	0,147	0,287	0,209	0,109	0,128	0,108
73,3	0,131	0,210	0,177	0,0994	0,0936	0,0850
80	0,121	0,186	0,158	0,0900	0,0831	0,0663
86,6	0,116	0,177	0,136	0,0830	0,0730	0,0594
93,3	0,104	0,177	0,126	0,0751	0,0734	0,0565
100	0,102	0,151	0,104	0,0719	0,0707	0,0480
106,6	0,0692	0,0195	0,0291	0,0473	0,0179	0,0222
113,3	0,0234	0,0148	0,0180	0,0205	0,00745	0,0163
120	0,0200	0,0119	0,0177	0,0194	0,0121	0,0167
126,6	0,0179	0,00789	0,0126	0,0175	0,00979	0,0147
133,3	0,0153	0,00925	0,0111	0,0149	0,0106	0,0120
140	0,0118	0,00957	0,00959	0,0118	0,00957	0,00959
146,6	0,0102	0,00556	0,00754	0,0103	0,00557	0,00754
153,3	0,00823	0,00445	0,00777	0,00822	0,00445	0,00777

Т а б л и ц а 14. Единичные отклики камер деления ^{235}U на позиции точечного ^{252}Cf -источника на эквивалентном кольце $R = 560$ см, $Z = 30$ см, 10^{-30} дел./н./атом

φ, град.	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2
0	1,37	0,629	0,609
6,66	1,47	0,659	0,587
13,3	0,766	0,432	0,473
20	0,513	0,377	0,383
26,6	0,357	0,258	0,298
33,3	0,261	0,203	0,220
40	0,197	0,160	0,155
46,6	0,156	0,123	0,114
53,3	0,131	0,103	0,104
60	0,107	0,0799	0,101
66,6	0,0966	0,102	0,0986
73,3	0,0886	0,0702	0,0734
80	0,0791	0,0593	0,0593
86,6	0,0710	0,0588	0,0509
93,3	0,0677	0,0542	0,0454
100	0,0719	0,0707	0,0480
106,6	0,0473	0,0179	0,0222
113,3	0,0205	0,00745	0,0163
120	0,0194	0,0121	0,0167
126,6	0,0175	0,00979	0,0147
133,3	0,0149	0,0106	0,0120
140	0,0118	0,00957	0,00959
146,6	0,0103	0,00557	0,00754
153,3	0,00822	0,00445	0,00777

Зависимости откликов от азимута для трёх типов источника на рис. 13 выглядят подобными в диапазоне углов прямой видимости источника из детектора ($\varphi \leq 100^\circ$). Отношения откликов на точечные

Рис. 13. Азимутальные зависимости откликов бланкетных мониторов для разных спектров нейтронов источника: а — МНПБ, б — МКД-1: ■ — DT; ● — DD; ▲ — Cf

источники DD- и DT-нейтронов на рис. 14 варьируют в зависимости от азимутального угла в пределах 15—20% и отличаются так же от отношений скоростей делений в бланкетных мониторах для штатного объёмного источника с DD- и DT-нейтронами. Они нанесены на график и составляют 0,6, 0,4 и 0,5 для МНПБ, МКД-1 и МКД-2 соответственно. Отсюда следует вывод, что измеренная азимутальная зависимость для DT-нейтронов не пригодна для калибровки откликов на DD-нейтроны. При отказе от экспериментальной калибровки мониторов с DD-нейтронами возможно использование DT-калибровок, перенормированных с помощью указанных коэффициентов.

Отклики камер деления с ^{235}U бланкетных мониторов на DT-нейтроны на рис. 13 приблизительно одинаковы по величине и почти в 2 раза выше откликов на DD- и ^{252}Cf -нейтроны. Характеристика монитора с бериллиевым замедлителем имеет максимум в начале азимутальной шкалы, обусловленный асимметричным расположением регистрирующих объёмов мониторов в порту реактора. Его отклик на DD- и ^{252}Cf -нейтроны приблизительно в 2 раза выше, чем отклики верхней и нижней микрокамер деления. Это объясняется экранировкой микрокамер деления слоями бланкета между источником и монитором.

Выбор узлов для интегрирования функций отклика по азимуту в секторе 180°. Приведённые в табл. 13, 14 азимутальные распределения откликов бланкетных мониторов на точечные изотропные источники DT-, DD- и ^{252}Cf -нейтронов использовались для определения минимального числа узлов интегрирования по схеме Гаусса, при котором отклонение интеграла от его точного значения не превышает заданной погрешности 2—3%. В качестве точного значения принималась величина интеграла с заведомо большим числом узлов — 20.

