

УДК 539.125.52.081.089.68

## Создание рабочего эталона плотности потока тепловых нейтронов на базе реактора Ф-1

ГАРАПОВ Э. Ф., ИНИХОВ А. Г., КУЧЕРЯВЕНКО Е. П., ЛОМАКИН С. С., ПАНФИЛОВ Г. Г., ПЕТРОВ В. И., ХМЫЗОВ В. В., ЯРИЦЫНА И. А.

Через несколько лет после утверждения Госстандартом СССР государственного первичного эталона единицы плотности потока нейтронов ВНИИМ им. Д. И. Менделеева был создан и аттестован вторичный (рабочий) эталон, который представляет собой установку, использующую определенное расположение нейтронных изотопных источников в замедлителе. В воздушной сферической рабочей полости установки диаметром 200 мм создается изотропное поле тепловых нейтронов, составляющее  $6,70 \times 10^7$  нейтр./ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Такая плотность потока тепловых нейтронов вполне удовлетворительна для аттестации большинства обычно применяемых на практике детекторов и определения их эффективности, но недостаточна, чтобы аттестовать приборы во всем требуемом в настоящее время диапазоне плотности потоков тепловых нейтронов.

Для значительного расширения диапазона созданного ранее вторичного эталона было решено выполнить другой эталон на базе реактора Ф-1, который явится удобной промежуточной ступенью для связи с установками с большой плотностью потока нейтронов. Это позволит расширить диапазон существующего эталона до  $10^{14}$  нейтр./ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Аппарат Ф-1 представляет собой исследовательский уран-графитовый реактор, работающий на природном уране [1]. Активная зона реактора приблизительно шаровой формы диаметром 6 м окружена графитовым отражателем толщиной 60–90 см. Реактор имеет девять сквозных горизонтальных каналов различного сечения и два колодца, углубленных в активную зону, сечением  $60 \times 60$  и  $30 \times 30$  см, а также горизонтальный канал в графитовой тепловой колонне, которая представляет собой призму размером  $120 \times 120 \times 240$  см, примыкающую к отражателю.

В реакторе Ф-1 (рис. 1) были аттестованы три воздушные полости: в центре горизонтального канала, проходящего через центральную плоскость реактора; в канале графитовой тепловой колонны и в градуировочном колодце сечением  $60 \times 60$  см и глубиной 130 см, в который помещается графитовая вставка с центральным сквозным вертикальным каналом диаметром 80 мм.

Полость в горизонтальном канале квадратным сечением  $10 \times 10$  см ограничена с торцов на расстоянии 20 см от центра графитовыми блоками длиной 40 см и предназначена для градуировки детекторов нейтронов небольших размеров. В канале тепловой колонны создается поле с максвелловским спектром тепловых нейтронов, имеющих температуру практически равную температуре замедлителя. Канал имеет форму прямоугольника сечением  $18 \times 13,5$  см. Глубина канала 180 см. При облучении детекторов канал закрывается графитовой пробкой длиной 60 см. Градулируемые детекторы располагаются в центральной плоскости каналов на тонкостенных алюминиевых подставках. Подставку с детекторами по каналам реактора и тепловой колонны можно перемещать вручную или при помощи электропривода с пульта управления реактора. Погрешность установки детек-

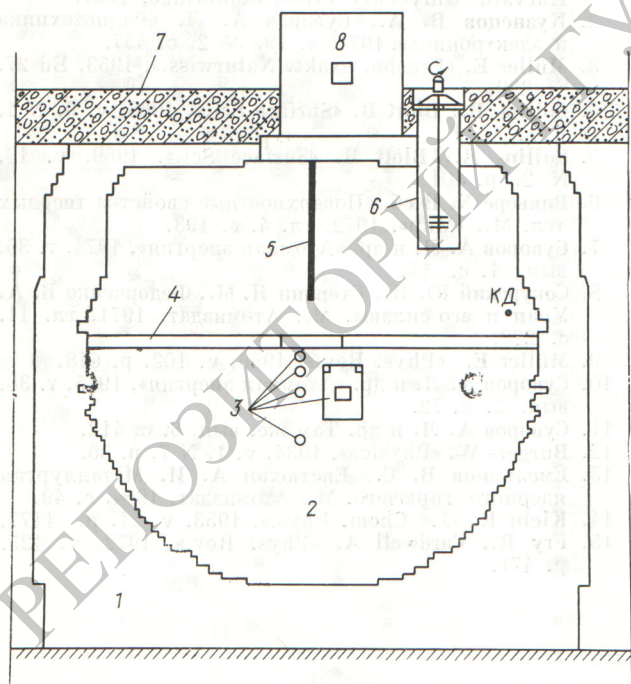


Рис. 1. Общая схема установки на базе реактора Ф-1;

