

8. Compant La Fontaine A., Pashkovsky V.G. Study of selective heating at ion cyclotron resonance for the plasma separation process. — Phys. Plasmas, 1995, v. 2, № 12, p. 4641—4649.
9. Compant La Fontaine A., Gil C., Louvet P. — Com. Rend. Acad. Sci. Paris, Ser. II, 1989, v. 308, p. 821.
10. Карчевский А.И., Лазько В.С., Муромкин Ю.А. и др. Исследование разделения изотопов лития в плазме при изотопически селективном ИЦР-нагреве. — Физика плазмы, 1993, т. 19, с. 411—419.
11. Волосов В.И. Источник ионов. Патент РФ № 2071137. — Бюл. изобр., № 36; пер. 27.12.96.
12. Волосов В.И., Чуркин И.Н. Антенна. Патент РФ № 2120704. — Там же, № 29; пер. 20.10.98.
13. Волосов В.И., Котельников И.А., Чуркин И.Н. Способ нагрева ионов целевого изотопа в плазменном ИЦР-методе разделения изотопов и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2143185. — Там же, № 35; пер. 20.12.99.
14. Волосов В.И., Котельников И.А., Кузьмин С.Г. Антенна для ИЦР-метода разделения изотопов на второй гармонике циклотронной частоты. Заявка на изобретение № 99109341 от 27.04.99.
15. Белагин М.И., Звонков А.В., Тимофеев А.В. Способ разделения изотопов. Патент РФ № 1742900 от 5.07.93.
16. Волосов В.И., Чуркин И.Н., Тимофеев А.В. Установка для разделения изотопов. Патент РФ № 2108141. — Бюл. изобр. № 10; пер. 10.04.98.
17. Муромкин Ю.А. Разделение изотопов в плазме с помощью ионно-циклотронного нагрева. — Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы, т. 12, М., ВИНТИ, 1991, с. 83—110.
18. Mussetto M., Romesser T., Dixon D. e.a. — IEEE Intern. Conf. on Plasma Science, San Diego, Calif. — 1983, IEEE Conf. Record Abstracts., 1983, p. 71.
19. Volosov V.I., Abdrashitov G.F., Bekhtenev A.A. e.a. On the mechanism of heavy-impurity plasma filling (S-discharge). — J. Nucl. Materials, 1984, v. 128, № 129, p. 445.
20. Churkin I.N., Volosov V.I., Steshov A.G. Universal metal ion source. — Rev. Scient. Instrum., 1999, v. 69, № 2, p. 822—824.
21. Котельников И.А., Кузьмин С.Г. Разделение тяжелых изотопов при помощи ИЦР-нагрева на второй гармонике. — Физика плазмы, 1999, т. 25, с. 10.
22. Тимофеев А.В. ВЧ-антенны для разделения изотопов. — Там же, т. 25, вып. 3, с. 232—241.
23. Котельников И.А., Кузьмин С.Г. Планарная антенна для ИЦР-разделения изотопов: Препринт ИЯФ 99-30. Новосибирск, 1999.
24. Волосов В.И., Котельников И.А., Кузьмин С.Г. О разделении изотопов тяжелых элементов методом изотопически селективного ИЦР-нагрева. — Физика плазмы, 1998, т. 24, № 6, с. 517—529.

Поступила в Редакцию 10.12.99

УДК 539.125.5.164; 539.173.84

СИСТЕМА МОДЕЛИРУЮЩИХ ОПОРНЫХ ПОЛЕЙ НЕЙТРОНОВ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРАХ

Севастьянов В.Д. (ГНЦ РФ — ВНИИФТРИ)

Метрологическое обеспечение нейтронных измерений на ядерных реакторах базируется на Государственном специальном эталоне единиц плотности потока и флюенса нейтронов [1—3]. Трудности метрологического обеспечения, обусловленные разнообразием энергетических спектров нейтронов, высокими требованиями к точности измерений (близкой к максимально достижимой на современном уровне развития науки и техники) и ограниченным набором нейтронных источников в составе госспецэталона, делают невозможным непосредственную передачу размера воспроизводимых госспецэталонных единиц в поля нейтронов реакторов. Поэтому было принято решение о создании системы моделирующих опорных полей нейтронов непосредственно на исследовательских реакторах. Размеры единиц плотности потока и флюенса нейтронов в моделирующих полях воспроизводятся совместно с госспецэталоном.

Совместное воспроизведение предполагает использование одних и тех же стандартизованных детекторов нейтронов, методик измерений, ядерно-физических констант и единой программы определения характеристик полей нейтронов при исследованиях во всех моделирующих опорных полях.

