

УДК 621.039.51.12:621.039.514

# Особенности формирования поля нейтронов в рабочем зале реактора с компактной активной зоной БР-1 (БР-1М)

**А. С. Кошелев, В. Х. Хоружий**

*Представлены результаты развернутого расчетного изучения особенностей формирования поля нейтронов в рабочем зале реактора БР-1 (БР-1М) в целом и двух базовых структурных составляющих поля – нейтронов утечки из активной зоны реактора (нейтроны источника) и нейтронов фона, образовавшихся в результате взаимодействия нейтронов утечки с эффективно замедляющей средой защитных стен реакторного зала и массивными элементами рассеивания в конструкции реакторного стенда.*

*Детализированы особенности функциональных зависимостей флюенса и средней энергии флюенса нейтронов источника и нейтронов фона от позиционной координаты поля в реакторном зале.*

*Результаты расчета для поля нейтронов в целом сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.*

## Введение

При очевидном предпочтении использования нейтронных полей радиационного нагружения реакторных установок ВНИИЭФ, формируемых во внутризонных и околозонных пространствах, имеет место и безусловный интерес к нейтронным полям, формируемым в значительных пространственных объемах залов с массивными бетонными стенами и размещаемыми в них реакторами с открытой компактной активной зоной [1].

Преимущественно экспериментальная форма изучения характеристик нейтронных полей в реакторных залах, наиболее детализированная при изучении поля нейтронов в рабочем зале реактора БР-1 [2, 3], не получила, на наш взгляд, соответствующего эксперименту расчетного отображения. Очевидная целесообразность углубленного расчетного рассмотрения, опирающегося на развитые методы расчета [4], столкнулась с неоднозначностью выбора расчетной модели, связанной с вводом в эксплуатацию в 2009 г. модификации активной зоны реактора. С одной стороны, все основные экспериментальные исследования в неизменном рабочем зале реактора осуществлены в варианте БР-1 [5]. С другой стороны, в практическом аспекте более перспективен расчет для модификационного варианта реактора БР-1М [6].

Принимая во внимание достаточную незначительность различий активных зон реактора в вариантах БР-1 и БР-1М как по массе и составу делящегося материала (176,1 кг сплава урана 90 %-го обогащения по  $^{235}\text{U}$  с молибденом (массовая доля – 9 %) в варианте БР-1 и 172,9 кг сплава урана 90 %-го обогащения по  $^{235}\text{U}$  с молибденом (массовая доля – 10 %) в варианте БР-1М), так и по конструктивной компоновке (практически изменено только на ~1 см расстояние между верхним и нижним блоками в критической конфигурации). Более целесообразным с практической точки зрения был выбран вариант развернутого расчетного исследования с использованием расчетной модели активной зоны БР-1М.

## Расчетно-экспериментальный формализм

Методика С-007 использовалась как основной расчетный инструмент решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов [4]. В качестве самостоятельных элементов расчетной структуры были выделены:

– активная зона (АЗ) реактора БР-1М как излучатель (источник) нейтронов деления; обобщенная конструктивная компоновка представлена на рис. 1;

– массивный элемент (стальная плита) биологической защиты персонала от  $\gamma$ -излучения АЗ при оперативном обслуживании механизмов перемещения органов регулирования реактивности как потенциально эффективный рассеиватель нейтронов излучателя; взаиморасположение АЗ и защитной плиты представлено на рис. 1;

– биологическая защита реакторного зала (с внутренними размерами помещения: по длине – 14,0 м, по ширине – 10,4 м, по высоте – 8,0 м) с «физически бесконечной» толщиной стен 1 м как основной формирователь поля рассеянных (фоновых) нейтронов.