1 — отражатель; 2 — активная зона; 3 и 4 — экспериментальные и горизонтальные каналы; 5 — регулирующий стержень; 6 — градуировочный колодец; 7 — защита; 8 — тепловая колонна



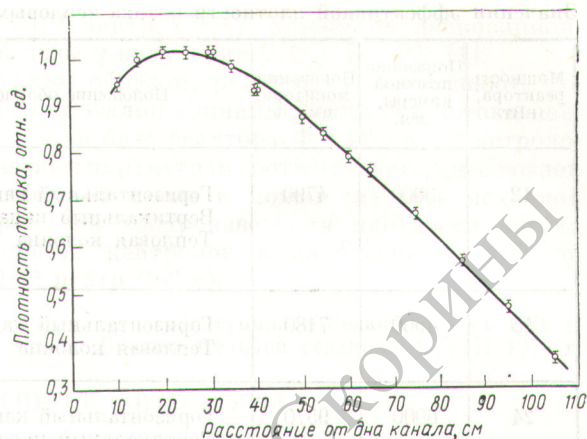
торов в канале  $\pm 0,5$  см. В состав эталона входит также малогабаритная камера КД-1 с  $0,12$  мг  $^{235}\text{U}$ , используемая в качестве монитора.

В аттестуемых каналах реактора Ф-1 были исследованы пространственно-угловые характеристики поля, а также его спектральные параметры. Для измерения пространственного распределения нейтронов в полостях использовались активационные детекторы из лютеция, диспрозия, марганца и индия. В горизонтальном канале и в канале тепловой колонны эти детекторы располагались по осям каналов на расстоянии  $3$  см друг от друга. Результаты исследований показали, что поле тепловых нейтронов практически не изменяется по длине этих каналов. Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте вертикального канала изучалось с помощью алюминиевой штанги с гнездами, располагаемыми на различной высоте через  $5$  см. Гнезда заполнялись предварительно откалиброванными марганцевыми фольгами. Относительное распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте вертикального канала показано на рис. 2. Для обеспечения идентичности условий облучения при аттестации вертикального канала детекторы располагались на вращающемся со скоростью  $10$  об/мин алюминиевом диске на высоте  $15$  см от дна колодца.

Для измерения углового распределения применялись детекторы из двух одинаковых диспрозиевых фольг, разделенных кадмиевым диском толщиной  $1$  мм. По отношению активности этих фольг при их различной ориентации определялась анизотропия поля нейтронов.

Оказалось, что в полости тепловой колонны поток нейтронов, идущих снизу со стороны активной зоны, в  $1,3$  раза превышает поток нейтронов, идущих сверху. В полости горизонтального канала поле нейтронов изотропно.

Спектральные параметры полей медленных нейтронов (эффективная температура распределения тепловых нейтронов  $T_n$ , эпитепловой параметр Весткотта  $r$  и коэффициент  $\alpha$ , характеризующий отклонение спектра замедляющихся нейтронов от закона  $1/E$ ) в каналах реактора Ф-1 были определены методом кадмиевых отношений [2] и методом спектральных индексов [3]. В первом случае использовались детекторы из индия, золота, лантана, меди и марганца, во втором случае — из лютеция, меди и марганца. Детекторы были прокалиброваны в канале тепловой колонны реактора Ф-1, где температу-



Р и с. 2. Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте вертикального канала вкладыша

ра нейтронов предполагалась равной температуре графита.

В результате измерений этими методами получены следующие значения спектральных параметров в горизонтальном и вертикальном каналах и в тепловой колонне соответственно:  $T_n = 365 \pm 7$ ;  $334 \pm 7$  и  $293 \pm 3$  К;  $r = 0,058 \pm 0,002$ ;  $0,033 \pm 0,002$  и  $(1,64 \pm 0,08) \cdot 10^{-4}$ , причем для горизонтального канала  $\alpha = -0,010 \pm 0,010$ .