Ранее в практике нейтронных измерений получили распространение опорные поля нейтронов [4, 5]. Понятие опорного поля подразумевает наличие фиксированного объ-

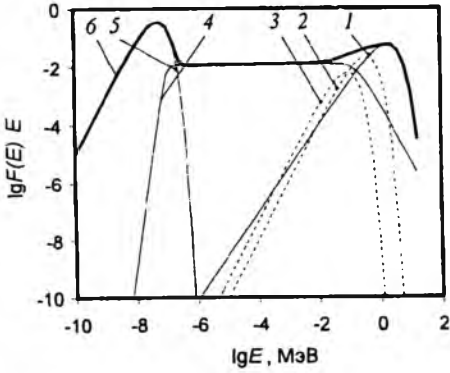
ема нейтронного поля конкретного реактора, используемого в качестве эталонной меры энергетического состава нейтронного излучения для воспроизведения единиц плотности потока (или флюенса) нейтронов, аттестации (поверки) других нейтронных полей, исследований и поверки радиометрической и спектрометрической аппаратуры. Моделирующее опорное поле нейтронов отличается от опорного тем, что оно либо создается на специальной установке, предназначенной для решения конкретных научно-технических задач, либо формируется на исследовательских реакторах таким образом, чтобы его характеристики наиболее полно отвечали требованиям решаемых научно-технических проблем. Кроме того, на стадии аттестации должно быть проведено его сравнение с госпечеталоном. Моделирующее опорное поле второго типа формируется либо с помощью специальных трансформаторов нейтронного излучения, либо использованием предметов, окружающих активную зону быстрого реактора (стен, пола, потолка экспериментального зала) [6, 7]. В последнем случае активная зона реактора размещается оптимальным образом на фиксированном расстоянии от таких предметов и энергетический спектр формируется нейтронами как утечки из активной зоны реактора, так и рассеянными от окружающих предметов.

В качестве трансформаторов нейтронного излучения использовали слои графита, воды, полиэтилена, карбида бора, стали, свинца и др. Как правило, при создании моделирующего опорного поля требуемого типа на предварительном этапе рассчитывают характеристики полей нейтронов за определенным набором указанных трансформаторов, затем проводят экспериментальные исследования энергетических спектров нейтронов. Для экспрессного определения спектров нейтронов использовали малогабаритные камеры деления с тонкими слоями (по сравнению с длиной пробега осколков деления в материале слоя) ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu [8] и высокочувствительные нейтронно-активационные и делительные детекторы [7, 9]. На стадии аттестации (поверки) моделирующего опорного поля детекторы соответствовали серийно изготавливаемым нейтронно-активационным и делительным АКН, ДКН, АКН-Т [10]. Измерения проводили по методикам [11–13].

Энергетические спектры нейтронов в моделирующем опорном поле восстанавливали по программе КАСКАД [14, 15], которая позволяет уже на начальной стадии найти аналитическое представление искомого спектра в виде нескольких модельных функций, что важно при моделировании конкретного спектра нейтронов. Программу можно также использовать для определения основных характеристик (энергетического спектра, флюенса, эффективной температуры) в диапазоне энергии нейтронов 10^{-10} –18 МэВ, получения усредненных по восстановленному спектру нейтронов сечений дозиметрических ядерных реакций, имеющихся в библиотеке программы, сопоставления моделирующих опорных полей с аналогичными стандартными спектрами [16, 17], для которых установлены с высокой точностью указанные сечения, и их сравнения по флюенсу (плотности потока) нейтронов с госпечеталоном (необходимо знание сечений ядерных реакций в спектрах моделирующих опорных полей и эталонного источника нейтронов).

При восстановлении спектров использовали стандартные справочные данные [18], а также данные зарубежных файлов ENDF-B/VI и IRDF-85. Всего в библиотеке программы КАСКАД имеется примерно 80 сечений дозиметрических ядерных реакций.

Окончательное решение об использовании программы КАСКАД было принято после апробирования при восстановлении наиболее изученных полей в практике нейтронных измерений, таких, как стандартное поле для реакторной дозиметрии, которое применяют за рубежом для исследования сечений ядерных реакций после тщательного исследования различными экспериментальными методами и сопоставления полученных данных с расчетом [16], поле нейтронов в центре активной зоны реактора БР-1, которое использовали для корректировки сечений дозиметрических ядерных реакций в ФЭИ [17], поле нейтронов ИР-50 [19], которое было тщательно изучено и исполь-



зовано для окончательной доводки нейтронно-активационных детекторов перед серийным выпуском.

На рисунке приведен дифференциальный энергетический спектр нейтронов ВЭК-4 реактора ИР-50, восстановленный по программе КАСКАД, а также его отдельные компоненты.

В табл. 1 приведены в качестве иллюстрации результаты согласования измеренных и рассчитанных сечений для дозиметрических реакций в наиболее изученных полях нейтронов.