Моделирующий состав материалов, комплекующих АЗ, принимался следующим (в единицах атомной концентрации « $10^{24}$  см $^{-3}$ »):  $^{235}\text{U} - 3,518 \cdot 10^{-2}$ ;  $^{238}\text{U} - 3,319 \cdot 10^{-3}$ ;  $^{234}\text{U} - 3,729 \cdot 10^{-4}$ ;  $^{236}\text{U} - 1,791 \cdot 10^{-4}$ ;  $\text{Mo} - 1,065 \cdot 10^{-2}$ ;  $\text{C} - 1,267 \cdot 10^{-4}$ ;  $\text{Si} - 6,510 \cdot 10^{-5}$ ;  $\text{Fe} - 3,274 \cdot 10^{-5}$ . Моделирующий состав стальной плиты (в единицах атомной концентрации « $10^{24}$  см $^{-3}$ » принимался таким:  $\text{Fe} - 6,036 \cdot 10^{-2}$ ;  $\text{Ni} - 5,986 \cdot 10^{-3}$ ;  $\text{Cr} - 1,647 \cdot 10^{-2}$ ;  $\text{Ti} - 9,938 \cdot 10^{-4}$ ;  $\text{C} - 4,753 \cdot 10^{-4}$ . Моделирующий состав материалов (в единицах атомной концентрации « $10^{24}$  см $^{-3}$ ») бетонной оболочки рабочего зала принимался таким:  $\text{O} - 3,938 \cdot 10^{-2}$ ;  $\text{Si} - 1,806 \cdot 10^{-2}$ ;  $\text{H} - 7,469 \cdot 10^{-3}$ ;  $\text{Ca} - 2,988 \cdot 10^{-3}$ ;  $\text{Fe} - 7,500 \cdot 10^{-3}$ . Выбранный состав рассматривается в настоящее время как «средневзвешенный» по результатам разнообразных экспериментально-расчетных исследований характеристик реактора БР-1 в данном рабочем зале. Моделирующий состав воздушной среды реакторного зала принимался следующим (в единицах атомной концентрации « $10^{24}$  см $^{-3}$ »):  $\text{N} - 3,890 \cdot 10^{-5}$ ;  $\text{O} - 1,048 \cdot 10^{-5}$ ;  $\text{Ar} - 2,533 \cdot 10^{-7}$ .

В качестве непосредственно рассчитываемых были выбраны параметры:

– флюенс всех нейтронов в избранной позиционной координате реакторного зала в энергетических интервалах от 0 до 0,5 эВ  $F_{th}$ ; от 0,5 эВ до 0,1 МэВ  $F_{epi}$  и от 0,1 до 20 МэВ  $F_{0,1}$ ; численное значение флюенса определялось внутри сферического элемента пространства радиусом 1 см в нормировке на одно деление в АЗ в единицах «нейтр./см $^2$ .дел. АЗ»;

– флюенс нейтронов источника (нейтронов прямого прохождения без рассеяния) в избранной позиционной координате реакторного зала  $\vec{F}$ ; осуществлены два варианта расчета с учетом воздушной среды реакторного зала и в случае ее отсутствия (вакуумный вариант);

– флюенс только рассеянных (фоновых) нейтронов в избранной позиционной координате реакторного зала  $\vec{F}$ ; осуществлен вариант учета рассеянных нейтронов только от защитной плиты (как с учетом воздушной среды зала, так и без нее);

– спектры единичного флюенса всех нейтронов  $F = F_{th} + F_{epi} + F_{0,1}$ , нейтронов источника  $\vec{F}$  и нейтронов фона  $\vec{F}$  в 31-групповом энергетическом формате, их средние энергии  $\bar{E}$ ;

– интегральные отклики реакций  $^{115}\text{In}(n, n')$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$ ,  $^{237}\text{Np}(n, f)$ ,  $^{58}\text{Ni}(n, p)$  для флюенса всех нейтронов  $F$  в избранных координатах реакторного зала; численное значение от-

клика определялось внутри сферического элемента пространства объемом  $1 \text{ см}^3$ , заполненного четырьмя сферическими оболочками из соответствующих материалов с плотностью каждого  $1,6 \cdot 10^{-16} \text{ г/см}^3$ .