В табл. 1 приведены значения толщины детекторов  $\delta$ , поправок на поглощение тепловых  $G_{th}$ , и надтепловых  $G_r$  нейтронов, поправки  $F_{Cd}$ , учитывающей поглощение надтепловых нейтронов в кадмиевых фильтрах толщиной  $1$  мм, резонансных интегралов  $I'$  и сечения активации тепловыми нейтронами  $\sigma_0$ .

Аттестация каналов реактора Ф-1 по эффективной плотности потока тепловых нейтронов была выполнена с помощью компаратора относительно государственного первичного эталона.

Параметры детекторов и измеряемые кадмиевые отношения в горизонтальном и вертикальном каналах Таблица 1

Детектор	$\delta$ , мг/см <sup>2</sup>	$F_{Cd}$	$G_{th}$	$G_r$	$\sigma_0$ , б	$I'$ , б	$R_{Cd}$	
							горизонтальный	вертикальный
$^{197}\text{Au}$	16,87	1,02	0,9825	0,547	98,7	1520	2,53	3,48
$^{115}\text{In}$	0,27	1,10	0,9998	0,975	160	2660	2,01	2,74
$^{55}\text{Mn}$	13,87	1,04	0,993	0,926	13,3	8,0	14,3	—
$^{63}\text{Cu}$	18,6	1,00	0,997	0,930	4,5	2,88	14,05	—
$^{139}\text{La}$	2,4	1,00	0,999	1,000	9	7,3	11,8	—



Значения эффективной плотности потока тепловых нейтронов

Мощность реактора, кВт	Показания штатной камеры, дел.	Показания монитора, имп./с	Положение облучения	Масса фольги, мг	Активность насыщения, расп./мин	$R_{Cd}$	$\Phi_{th}$ , нейтр./ $(м^2 \cdot с)$
12	3000	4790	Горизонтальный канал	12,223	$1,287 \cdot 10^9$	2,51	$3,499 \cdot 10^{13}$
			Вертикальный канал	12,664	$1,884 \cdot 10^8$	3,44	$0,585 \cdot 10^{13}$
			Тепловая колонна	13,735	$1,855 \cdot 10^6$	600	$7,565 \cdot 10^{10}$
18	4500	7180	Горизонтальный канал	9,254	$1,519 \cdot 10^9$	2,40	$5,263 \cdot 10^{13}$
			Тепловая колонна	12,127	$2,466 \cdot 10^6$	600	$11,363 \cdot 10^{10}$
24	6000	9570	Горизонтальный канал	11,541	$2,456 \cdot 10^9$	2,49	$7,032 \cdot 10^{13}$
			Вертикальный канал	12,781	$3,788 \cdot 10^8$	3,45	$1,169 \cdot 10^{13}$
			Тепловая колонна	13,127	$3,570 \cdot 10^6$	600	$15,205 \cdot 10^{10}$
			Государственный эталон	13,136	$1,601 \cdot 10^4$	6,28	$5,73 \cdot 10^8$

Эффективной плотностью потока тепловых нейтронов  $\Phi_{th}$  принято считать произведение плотности нейтронов  $n_{th}$  с энергией меньше эффективной граничной энергии кадмия  $E_{Cd}$  на скорость нейтронов  $v_0$ , равную 2200 м/с. Значение эффективной плотности потока тепловых нейтронов, воспроизводимой в государственном первичном эталоне, определялось методом активации золотых фольг и составляет в настоящее время  $5,73 \cdot 10^8$  нейтр./ $(м^2 \cdot с)$  с суммарной погрешностью 1% при доверительной вероятности 0,99% [4]. Спектральные параметры поля медленных нейтронов, определенные методом кадмиевых отношений, составляют:  $T_n = 314 \pm 5$  К;  $\alpha = -0,016 \pm 0,008$ .

При измерениях в качестве компаратора использовались золотые фольги диаметром 10 мм. Средняя масса фольги 12 мг. Фольги вначале были облучены в рабочей полости первичного эталона в алюминиевых и кадмиевых чехлах толщиной 1 мм. Аналогичные по массе и площади золотые фольги были облучены в каналах реактора Ф-1: в центре горизонтального канала, в центре канала графитовой тепловой колонны и на высоте 15 см от дна вертикального канала.