Т а б л и ц а 1. Согласование сечений ядерных реакций

Реакция	Количество реакций на 1 ядро нуклида-мишени	σ , мб		Отличие, %
		Эксперимент	Расчет	
1	2	3	4	5
Спектр деления ^{235}U тепловыми нейтронами				
$^{19}\text{F}(n, 2n)$	$0,1345 \cdot 10^{-14}$	$0,7812 \cdot 10^{-2}$	$0,7975 \cdot 10^{-2}$	2,04
$^{24}\text{Mg}(n, p)$	$0,2470 \cdot 10^{-12}$	1,435	1,426	-0,61
$^{27}\text{Al}(n, p)$	$0,6503 \cdot 10^{-12}$	3,777	3,645	-3,63
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	$0,1179 \cdot 10^{-12}$	0,6848	0,6862	0,21
$^{32}\text{S}(n, p)$	$0,1076 \cdot 10^{-12}$	62,49	60,36	-3,53
$^{54}\text{Fe}(n, p)$	$0,1323 \cdot 10^{-10}$	76,84	75,07	-2,36
$^{56}\text{Fe}(n, p)$	$0,1710 \cdot 10^{-12}$	0,9932	1,008	1,49
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	$0,1719 \cdot 10^{-10}$	99,84	98,14	-1,73
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)$	$0,7288 \cdot 10^{-13}$	0,4233	0,4451	4,90
$^{104}\text{Rh}(n, n')$	$0,1239 \cdot 10^{-9}$	719,6	717,1	-0,36
$^{115}\text{In}(n, n')$	$0,3048 \cdot 10^{-10}$	177,0	182,6	3,06
$^{199}\text{Hg}(n, n')$	$0,3927 \cdot 10^{-10}$	228,1	217,2	-5,00
$^{204}\text{Pb}(n, n')$	$0,3351 \cdot 10^{-11}$	19,46	18,54	-4,97
$^{237}\text{Np}(n, f)$	$0,2247 \cdot 10^{-9}$	1305,0	1316,0	0,81
$^{238}\text{U}(n, f)$	$0,5008 \cdot 10^{-10}$	290,9	292,8	0,67
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)$	$0,1376 \cdot 10^{-10}$	79,92	79,63	-0,36
$^{235}\text{U}(n, f)$	$0,2101 \cdot 10^{-9}$	1220,0	1219,0	-0,13
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	$0,3036 \cdot 10^{-9}$	1763,0	1846,0	4,46
$^{241}\text{Am}(n, f)$	$0,2349 \cdot 10^{-9}$	1364,0	1437,0	5,03
Примечание. Флюенс нейтронов $1,722 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; средняя энергия 1,923 МэВ; среднеквадратичное отклонение 0,0308.				
Спектр нейтронов в центре активной зоны БИР-2				
$^{235}\text{U}(n, f)$	$0,2040 \cdot 10^{-9}$	1229,0	1255,0	2,10
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	$0,2870 \cdot 10^{-9}$	1728,0	1787,0	3,26
$^{238}\text{U}(n, f)$	$0,2820 \cdot 10^{-9}$	1698,0	1682,0	-0,95
$^{237}\text{Np}(n, f)$	$0,1500 \cdot 10^{-9}$	903,4	878,9	-2,78

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
$^{104}\text{Rh}(n, n')$	$0,7600 \cdot 10^{-10}$	457,7	452,6	-1,13
$^{115}\text{In}(n, n')$	$0,1700 \cdot 10^{-10}$	102,4	101,1	-1,28
$^{240}\text{Pu}(n, f)$	$0,1480 \cdot 10^{-9}$	891,3	909,9	2,04
$^{238}\text{U}(n, f)$	$0,2600 \cdot 10^{-10}$	156,6	157,1	0,31
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	$0,8800 \cdot 10^{-11}$	53,00	51,99	-1,94
$^{56}\text{Fe}(n, p)$	$0,8850 \cdot 10^{-13}$	0,5330	0,5327	-0,05
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	$0,5750 \cdot 10^{-13}$	0,3463	0,3626	4,49
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)$	$0,2280 \cdot 10^{-10}$	137,3	135,6	-1,29
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	$0,2630 \cdot 10^{-11}$	15,84	15,96	0,78
$^{241}\text{Am}(n, f)$	$0,1470 \cdot 10^{-9}$	885,3	856,7	-3,33
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)$	$0,3540 \cdot 10^{-13}$	0,2132	0,2202	3,17
$^{32}\text{S}(n, p)$	$0,5480 \cdot 10^{-11}$	33,00	31,91	-3,41

Примечание. Флюенс нейтронов $1,661 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; средняя энергия 1,206 МэВ; среднеквадратичное отклонение 0,0245.

Спектр нейтронов в ВЭК-4 ИР-50

$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	$0,4290 \cdot 10^{-12} *$	53,83	55,85	3,62
$^{176}\text{Lu}(n, \gamma)$	$0,1710 \cdot 10^{-7}$	$0,2146 \cdot 10^7$	$0,2114 \cdot 10^7$	-1,49
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)$	$0,1540 \cdot 10^{-9} *$	$0,1932 \cdot 10^5$	$0,1971 \cdot 10^5$	1,95
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)$	$0,6080 \cdot 10^{-9}$	$0,7629 \cdot 10^5$	$0,7545 \cdot 10^5$	-1,12
$^{139}\text{La}(n, \gamma)$	$0,1160 \cdot 10^{-11} *$	145,6	142,9	-1,88
$^{139}\text{La}(n, \gamma)$	$0,4050 \cdot 10^{-10}$	5082,0	5127,0	0,89
$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)$	$0,1320 \cdot 10^{-11} *$	165,6	167,5	1,11
$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)$	$0,5960 \cdot 10^{-10}$	7478,0	7657,0	2,34
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	$0,4740 \cdot 10^{-12} *$	59,48	61,34	3,04
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	$0,2140 \cdot 10^{-10}$	2685,0	2564,0	-4,73
$^{59}\text{Co}(n, \gamma)$	$0,5370 \cdot 10^{-11} *$	673,8	676,5	0,40
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	$0,3280 \cdot 10^{-11} **$	411,6	403,0	-2,12
$^{237}\text{Np}(n, f)$	$0,1390 \cdot 10^{-11}$	174,4	177,0	1,44
$^{104}\text{Rh}(n, n')$	$0,7530 \cdot 10^{-12}$	94,48	94,17	-0,33
$^{115}\text{In}(n, n')$	$0,1850 \cdot 10^{-12} *$	23,21	22,95	-1,13
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	$0,1000 \cdot 10^{-12} *$	12,55	12,39	-1,23
$^{32}\text{S}(n, p)$	$0,6130 \cdot 10^{-13} *$	7,692	7,602	-1,18
$^{54}\text{Fe}(n, p)$	$0,7410 \cdot 10^{-13} *$	9,298	9,495	2,08
$^{27}\text{Al}(n, p)$	$0,3900 \cdot 10^{-14} *$	0,4894	0,4723	-3,61
$^{56}\text{Fe}(n, p)$	$0,1120 \cdot 10^{-14} *$	0,1405	0,1341	-4,84
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)$	$0,4960 \cdot 10^{-15} *$	$0,6224 \cdot 10^{-1}$	$0,6325 \cdot 10^{-1}$	1,61
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	$0,7300 \cdot 10^{-15} *$	$0,9160 \cdot 10^{-1}$	$0,9280 \cdot 10^{-1}$	1,29
$^{238}\text{Pu}(n, f)$	$0,2700 \cdot 10^{-11} **$	338,8	355,1	4,60