На рис. 13 отклики спадают приблизительно на порядок величины в диапазоне углов прямой видимости источника из детектора 0—100° и затем ещё на порядок величины в пределах угла 100—155°. Вклад в интеграл от распределения при ещё больших углах может считаться пренебрежимо малым, и поэтому диапазон интегрирования азимутальных зависимостей откликов полагался равным 0—155°.

Сходимость интегралов по схеме Гаусса от азимутальных распределений откликов бланкетных мониторов для различных спектров изотропного точечного источника показана на рис. 15. Для всех мониторов и спектров источников на графиках заметны осцилляции относительных величин интегралов, спадающие по мере увеличения числа узлов. При числе узлов шесть относительная погрешность расчёта интеграла оценивается 2—3%. Увеличение точности до уровня 1—2% потребовало бы увеличения числа узлов до 10 и более, что вряд ли целесообразно с точки зрения экономии времени на экспериментальные работы по калибровке.

Рис. 15. Сходимость интегральных откликов в зависимости от числа узлов Гаусса по азимуту для источников DT- (а), DD- (б) и ^{252}Cf -нейтронов (в): ■ — МНПБ; ● — МКД-1; ▲ — МКД-2

Рис. 14. Отношение откликов мониторов на DD- и DT-нейтроны источника: МНПБ^{DD}/МНПБ^{DT} (■); МКД-1^{DD}/МКД-1^{DT} (●); МКД-2^{DD}/МКД-2^{DT} (▲)

Рекомендованные значения координат узлов и соответствующих им углов интегрирования азимутальных зависимостей откликов по схеме Гаусса в пределах 0—153,5° представлены в табл. 15. В соответствии с методическим обоснованием [1] рассчитанные по этим интегралам средние значения откликов бланкетных мониторов на точечные источники в диапазоне 0—180° представляют отклики этих мониторов на эквивалентный кольцевой источник, который, по определению, соответствует откликам на штатный объёмный источник расчётной модели ИТЭР.

Т а б л и ц а 15. Рекомендованные узлы и соответствующие им углы для интегрирования по Гауссу азимутальной зависимости откликов бланкетных мониторов

Номер узла i	Узел Гаусса x_i	Азимутальный угол φ_i , град
1	–0,93247	5,17
2	–0,66121	25,9
3	–0,23862	58,3
4	0,23862	94,9
5	0,66121	127,3
6	0,93247	148,1

В табл. 16 даны полученные в расчёте модели с углом раствора 360° значения откликов бланкетных мониторов на распределённые источники нейтронов: два штатных источника, имитируемых двумерной матрицей нитевидных источников в профиле плазмы (современный вариант модели ИТЭР) или двумерной гистограммой (предшествующий вариант), и эквивалентный им кольцевой источник.

Т а б л и ц а 16. Отклики бланкетных мониторов (10^{-30} дел./н./ядро U) на эквивалентный кольцевой и объёмный источники

Источник		МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2
Объёмный	Матрица колец	0,325	0,402	0,296
	Матрица ячеек	0,323	0,394	0,305
Эквивалентное кольцо ($Z = 30$ см, $r = 560$ см)		0,322	0,414	0,340

Видно, что одноимённые отклики на штатные источники совпадают в пределах статистической погрешности расчёта (~1%). Это свидетельствует о том, что задание источника в виде колец и матрицы ячеек практически равноценно. Отклик на эквивалентное кольцо монитора МНПБ, расположенного в среднем по высоте сечении реактора, совпадает с откликом на штатный источник. Отклики на это кольцо мониторов МКД-1 и МКД-2, удалённых от среднего сечения реактора, несколько отличаются (соответственно на ~3 и 13%) от одноимённых откликов на штатный источник.

В табл. 17—19 результаты интегрирования азимутальных зависимостей откликов бланкетных мониторов с шестью и 20 узлами для различных спектров источника сравниваются с откликами на эквивалентный кольцевой источник и между собой. Различие точных (по 20 узлам) средних значений откликов и откликов на кольцевой источник для всех трёх мониторов не превышает ~4%, что близко к суммарной погрешности сравнения статистически некоррелированных расчётов рассматриваемых вариантов моделей (статистическая погрешность отдельного расчёта 1—2%). Погрешности вычисления интеграла, соответствующие уменьшению числа узлов с 20 до шести, как отмечено, не превышают ~3%.