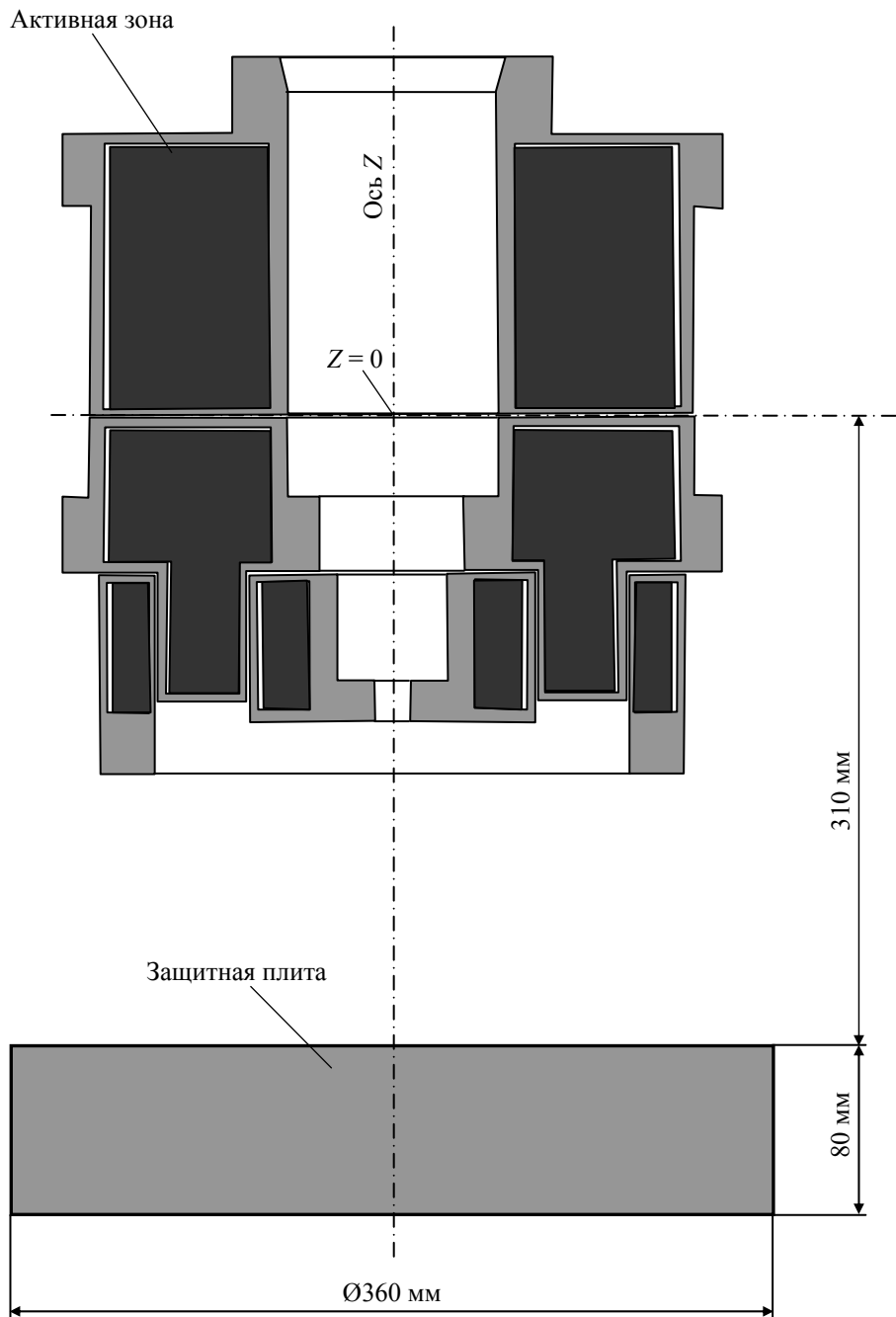


Рис. 1. Используемая в расчете схема активной зоны реактора БР-1М и массивного стального элемента  $\gamma$ -защиты на реакторном стенде

Для всех избранных позиционных координат, рассмотренных в расчете, центр сферического элемента пространства располагался на высоте центра АЗ, равной 2,2 м от пола реакторного зала.

Схема расположения избранных расчетных позиций в пространстве реакторного зала представлена на рис. 2. Группа позиционных координат от  $R1$  до  $R6$  сформирована для сравнения результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными. Группа позиционных координат от  $X1$  до  $X9$  сформирована с учетом результатов расчета для первой группы и работы [7] с целью более детального рассмотрения выявленных особенностей формирования базовых компонент (источник и фон) поля нейтронов в реакторном зале БР-1 (БР-1М).