Примечание. Флюенс нейтронов $7,970 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; средняя энергия 0,26 МэВ; среднеквадратичное отклонение 0,0253.

*, **Измерения в фильтре из кадмия и ^{10}B с толщиной стенки 1 мм и 1 г/см^2 соответственно.

Спектр нейтронов деления ^{235}U тепловыми нейтронами принимался в виде [20] $F(E) = 0,77732\sqrt{E} \exp(-0,780E)$, спектр нейтронов в центре активной зоны БИР-2 $F(E) = 0,41104\sqrt{E} \exp(-0,780E) + 11,79E^{-5E}$ [15]. Спектр нейтронов ИР-50 (ВЭК-4) представлялся в виде суперпозиции из пяти компонентов:

$$F(E) = 0,09205\sqrt{E} \exp(-0,765E) + 0,99688E \exp(-5E) + 4,648E \exp(-20E) + + 8,878 \cdot 10^{14}E \exp(-3,7 \cdot 10^7E) + 0,013677(1/E^{0,99})[1 + (10^{-7}/E)^7]^{-1}[1 + (E/0,2)^2]^{-1}.$$

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что уровень согласования данных для спектров нейтронов БИР-2 и ИР-50 находится на уровне согласования данных для стандартного спектра нейтронов деления ^{235}U тепловыми нейтронами.

В табл. 2 приведены характеристики моделирующих полей нейтронов на исследовательских реакторах. Здесь же для сравнения приведены характеристики наиболее изученных полей нейтронов, применяемых в практике нейтронных измерений как за рубежом, так и у нас в стране и являющихся аналогами моделирующих опорных полей. Априорные спектры нейтронных полей табл. 2 при восстановлении по программе КАСКАД получены суперпозицией минимального числа классических спектров (нейтронов деления, упругого и неупругого рассеяния нейтронов, нейтронов замедления в форме спектра Ферми):

$$F(E) = A_F(2\alpha_F 3/2/\sqrt{\pi})\sqrt{E} \exp(-\alpha_F E) + A_n^1(\alpha_n^1)^2 E \exp(-\alpha_n^1 E) + \dots + + A_n^i(\alpha_n^i)^2 E \exp(-\alpha_n^i E) + A_M \alpha_M E \exp(-\alpha_M E) + + A_\Phi(1/E^{\alpha_\Phi})[1 + (10^{-7}/E)^7]^{-1}[1 + (E/0,2)^2]^{-1},$$

где $F(E)$ — единичный флюенс нейтронов; E — энергия нейтронов, МэВ; индексы F, H, M, Φ относятся соответственно к компонентам спектра, обусловленным нейтронами деления ^{235}U (либо ^{239}Pu), неупругим рассеянием нейтронов в топливе и конструкционных элементах активной зоны реактора либо окружающих ее предметов, упругим рассеянием нейтронов на ядрах водорода (либо углерода), содержащихся в замедлителях нейтронов либо в материале окружающих предметов, замедленными нейтронами в форме спектра Ферми.

Т а б л и ц а 2. Спектральные характеристики полей нейтронов на исследовательских ядерных реакторах

Источник нейтронов, тип реактора	Флюенс нейтронов, см ⁻² ; среднее квадратичное отклонение, % (число ядерных реакций)	Энергия нейтронов в спектре: средняя, МэВ; соответствующая доля в спектре: $P = 0,95$ кэВ; $P = 0,5$ МэВ; $P = 0,05$ МэВ	Компонент спектра			
			$\alpha_F(A_F)$	$\alpha_n^i(A_n^i)$	$\alpha_M(A_M), \times 10^7$	$\alpha_\Phi(A_\Phi)$
1	2	3	4	5	6	7
Первичные стандартные спектры						
Спонтанное деление $^{252}\text{Cf}^*$ [16, 21]	3,16 (20)	2,13; 260; 1,68; 5,5	0,707 (100)			
Деление $^{235}\text{U}^*$ тепловыми нейтронами [16, 21]	2,87 (19)	1,94; 240; 1,57; 5,1	0,780 (100)			
Спектр быстрых и промежуточных нейтронов в центре активной зоны быстрых реакторов либо специальных моделирующих устройств						
Godiva* (США) [16, 21, 22]	$1 \cdot 10^{14}$; 3,50 (13)	1,50; 143; 1,020; 4,5	0,780 (71,9)	5(28,1)		