Т а б л и ц а 17. Сравнение средних по азимуту эквивалентного кольца откликов на точечные ДТ-источники с откликами на эквивалентный кольцевой источник

Отклик	Монитор		
	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2
Кольцевой источник W_0 , 10^{-30} дел./н./атом	0,322	0,414	0,340
Средний отклик по 20 узлам $W_{\varphi 20}$, 10^{-30} дел./н./атом	0,334	0,413	0,348
Средний отклик по 6 узлам $W_{\varphi 6}$, 10^{-30} дел./н./атом	0,346	0,418	0,352
$W_{\varphi 20}/W_0$	1,039	0,997	1,021
$W_{\varphi 6}/W_0$	1,07	1,009	1,035
$W_{\varphi 6}/W_{\varphi 20}$	1,03	1,01	1,01

Т а б л и ц а 18. Сравнение средних по азимуту эквивалентного кольца откликов на точечные DD-источники с откликами на эквивалентный кольцевой источник

Отклик	Монитор		
	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2
Кольцевой источник W_0 , 10^{-30} дел./н./атом	0,199	0,152	0,139
Средний отклик по 20 узлам $W_{\varphi 20}$, 10^{-30} дел./н./атом	0,220	0,153	0,144
Средний отклик по 6 узлам $W_{\varphi 6}$, 10^{-30} дел./н./атом	0,228	0,155	0,146
$W_{\varphi 20}/W_0$	1,10	1,003	1,032
$W_{\varphi 6}/W_0$	1,14	1,016	1,047
$W_{\varphi 6}/W_{\varphi 20}$	1,036	1,012	1,014

Т а б л и ц а 19. Сравнение средних по азимуту эквивалентного кольца откликов на точечные ^{252}Cf -источники с откликами на эквивалентный кольцевой источник

Отклик	Монитор		
	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2
Кольцевой источник W_0 , 10^{-30} дел./н./атом	0,174	0,116	0,115
Средний отклик по 20 узлам $W_{\phi 20}$, 10^{-30} дел./н./атом	0,195	0,117	0,119
Средний отклик по 6 узлам $W_{\phi 6}$, 10^{-30} дел./н./атом	0,202	0,119	0,122
$W_{\phi 20}/W_0$	1,12	1,008	1,026
$W_{\phi 6}/W_0$	1,16	1,025	1,078
$W_{\phi 6}/W_{\phi 20}$	1,035	1,017	1,025

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОНИТОРОВ МНПБ, МКД-1 И МКД-2 К ПОЛОЖЕНИЮ ПЛАЗМЫ В РЕАКТОРЕ

Замена штатного источника нейтронов эквивалентным кольцевым источником в табл. 8—10 позволяет получить оценки пространственной стабильности калибровок бланкетных мониторов вблизи позиции эквивалентного кольца для монитора МНПБ с координатами $R = 560$ см, $Z = 30$ см.

Критерию стабильности калибровки $\pm 10\%$ удовлетворяет достаточно широкий диапазон радиусов кольцевого источника на рис. 16: от минимального радиуса 440 см при движении источника к центру до увеличения радиуса в противоположном направлении приблизительно на 1 м. Далее отклик монитора МНПБ, расположенного вблизи экваториального сечения камеры, резко возрастает по мере приближения к нему источника. Отклики микрокамер деления МКД-1 и МКД-2, наоборот, при этом спадают, что обусловлено увеличением экранирования первичных нейтронов источника бланкетом при падении их под большим углом к нормали.

Рис. 16. Отклики бланкетных мониторов МКД-1, МКД-2 и МНПБ в зависимости от положения кругового источника вблизи эквивалентного круга: а — радиальное распределение ($Z = 30$ см); б — высотное распределение ($R = 560$ см); ■ — МНПБ; ● — МКД-1; ▲ — МКД-2

При смещении источника по высоте диапазон стабильности для монитора МНПБ составляет ± 1 м, для мониторов МКД-1 и МКД-2 $\sim 0,5$ м.

ВЫВОДЫ

В модифицированных моделях реактора ИТЭР по программе MCNP рассчитаны двумерные матрицы откликов бланкетных мониторов МНПБ, МКД-1 и МКД-2 на кольцевые источники ДТ-нейтронов в профиле плазмы. На основе анализа сходимости интегралов от этих распределений в зависимости от числа узлов рекомендованы позиции точечного источника нейтронов с энергией 14 МэВ в профиле плазмы для калибровки откликов на штатный объёмный источник нейтронов. Сравнение интегралов по выбранным «экспериментальным» позициям точечного источника и «большому» числу узлов Гаусса (20) дало

оценку точности предложенной схемы интегрирования откликов бланкетных мониторов на уровне нескольких процентов.