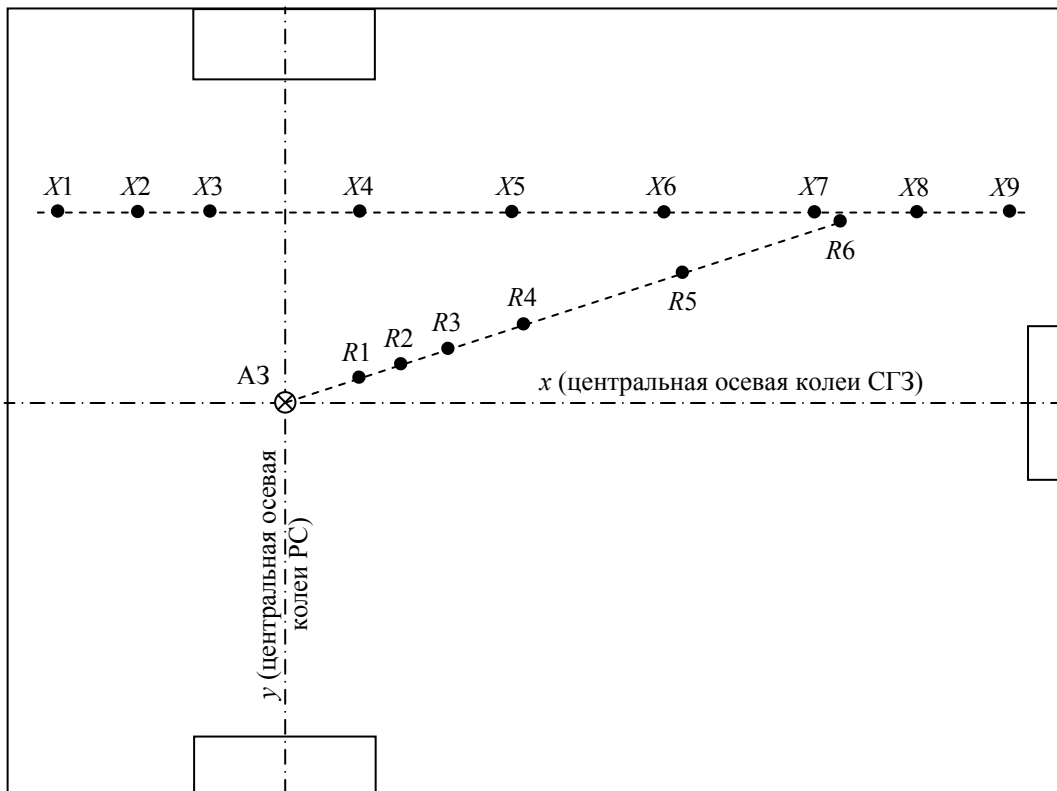


Рис. 2. Схема расположения расчетных позиций  $R$  и  $X$  в реакторном зале

Позиционные координаты  $R$  расположены на радиальной осевой, проходящей через центр АЗ, и выбраны, следуя [2, 3], таким образом:  $R1 = 1,013$  м,  $R2 = 1,565$  м,  $R3 = 2,215$  м,  $R4 = 3,300$  м,  $R5 = 5,500$  м,  $R6 = 7,700$  м. Позиционные координаты  $X$  расположены на осевой, ориентированной параллельно центральной осевой рельсовой колеи перемещения стэнда горизонтальной загрузки (СГЗ) реактора, на расстоянии (в плане) 2,5 м от указанной оси. Выбраны равными  $X1 = -3$  м,  $X2 = -2$  м,  $X3 = -1$  м,  $X4 = 1$  м,  $X5 = 3$  м,  $X6 = 5$  м,  $X7 = 7$  м,  $X8 = 8,3$  м,  $X9 = 9,6$  м.

Центр АЗ (координата  $Z = 0$  на рис. 1) в координатном пространстве реакторного зала размещен на высоте 2,2 м от пола, на расстоянии 3,7 м от ближней торцевой стены зала (над центральной осевой рельсовой колеи перемещения реакторного стэнда, РС) и симметрично боковым стенам на расстоянии по 5,2 м от каждой.

Все использованные для доступного сопоставления с расчетом экспериментальные данные взяты из [3]. Для удобства сравнения расчетных и экспериментальных спектров флюенса  $F$  для проведения спектральных расчетов был сформирован 31-групповой энергетический формат с вы-

бором граничных групповых энергий, согласующихся с соответствующими энергетическими границами в 176-групповом энергетическом формате КАСКАД, использованном для представления спектральных решений в [3]. Использованный для расчета энергетический формат конкретизирует данные, представленные в табл. 1.