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
БР-1* [17]	$2 \cdot 10^{14}$; 2,78 (18)	1,48; 115; 0,950; 4,5	0,759 (66,5)	5 (33,5)		
УАУОI* (Япония) [16, 21]	$4 \cdot 10^{15}$; 3,50 (14)	1,36; 113; 0,889; 4,22	0,794 (63,9)	5 (36,1)		
ТАПИРО* (Италия) [16, 21]	$1 \cdot 10^{15}$	1,44; 122; 0,90; 4,4				
БАРС-1 (ЦЭК)*** [23]	$5,0 \cdot 10^{14}$; 2,06 (11)	1,37; 115; 0,820; 4,30	0,786 (63,0)	5 (37,0)		
БИР-2 (ЦЭК)** [15]	$4,5 \cdot 10^{14}$; 2,98 (16)	1,206; 100; 0,66; 4,1	0,780 (52,2)	5 (47,8)		
БР-1 (ЦЭК)*** [24]	$1,4 \cdot 10^{15}$; 2,24 (14)	1,19; 98; 0,63; 3,9	0,786 (51,0)	5 (49,0)		
SPR-III* (ЦЭК) (США) [25]	$5,6 \cdot 10^{14}$; 3,03 (10)	1,21; 85; 0,65; 3,95	0,810 (58,2)	5 (41,8)		
БР-К1 (ЦЭК)*** [25]	$5 \cdot 10^{14}$; 3,05 (9)	0,77; 75; 0,40; 2,95	0,800 (25,6)	5 (74,4)		
БИГР-1 (ЦЭК)*** [26]	$1,1 \cdot 10^{16}$; 3,32 (13)	0,69; 1,6; 0,295; 2,75	0,870 (28,2)	5 (50,3); 120 (10,8); 320 (5,96); 1280 (2,74); 4800 (2,13)		
БР-К1 (ЦЭК+Рb)*** [25]	$3 \cdot 10^{14}$; 5,44 (13)	0,661; 63; 0,35; 2,35	0,830 (18,9)	5 (81,1)		
SIGMA- SIGMA** ИР-100 [16, 21]	$5 \cdot 10^{13}$; 3,88 (15)	0,759; 12,75; 0,330; 3,1	0,800 (30,0)	5 (42,6); 16 (18,9); 80 (5,12); 320 (1,32); 1280 (9,9 · 10 ⁻⁴); 4800 (1,23)		
SIGMA-SIGMA* (Бельгия) [16, 21]	$5 \cdot 10^{14}$; 4,07 (15)	0,774; 20; 0,400; 2,9	0,792 (26,3)	5 (68,7); 80 (2,57); 320 (1,29); 1280 (0,0063); 4800 (0,0055)		
CFRMF* (США) [16, 20, 21]	$1 \cdot 10^{16}$; 3,76 (16)	0,762; 16; 0,363; 2,8	0,770 (25,8)	5 (62,9); 20 (8,75); 802 (1,56); 4800 (1,10)		