Время облучения фольг (150 мин) было выбрано с таким расчетом, чтобы погрешность определения  $\Phi_{th}$  вследствие нахождения в переменном поле нейтронов в момент загрузки детекторов в каналы реактора не превышала 0,2%. Активность золотых фольг, облученных в эталоне и реакторе, измерялась на эталонных установках ВНИИМ  $\beta - \gamma$ - и  $4\pi\beta - \gamma$ -совпадений. Эффективная плотность потока тепловых

нейтронов в каналах реактора была определена по известной эффективной плотности потока в государственном первичном эталоне на основании уравнения

$$\Phi_{th}^p = \Phi_{th}^a \frac{A^p (R_{Cd}^p - F_{Cd}) R_{Cd}^a N^a g (T_n^a) G_{th}^a (T_n^a \delta^a)}{A^a (R_{Cd}^a - F_{Cd}) R_{Cd}^p N^p g (T_n^p) G_{th}^p (T_n^p \delta^p)}$$

где  $A$  — активность насыщения в фольге;  $N$  — число ядер золота в фольге;  $R_{Cd}$  — кадмиевое отношение;  $g$  — параметр Весткотта.

В табл. 2 приведены значения активности насыщения, усредненные по результатам измерений при трех уровнях мощности реактора, выполненным на установках  $\beta - \gamma$ - и  $4\pi\beta - \gamma$ -совпадений. Составляющая случайной погрешности, связанная с измерением активности фольг, во всех случаях не превышает 0,2%. В табл. 2 приведены показания штатной камеры, входящей в систему управления реактором, а также показания монитора КД-1. Нестабильность работы данной камеры монитора в течение 2 ч непрерывной работы реактора не превышает 0,2%.

В табл. 3 приведены основные составляющие случайных и систематических погрешностей, обуславливающие неопределенность результатов измерений эффективной плотности потоков тепловых нейтронов в каналах реактора. Суммарная погрешность полученного значения плотности потока тепловых нейтронов для доверительной вероятности 0,99, рассчитанная согласно [5], не превышает 2%.

Дополнительно были исследованы быстрый компонент поля нейтронов с помощью поро-



Погрешности определения эффективной плотности потока тепловых нейтронов, %

Таблица 3

Величина	Случайная	Систематическая
Погрешность эталона	—	1,00
$A_p$	0,2	—
$R_{Cd}^p$	0,3	—
$N^p$	0,1	—
$G_{th}^p$	—	0,2
$t_{обл}$	—	0,2
$t_b$	—	Не более 0,3
Показания монитора	0,2	—

вых детекторов из серы, индия и родия и мощность экспозиционной дозы в центре горизонтального канала реактора Ф-1, которая определялась с использованием целевой ионизационной камеры чувствительным объемом 2,8 см<sup>3</sup>, градуированной вначале с помощью образцовых гамма-источников. При работе реактора на мощности 24 кВт плотность потока быстрых нейтронов с энергией свыше 3 МэВ составляет

$2,6 \cdot 10^{12}$  нейтр./(м<sup>2</sup>·с). Мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения  $2,2 \pm 0,4$  Р/с [1].

Таким образом, результаты показывают, что рабочий эталон единицы плотности потока нейтронов на базе реактора Ф-1 по своим метрологическим параметрам соответствует общесоюзной поверочной схеме и может служить исходной мерой для воспроизведения плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне от  $10^{10}$  до  $7 \cdot 10^{14}$  нейтр./(м<sup>2</sup>·с).

Поступила в Редакцию 4/VI 1976 г.  
В окончательной редакции 17/VIII 1976 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарапов Э. Ф. и др. В сб.: Ядерное приборостроение. Труды СНИИП. Вып. 20. М., Атомиздат, 1973, с. 11.
2. Андреев О. Л., Кучерявенко Е. П. «Метрология», 1974, № 5, с. 31.
3. Ломакин С. С. и др. В сб.: Ядерное приборостроение. Труды СНИИП. Вып. XVII. М., Атомиздат, 1962, с. 11.
4. Ярицына И. А. и др. В сб.: Метрология и измерительная техника. Вып. 6. Л., «Энергия», 1975, с. 5.
5. Кудряшова К. Ф., Рабинович С. Г., Резник К. А. В сб.: Труды метрологических институтов СССР. Вып. 134 (194). М., Изд-во стандартов, 1972, с. 5.