Таблица 1

*Энергетический формат, использованный в расчетах по методике С-003*

$i$	$E_i, \text{МэВ}$	$E_i + dE_i, \text{МэВ}$	$i$	$E_i, \text{МэВ}$	$E_i + dE_i, \text{МэВ}$	$i$	$E_i, \text{МэВ}$	$E_i + dE_i, \text{МэВ}$
1	0,00	5,00–07	12	2,20–01	2,55–01	23	1,20	1,50
2	5,00–07	5,00–06	13	2,55–01	3,00–01	24	1,50	1,80
3	5,00–06	5,00–05	14	3,00–01	3,60–01	25	1,80	2,20
4	5,00–05	5,00–04	15	3,60–01	4,25–01	26	2,20	2,80
5	5,00–04	5,00–03	16	4,25–01	5,00–01	27	2,80	3,80
6	5,00–03	5,00–02	17	5,00–01	5,75–01	28	3,80	4,60
7	5,00–02	1,00–01	18	5,75–01	6,60–01	29	4,60	6,20
8	1,00–01	1,35–01	19	6,60–01	7,60–01	30	6,20	9,20
9	1,35–01	1,60–01	20	7,60–01	8,80–01	31	9,20	18,0
10	1,60–01	1,90–01	21	8,80–01	1,00	–	–	–
11	1,90–01	2,20–01	22	1,00	1,20	–	–	–

Для интерпретации спектральной вариативности нейтронов источника для избранных измерительных позиций использовался вариант поиска спектрального решения КАСКАД с ограниченным (до двух) количеством модельных спектров (из числа рекомендованных в [3]).

### **Нейтроны поля**

Можно выделить три практически значимых области использования нейтронного поля реакторного зала в целом: проведение испытаний и интерпретация получаемых результатов в интересах обеспечения надежной работы комплектующих и изделий радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в специальных условиях их применения [7]; проведение исследований дозиметрической направленности и апробация действующих и разрабатываемых аварийных дозиметров [8]; изучение регистрационных возможностей разнообразных промышленно изготавливаемых ионизационных камер для реакторной техники [9].

В качестве обобщенного критериального параметра практической достаточности определения уровня радиационного воздействия принято требование обеспечения погрешности не более 20 %. Данное критериальное условие используется нами как основное при анализе всех представленных ниже расчетно-экспериментальных характеристик поля нейтронов в рабочем зале реактора БР-1 (БР-1М).

Экспериментально-расчетные данные для полного флюенса, флюенса ниже 0,5 эВ (тепловые нейтроны), флюенса выше 0,1 МэВ (быстрые нейтроны) представлены в табл. 2. Для полного флюенса нейтронов там же представлены средние энергии, определенные в 176-энергетическом формате КАСКАД для экспериментальных данных и в 31-энергетическом формате для расчетных данных. Ограничение выборки данных шестью позиционными координатами с маркировкой  $R$  определяется соответствующим ограничением в наличии экспериментальных данных.

Таблица 2

Сравнение избранных интегральных параметров расчетных и экспериментальных спектральных версий

Параметр	Значение параметра в позиционных координатах $R$ , м					
	1,013	1,565	2,215	3,300	5,500	7,700
Полный флюенс:						
$F_3$ , нейтр/см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	1,897–5	9,242–6	5,543–6	3,391–6	2,087–6	1,649–6
$F_p$ , нейтр/см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	1,529–5	7,490–6	4,713–6	3,104–6	2,039–6	1,621–6
Отличие $F_p$ от $F_3$ , %	–19,4	–18,9	–15,0	–8,48	–2,29	–1,70
Флюенс ниже 0,5 эВ:						
$F_3$ , нейтр/см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	3,461–7	3,535–7	3,532–7	3,832–7	3,832–7	3,713–7
$F_p$ , нейтр/см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	4,078–7	4,037–7	3,970–7	3,774–7	3,455–7	3,228–7
Отличие $F_p$ от $F_3$ , %	+17,8	+14,2	+12,4	–1,51	–9,83	–13,0
Флюенс выше 0,1 МэВ:						
$F_3$ , нейтр/см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	1,594–5	6,947–6	3,552–6	1,790–6	8,160–7	5,181–7
$F_p$ , нейтр/см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	1,334–5	5,863–6	3,230–6	1,764–6	8,964–7	6,001–7
Отличие $F_p$ от $F_3$ , %	–16,3	–15,6	–9,08	–1,43	+9,85	+15,8
Средняя энергия:						
$\bar{E}_3$ , МэВ	1,071	0,954	0,824	0,651	0,441	0,335
$\bar{E}_p$ , МэВ	1,169	1,014	0,846	0,646	0,441	0,341
Отличие $E_p$ от $E_3$ , %	+9,15	+6,29	+2,67	–0,77	0,00	+1,79