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
ISNF* (США) [16, 20, 21]	$1,5 \cdot 10^{14}$; 4,90 (14)	0,80; 8,0; 0,565; 3,5	0,835 (48,0)	5 (47,5); 320 (2,35); 1280 (1,28); 4800 (0,0097)		
BIG TEN* (США) [16, 20, 21]	$4 \cdot 10^{14}$; 3,73 (13)	0,601; 44; 0,32; 2,33	0,786 (18,2)	5 (36,7); 7,5 (45,2)		
Спектр нейтронов утечки из активных зон быстрых реакторов						
БАРС-1 ($R = 300$)** [23, 27]	$3,65 \cdot 10^{12}$; 2,93 (12)	1,42; 108; 0,88; 4,40	0,780 (65,3)	5 (34,7)		
БИР-2 ($R = 250$)** [15, 28]	$1,05 \cdot 10^{13}$; 2,72 (12)	1,11; 85; 0,575; 3,75	0,780 (46,6)	5 (53,4)		
БИГР (БП)*** [26]	$4,15 \cdot 10^{12}$; 2,94 (13)	0,727; 5,0; 0,310; 3,10	0,830 (29,6)	5 (47,2); 90 (15,3); 320 (7,26)	3,26 (0,0830)	0,98 (0,0593)
Спектр нейтронов на разном расстоянии от центра активной зоны быстрых реакторов						
ТИБР ($R = 670$)** [4]	$1,36 \cdot 10^{12}$; 2,71 (20)	0,7661; 0,001; 0,275; 3,30	0,800 (34,5)	5 (22,5); 20 (10,7); 80 (8,894); 320 (7,16)	3,26 (3,43)	0,92 (1,73)
БР-1* [24, 29]:						
$R = 715$	$3,25 \cdot 10^{12}$; 2,84 (9)	1,235; 32; 0,710; 4,10	0,800 (60,8)	5 (34,4)	3,00 (0,906)	0,96 (3,89)
$R = 1013$	$2,01 \cdot 10^{12}$; 2,87 (13)	1,048; 2,0; 0,540; 3,85	0,800 (46,7)	5 (46,1)	3,00 (1,32)	0,36 (5,88)
$R = 1565$	$9,53 \cdot 10^{11}$; 2,79 (13)	0,954; 0,00255; 0,490; 3,50	0,800 (40,4)	4 (44,9)	3,00 (2,98)	0,96 (11,78)
$R = 2215$	$5,72 \cdot 10^{11}$; 2,86 (8)	0,825; 0,0020; 0,355; 3,25	0,815 (35,7)	5 (39,9)	3,00 (5,17)	0,96 (19,23)
БАРС-1** [7]:						
$R = 1000$	$4,97 \cdot 10^{11}$; 2,10 (11)	0,907; 1,9; 0,370; 3,5	0,790 (40,9)	5 (33,2); 20 (12,7); 320 (7,58)	3,16 (1,85)	0,93 (5,62)
МОП-1	$8,95 \cdot 10^{10}$; 2,98 (11)	0,828; $8,0 \cdot 10^{-5}$; 0,280; 3,5	0,770 (35,7)	5 (33,1); 320 (2,33)	3,16 (7,94)	0,93 (27,93)
МОП-2	$7,67 \cdot 10^{10}$; 2,62 (11)	0,427; $6,3 \cdot 10^{-5}$; 0,190; 180	0,794 (12,4)	5 (53,2)	3,16 (7,78)	0,93 (26,62)
БР-10 (БР-3)** [30]	$1,83 \cdot 10^7$ с ⁻¹ · см ⁻² ; 2,96 (13)	0,852; 2,0; 0,39; 3,30	0,790 (32,8)	5 (57,2); 1280 (8,67)		0,92 (1,89)
БИГР*** [26]:						
$R = 800$	$5,55 \cdot 10^{11}$; 2,91 (12)	0,633; 0,6128; 0,255; 2,75	0,860 (27,1)	5 (35,0); 20 (16,4); 80 (13,4)	3,26 (2,21)	0,99 (4,89)

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
$R = 2430$	$1,73 \cdot 10^{11}$; 2,95 (13)	0,451; $5 \cdot 10^{-5}$; 0,016; 2,25	0,850 (15,7)	5 (40,2); 50 (14,1)	3,26 (8,04)	0,94 (21,96)
$R = 3600$	$1,06 \cdot 10^{11}$; 3,85 (13)	0,3457; $4 \cdot 10^{-5}$; 0,016; 1,85	0,850 (14,0)	5 (25,7); 10 (18,0)	3,26 (11,9)	0,99 (30,4)
Спектр нейтронов в замедляющих средах						
ИР-50* [19]:						
ВЭК-1	$4,07 \cdot 10^{13}$; 2,97 (20)	0,535; $2,4 \cdot 10^{-5}$; 0,020; 2,95	0,786 (24,3)	5 (13,6); 20 (6,25)	3,50 (25,3)	0,94 (3,49)
ВЭК-4	$7,97 \cdot 10^{12}$; 2,53 (23)	0,260; $1,2 \cdot 10^{-5}$; $7,8 \cdot 10^{-8}$; 1,9	0,765 (12,2)	5 (3,98); 20 (1,16)	3,70 (64,8)	0,99 (1,37)
КВАНТ**	$3,25 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$; 2,84 (15)	0,409; $2,4 \cdot 10^{-5}$; $2,9 \cdot 10^{-2}$; 2,3	0,788 (16,3)	5 (19,2); 20 (11,2)	3,26 (25,5)	0,96 (2,71)
ИР-100** [31]:						
ВЭК-4	$2,48 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$; 3,04 (17)	0,0304; $1,0 \cdot 10^{-5}$; $5,6 \cdot 10^{-8}$; 0,0128	0,775 (1,51)	5 (0,404)	3,45 (85,9)	0,95 (1,32)
ЦЭК	$7,00 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$; 3,14 (14)	0,523; $2,0 \cdot 10^{-5}$; $2,5 \cdot 10^{-4}$; 3,0	0,795 (26,1)	5 (6,13)	3,45 (32,7)	0,97 (3,16)
БР-К1*** [24, 31]:						
ЦЭК	$2,59 \cdot 10^{14}$; 2,80 (17)	0,141; $1 \cdot 10^{-5}$; $6,0 \cdot 10^{-8}$; 0,8	0,786 (6,34)	5 (4,06)	3,90 (73,6)	1,00 (1,13)
ЦЭК л, γ - конвертор [27]	$1,35 \cdot 10^{14}$; 3,44 (13)	0,451; $2,0 \cdot 10^{-3}$; 0,0255; 2,5	0,778 (18,5)	5 (17,7)	3,32 (18,5)	0,92 (8,28)

*,**,***Зарубежные и отечественные аналоги, моделирующие опорные поля и поля нейтронов в стадии аттестации соответственно.

R — расстояние от центра активной зоны до исследуемой точки поля, мм; БП — боковая поверхность; ЦЭК, ВЭК — центральный, вертикальный экспериментальный канал; МОП — моделирующее опорное поле.

Погрешность определения дифференциального энергетического спектра в приведенных моделирующих опорных полях при доверительной вероятности 0,95 установлена равной для диапазона: тепловых нейтронов — 3—6%; нейтронов энергией <150 кэВ — 15%; 0,15—10 МэВ — 3—10%; 10—18 МэВ — 10—15%.