В матрицах откликов на кольцевые источники возможно выделение области координат эквивалентного кольцевого источника ($r = 440\text{—}680$ см, $z = -10\text{—}30$ см), отклики на который практически равны соответствующим откликам на штатный объёмный источник модели Alite. Применение принципа эквивалентности кольцевого источника позволит уменьшить затраты времени на процедуру калибровки.

Рассчитанные в этой модели азимутальные распределения единичных ($\text{н.}^{-1}\cdot\text{атом}^{-1}$) откликов бланкетных мониторов на точечные изотропные источники со спектрами DT-, DD- и ^{252}Cf -нейтронов выглядят качественно подобными, что в принципе делает возможной калибровку мониторов только на DT-нейтронах с последующей перенормировкой результатов для DD-нейтронов.

Оценки показывают, что при статистической точности счёта камер деления 1% и реально достижимой интенсивности источника DT-нейтронов $\sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$ для всех бланкетных мониторов время облучения на «хвосте» азимутальных распределений (за пределами прямой видимости источника из монитора) измеряется сутками. Снижение заданной точности счёта до 3% уменьшит необходимое для калибровки время облучения приблизительно на порядок величины. Это, возможно, позволит провести азимутальные облучения МНПБ на одном кольце за несколько суток. Для облучения микрокамер деления требуется в 3—4 раза больше времени. Минимальная длительность облучения бланкетных мониторов с источниками DD- и ^{252}Cf -нейтронов будет более чем на порядок величины выше, чем в случае калибровки с генератором DT-нейтронов вследствие значительно меньшей интенсивности источника и почти вдвое меньших откликов мониторов.

Диагностическая система с пакетом активационных детекторов не является монитором мгновенной мощности реактора, поскольку накопленная в них активность в общем случае является функционалом нестационарного облучения. Калибровка рассматриваемого в ИТЭР набора активационных детекторов с помощью нейтронного генератора нецелесообразна ввиду низких уровней равновесной активности в условиях доступной интенсивности нейтронного генератора и, соответственно, большой статистической погрешности измерений.

Зависимость откликов от радиуса кольцевого источника на высоте 30 см (вблизи позиции эквивалентного кольца) демонстрирует достаточно широкий диапазон стабильности калибровок для всех бланкетных мониторов при уменьшении радиуса источника вплоть до его крайнего внутреннего положения в камере (при радиусе 440 см). При увеличении радиуса кольца (движении источника в камере наружу) диапазон стабильности составляет приблизительно 1 м. При смещении источника по высоте диапазон стабильности для монитора МНПБ составляет ± 1 м, для мониторов МКД-1 и МКД-2 $\sim \pm 0,5$ м.

REFERENCES

1. **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 neutrons.. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 3, pp. 31—48 (in Russian).
2. **Briesmeister J.F.** MCNP-4A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4A, LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1993.
3. **Aldama D.L., Trkov A.** FENDL-2.1: Evaluated Nuclear Data Library for Fusion Applications. INDC (NDS)-467. — Vienna. IAEA, 2004.
4. **Loughlin M.** Alite. 003. ITER Internal Report ITER_D_2LY78N, 08/28/2008.
5. **System Design Description Document (DDD).** Divertor Neutron Flux Monitor. DDD-PBS 55.BC. ITER Internal Report ITER_D_47LJLH v2.0, 22/06/2011.

6. **System** Design Description Document (DDD) Neutron Flux Monitor System in Equatorial Port #7 (Occluded). DDD-PBS 55.B4 vol. 3.1. ITER Internal Report ITER_D_3LTSG4, 21/07/2010.
7. **System** Design Description Document (DDD). Diagnostic — Micro Fission Chambers. DDD-PBS 55.B3 vol. 2.2. ITER Internal Report ITER_D_3T46BH, 04/10/2010.
8. **System** Design Description Document (DDD). Diagnostic Neutron Activation System. DDD-PBS 55.B8. ITER Internal Report ITER_D_3UYPYF v2.1, 01/11/2010.

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

Markovskiy D.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Markovskiy_DV@nrcki.

Received 10 June 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 4, pp. 79—95.