Из табл. 2 следует, что для всех рассмотренных характеристик поля нейтронов имеет место согласование результатов расчета и эксперимента в пределах критериального условия 20 %.

Уровни согласованности экспериментальных и расчетных данных в каждой группе 31-энергетического формата иллюстрируют отличия (в %) результатов расчета от результатов эксперимента, представленные в табл. 3. Полученные результаты могут быть оценены как умеренно удовлетворительные, так как не менее одной трети установленных различий (~ 35 %) превышают 20 %.

В табл. 4 сведены экспериментальные и расчетные данные для интегральных откликов пороговых реакций  $^{237}\text{Np}(n, f)$  (рекомендуемый эффективный порог 0,55 МэВ [7]),  $^{115}\text{In}(n, n')$  (рекомендуемый эффективный порог 1,2 МэВ [7]),  $^{238}\text{U}(n, f)$  (рекомендуемый эффективный порог 1,5 МэВ [7]),  $^{58}\text{Ni}(n, p)$  (рекомендуемый эффективный порог 2,5 МэВ [7]).

Из табл. 4 следует, что для реакций  $^{237}\text{Np}(n, f)$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$ ,  $^{58}\text{Ni}(n, p)$  во всех рассмотренных позиционных координатах  $R$  результаты расчета и эксперимента не различаются более чем на 20 %. Для реакции  $^{115}\text{In}(n, n')$  для пяти из шести позиционных координат  $R$  имеет место значимое (до ~28 %) превышение уровня 20 %.

Таблица 3

Отличие расчетных  $F_{pi}$  и экспериментальных  $F_{эi}$  групповых флюенсов

$i$	Отличие $F_{pi}$ от $F_{эi}$ (%) для спектра флюенса в позиционных координатах $R$ , м					
	1,013	1,565	2,215	3,300	5,500	7,700
1	+46,2	+40,9	+32,2	+7,61	-7,72	-11,6
2	+16,1	+164,	+163,	+113,	+68,9	+56,6
3	-9,63	+63,8	+63,2	+47,6	+29,2	+24,7
4	-28,6	+2,39	+1,08	+1,77	-0,97	-1,42
5	-41,0	-33,4	-34,9	-27,3	-22,5	-21,2
6	-38,3	-46,8	-49,0	-39,8	-30,7	-28,0
7	-26,1	-34,0	-33,7	-27,6	-16,3	-12,4
8	-12,6	-14,8	-8,02	-3,27	+11,2	+17,8
9	-25,1	-19,6	-3,77	+6,53	+28,3	+40,3
10	-12,6	-7,49	+9,54	+16,8	+35,7	+48,2
11	-24,2	-18,2	-2,49	+3,40	+17,7	+29,3
12	-20,1	-12,3	+7,04	+15,1	+29,0	+43,5
13	-10,8	-1,65	+18,7	+27,4	+37,5	+51,4
14	+0,69	+9,42	+28,8	+36,5	+40,2	+51,2
15	-11,0	-7,62	+1,96	+3,12	-1,26	+4,05
16	-6,86	-2,76	+6,31	+9,98	+4,55	+9,74
17	+2,76	+7,84	+17,2	+24,5	+23,2	+28,7
18	+19,5	+23,7	+30,2	+37,2	+35,3	+37,1
19	+19,2	+23,6	+28,8	+36,6	+37,5	+36,0
20	+16,4	+21,2	+25,0	+31,8	+33,5	+26,3
21	+21,2	+18,5	+12,8	+8,69	+2,85	-8,96
22	+22,4	+16,2	+7,74	+1,57	+0,15	-11,0
23	+19,1	+12,5	+3,66	-1,81	+2,53	-5,30
24	+13,6	+5,18	-4,21	-11,7	-8,27	-10,6
25	+8,57	+0,55	-8,84	-16,8	-15,1	-10,0
26	+7,63	+2,92	-3,46	-7,74	-2,73	+21,0
26	+2,03	-2,02	-7,48	-13,2	-16,0	+14,2
28	+2,10	-0,49	-4,54	-9,60	-16,3	+14,0
29	+5,05	+3,82	+0,86	-3,41	-11,8	-0,06
30	+7,48	+8,28	+6,55	+2,04	-6,96	-45,2
31	+4,12	+1,28	-1,28	-8,97	-3,67	-86,9