Указанные погрешности коррелируют с соответствующими погрешностями для стандартных полей. Плотность потока и флюенс нейтронов воспроизводятся с погрешностью 3—6% при доверительной вероятности 0,95 [15].

Из данных табл. 2 можно сделать вывод о том, что созданная система моделирующих опорных полей нейтронов на исследовательских реакторах по техническим характеристикам находится на уровне лучших зарубежных аналогов. Совместно с госспециалом она обеспечивает единство и требуемую практикой точность воспроизведения размера единиц плотности потока и флюенса нейтронов при решении важных научно-технических задач, таких, как исследования и испытания объектов военной техники; испытание изделий электронной и оптической техники на радиационную стойкость; градуировка детекторов нейтронов в системах управления и защиты ядерно-энергетических установок транспортных судов; материаловедческие исследования; анализ следовых количеств примесных элементов в материалах; лечение онкологических заболеваний пучками быстрых нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Р.Д., Ярына В.П., Севастьянов В.Д. Государственный специальный эталон единицы плотности потока нейтронов для области измерений на ядерно-физических установках. — Измерит. техн., 1974, № 7, с. 10—14.

2. Ярына В.П., Шеболев В.Т., Григорьев Е.И., Рамендик З.А. Государственная система метрологического обеспечения нейтронных измерений в СССР. — В кн.: Материалы III Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. 19—23 апреля 1982 г. М., ЦНИИатоминформ, 1983, т. 1, с. 3—12.
3. Севастьянов В.Д., Чуляев С.В. Метрологическое обеспечение нейтронных измерений в России. — Атомная энергия, 1995, т. 78, вып. 1, с. 41—46.
4. Бакулин Ю.П., Григорьев Е.И., Квасов В.А. и др. Создание опорного нейтронного поля ОП-1. — В кн.: Материалы III Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. 19—23 апреля 1982 г. М., ЦНИИатоминформ, 1983, т. 1, с. 98—102.
5. Борисов Г.А., Севастьянов В.Д., Ярына В.П. и др. Создание отраслевой метрологической базы нейтронных измерений. — Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 3—4.
6. Справочное руководство «Интегральные эксперименты в проблеме переноса ионизирующих излучений». Под ред. Л.А. Трыкова. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Севастьянов В.Д., Ярына В.П., Борисов Г.А. и др. Комплекс моделирующих и опорных нейтронных полей на базе реактора БАРС-1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 1984, вып. 3—4, с. 65—68.
8. Борисов Г.А., Севастьянов В.Д., Вершинин В.Г. и др. Прецизионные измерения с делящимися детекторами нейтронов в реакторе БИР-2. — Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях, 3—7 декабря 1990 г. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 131—133.
9. Борисов Г.А., Жуйко С.В., Кадилин В.В. и др. Разработка детекторов для измерений спектра и флюенса нейтронов в низкоинтенсивных полях. — В кн.: Достижения прикладной ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1992, с. 28—31.
10. Григорьев Е.И., Галиев Н.Б., Севастьянов В.Д., Ярына В.П. Стандартные образцы в системе метрологического обеспечения нейтронных измерений на атомных реакторах. — Сб. Тезисы докл. межд. симп. «Стандартные образцы в системе метрологического обеспечения качества материалов, здравоохранения и охраны окружающей среды», 25—28 сентября 1979 г. М., Изд-во Стандартов, 1979, с. 57.
11. Методические указания МИ 1393-86. Характеристики реакторных нейтронных полей. Методика нейтронно-активационных измерений. М., 1986.
12. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М., Севастьянов В.Д. Измерение температуры нейтронов детекторами из меди и лютетия. — Тезисы докл. VII Рос. научной конференции «Защита от ионизирующих излучений ядерно-физических установок», 22—24 сентября 1988. Обнинск, с. 173—175.
13. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М., Севастьянов В.Д. Особенности и результаты определения эффективной температуры тепловых нейтронов для избранных нейтронных полей на ИЯР ВНИИЭФ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1999, вып. 3—4, с. 9—18.
14. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Петров Ю.В. КАСКАД — комплексная вычислительная программа для метода интегральных нейтронных детекторов. — Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях, 3—7 декабря 1990 г. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 194—196.
15. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Стандартное поле нейтронов в центре активной зоны БИР-2. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 55—61.
16. INDC (SEC)-54/L+DOS. IAEA Programme on Benchmark Neutron Fields Applications for Reactor Dosimetry, July 1976.
17. Звонарев А.В., Колыженков В.А., Лифоров В.Г. и др. Экспериментально-расчетные исследования отношения сечений широкого набора нуклидов в реакторе БР-1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1990, вып. 3, с. 67—79.
18. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 131-89. Нейтронно-активационные детекторы для реакторных измерений. Сечения реакций взаимодействия нейтронов с ядрами. М., 1989.
19. Буторин С.В., Галиев Н.Б., Григорьев Е.И. и др. Нейтронные поля для высокоточных исследований на реакторе ИР-50. — Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях, 3—7 декабря 1990 г. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 167—170.
20. Dosimetry File. Japan Atomic Energy Research Institute, 1992, p. 24—25.
21. Neutron cross sections for reactor dosimetry, v. 1. Vienna: IAEA, 1978, p. 101.
22. Mc Elroy W., Armani R., Tochilin E. The spectral distribution of neutron reaction cross sections in an inreflected uranium-235 critical assembly and the fission neutron spectrum. — Nucl. Sci. Engng., 1972, v. 48, p. 51—71.
23. Горновой Г.А., Горин Н.В., Кошмяков В.П. и др. Опыт эксплуатации быстрых импульсных ядерных реакторов БАРС-1, 2, 3 во ВНИИЭФ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов, 1994, вып. 2, с. 3—12. Павловский А.И., Малинкин А.А., Колесов В.Ф. и др. Бустер-реактор БР-1. — Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1985, вып. 1, с. 3—13.
24. Kelly J., Griffin P., Fan W. Benchmarking the sandia pulsed reactor III Cavity neutron spectrum for electronic parts calibration and testing. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, v. 40, № 6, p. 1418—1425.
25. Кувшинов М.И., Колесов В.Ф., Воинов А.М., Смирнов И.Г. Аперiodический импульсный реактор БИГР. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1988, вып. 1, с. 3—12.