Таблица 4

Результаты расчета избранных интегральных откликов и их сравнения с экспериментальными данными

Параметр	Значение параметра в позиционных координатах $R$ , м					
	1,013	1,565	2,215	3,300	5,500	7,700
Реакция $^{237}\text{Np}(n, f)$						
Интегральный отклик, реакц./ядро-дел. АЗ:						
эксперимент	1,563-29	6,801-30	3,559-30	1,742-30	7,509-31	4,613-31
расчет	1,320-29	5,659-30	3,004-30	1,544-30	7,143-31	4,492-31
Отличие расчета от эксперимента, %	-15,5	16,8	-15,6	-11,4	-4,88	-2,63

Окончание табл. 4

Параметр	Значение параметра в позиционных координатах $R$ , м					
	1,013	1,565	2,215	3,300	5,500	7,700
Реакция $^{238}\text{U}(n, f)$						
Интегральный отклик, реакц./ядро·дел. АЗ:						
эксперимент	2,646–30	1,179–30	6,182–31	2,947–31	1,140–31	6,309–32
расчет	2,274–30	9,556–31	4,922–31	2,397–31	1,013–31	5,958–32
Отличие расчета от эксперимента, %	-14,1	-18,9	-20,4	-18,7	-11,1	-5,57
Реакция $^{115}\text{In}(n, n')$						
Интегральный отклик, реакц./ядро·дел. АЗ:						
эксперимент	1,846–30	8,011–31	4,206–31	2,063–31	8,371–32	4,594–32
расчет	1,393–30	5,879–31	3,046–31	1,493–31	6,432–32	3,828–32
Отличие расчета от эксперимента, %	-24,6	-26,6	-27,6	-27,4	-23,2	-16,7
Реакция $^{58}\text{Ni}(n, p)$						
Интегральный отклик, реакц./ядро·дел. АЗ:						
эксперимент	8,568–31	3,624–31	1,832–31	8,461–32	3,329–32	1,754–32
расчет	7,115–31	2,962–31	1,502–31	7,093–32	2,847–32	1,607–32
Отличие расчета от эксперимента, %	-17,0	-18,3	-18,0	-16,2	-14,5	-8,39

### Нейтроны источника

Для отображения особенностей формирования поля нейтронов источника (нейтронов утечки, нейтронов прямого прохождения) были выбраны следующие характеристики: флюенс нейтронов как функция радиального расстояния от центра АЗ в воздушном пространстве реакторного зала; такой же флюенс нейтронов, но в вакуумированной среде и без стен зала; средние энергии спектров флюенса в воздухе и в вакууме. Флюенсы нейтронов в воздухе и средние энергии спектров в воздухе рассчитывались для шести позиционных координат  $R$  и девяти позиционных координат  $X$  (с перерасчетом к соответствующим значениям  $R$  согласно рис. 2). Флюенсы нейтронов и средние энергии спектров в вакууме рассчитывались только для шести позиционных координат  $R$ . Соответствующие расчетные данные представлены в табл. 5 в графах «Вакуум» и «Воздух» для флюенса и средней энергии, соответственно.

В графе «Воздух/вакуум» представлены отношения флюенса в воздухе к флюенсу в вакууме. Незначительное, но выраженное превышение флюенса нейтронов источника в воздухе над флюенсом нейтронов источника в вакууме однозначно связано с особенностью модели расчета, в которой рассеяние нейтронов источника в воздушной среде акцентированно не включено в фоновую составляющую (что было сделано, например, для нейтронов источника, рассеивающихся на защитной плите).