26. Борисов Г.А., Богуславский А.М. Модельное нейтронное поле на реакторе ИР-100. — В кн.: Научные труды НПО ВНИИФТРИ. Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений. М. 1987, с. 10—14.
27. Борисов Г.А., Севастьянов В.Д., Ярына В.П. и др. Создание отраслевой метрологической базы нейтронных измерений. — Тезисы докл. V Всес. сов. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях, 3—7 декабря 1990 г. М., НПО ВНИИФТРИ, 1990, с. 3—4.
28. Барабанов С.А., Борисов Г.А., Григорьев Е.И. и др. Нейтронные поля для исследований на реакторе ИР-100. — Атомная энергия, 1983, т. 54, вып. 2, с. 124—125.
29. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М., Севастьянов В.Д. Источник тепловых нейтронов для калибровки детекторов «нулевой» толщины. — Приборы и техн. экспер., 1999, № 3, с. 19—26.
30. Neutron cross sections for reactor dosimetry, v. 1. Vienna: IAEA, 1978, p. 3—21.
31. Кошелев А.С., Маслов Г.Н., Одинцов Ю.М. Избранные пространственно-энергетические характеристики стационарного поля нейтронов снаружи активной зоны импульсного реактора БР-1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 1, с. 38—48.
32. Севастьянов В.Д., Тарновский Г.Б., Езерский В.Ф. и др. Результаты аттестации пучка нейтронов Б-3 реактора БР-10. Докл. на сов. «Применение нейтронов ядерных реакторов в лучевой терапии. Состояние и перспективы». 17—19 октября 1995, Обнинск.

Поступила в Редакцию 22.12.99

УДК 539.125.5.164; 539.173.84

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ НЕЙТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СУЗ ТРАНСПОРТНЫХ ЯЭУ

Севастьянов В.Д., Ярына В.П. (ВНИИФТРИ), Волков А.Е., Павлов В.Д.
(Институт ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Для нормального функционирования систем управления и защиты транспортных ядерно-энергетических установок необходимо, чтобы детекторы этой системы были проградуированы по чувствительности в моделирующем поле нейтронов с характеристиками, идентичными (или близкими) параметрам спектра нейтронов в месте их размещения на установках. Это особенно важно для детекторов с материалом радиатора, сечение взаимодействия с нейтронами которого отлично от $1/\nu$.

Градуировка детекторов нейтронов СУЗ по чувствительности к нейтронам является обязательной процедурой при испытаниях и выпуске. Чувствительность детектора нейтронов с материалом радиатора, сечение поглощения нейтронов которого слабо отличается от закона $1/\nu$, определяется по соотношению $\epsilon = I_n/\varphi_d$, где I_n — нейтронная составляющая сигнала (отклик) детектора; φ_d — среднее значение условной плотности потока нейтронов на поверхности градуируемого детектора при облучении в поле нейтронов.

Для метрологического обеспечения нейтронных измерений при испытаниях и градуировке по чувствительности детекторов СУЗ ЯЭУ в Институте ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский институт» создан и аттестован измерительный комплекс на базе стенда «Квант», состоящий из эталонного источника нейтронов ОИ-Т-34 и эталонной радиометрической установки КРОНАП-13. Активная зона стенда высотой 500 мм состоит из 175 ТВС, окруженных боковым экраном, и имеет компенсирующую группу в виде 94 поглощающих стержней. По ее периферии располагаются измерительные каналы, представляющие собой стальные трубы для размещения в них детекторов СУЗ, а также экспериментальный канал ИК-6 диаметром 85 мм, толщиной стенки трубы 3 мм (рис. 1).

Эталонный источник ОИ-Т-34 использовали для калибровки по чувствительности специального радиометра

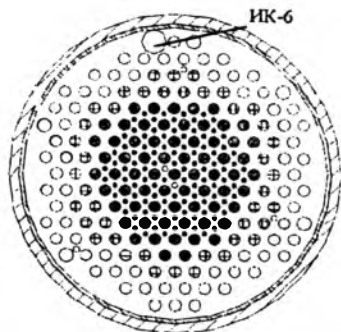


Рис. 1. Расположение ИК-6 в активной зоне стенда «Квант»