Избранные характеристики флюенса нейтронов источника

Позиция		Флюенс, нейтр./см <sup>2</sup> -дел. АЗ					$\bar{E}$ , МэВ	
X, м	R, м	Вакуум	Воздух	Воздух вакуум	Аргох (воздух)	Отличие, %	Вакуум	Воздух
–	1,013	1,174–5	1,189–5	1,013	1,194–5	+0,39	1,394	1,386
–	1,565	4,803–6	4,885–6	1,017	4,927–6	+0,86	1,395	1,383
–	2,215	2,369–6	2,420–6	1,022	2,430–6	+0,43	1,396	1,378
–1,0	2,693	–	1,631–6	–	1,634–6	+0,17	–	1,377
+1,0	2,693	–	1,633–6	–	1,634–6	+0,05	–	1,377
–2,0	3,202	–	1,151–6	–	1,149–6	–0,20	–	1,376
	3,300	1,056–6	1,085–6	1,027	1,080–6	–0,45	1,396	1,373
–3,0	3,905	–	7,683–7	–	7,669–7	–0,19	–	1,376
+3,0	3,905	–	7,735–7	–	7,669–7	–0,86	–	1,371
–	5,500	3,770–7	3,876–7	1,028	3,821–7	–1,42	1,395	1,366
+5,0	5,590	–	3,752–7	–	3,697–7	–1,48	–	1,367
+7,0	7,433	–	2,100–7	–	2,070–7	+0,56	–	1,368
–	7,700	1,916–7	1,953–7	1,019	1,927–7	–1,33	1,394	1,366
8,3	8,668	–	1,526–7	–	1,514–7	+1,23	–	1,371
9,6	9,920	–	1,148–7	–	1,151–7	+2,31	–	1,379

В графе «Аргох (воздух)» представлены результаты аппроксимации значений флюенса нейтронов в воздухе по соотношению  $1,2254 \cdot 10^{-5} R^{-2,0343}$ , а в графе «Отличие» – выраженные в процентах отношения разности аппроксимационных и экспериментальных значений к соответствующим экспериментальным значениям. Путем сравнения функционалов  $A_1 R^{-2,0343}$  и  $A_2 R^{-2}$  (спад по закону  $1/R^2$ ) при  $A_1 = A_2$  на  $R = 10$  м определяем, что коэффициент функциональной связи реального спада флюенса нейтронов источника и предполагаемого по закону  $1/R^2$  выражается соотношением  $K(R) = 1,082 R^{-0,0343}$ . Иначе говоря, имеет место факт значимого различия спада нейтронов источника от закона  $1/R^2$ , достигающего 8 % при  $R = 1$  м.

Для средних энергий флюенса нейтронов источника в вакууме получены фактически совпадающие значения вокруг среднего 1,395 МэВ. Средние энергии флюенса нейтронов источника в воздухе все несколько меньше таковых для флюенса в вакууме и менее компактно сгруппированы вокруг среднего значения 1,376 МэВ. В рамках настоящего расчета все полученные данные для средних энергий спектров флюенса нейтронов источника можно рассматривать как практически равнозначные.

С ориентацией на  $\bar{E} = 1,395$  МэВ и минимизированное по числу модельных спектров решение для спектра в центре АЗ БР-1, представленное в [3] в виде  $F(E) = b_1 MC1 + b_2 MC2$  ( $MC1 = 2\sqrt{\alpha_1^3 E/\pi} \cdot e^{-\alpha_1 E}$  с  $\alpha_1 = 802$  МэВ<sup>-1</sup>,  $MC2 = \alpha_2^2 E e^{-\alpha_2 E}$  с  $\alpha_2 = 5$  МэВ<sup>-1</sup>,  $b_1 + b_2 = 0,5419 + 0,4581 = 1,0000$ ), было сформировано модельное решение для спектра нейтронов источника в виде  $F(E) = b_1 MC1 + b_2 MC2$  с  $\alpha_1 = 802$  МэВ<sup>-1</sup> и  $\alpha_2 = 5$  МэВ<sup>-1</sup>, для которого при  $b_1 = 0,677$  и  $b_2 = 0,323$  имеет место  $\bar{E} = 1,395$  МэВ.

Результаты расчета интегральных откликов реакций  $^{237}\text{Np}(n, f)$ ,  $^{115}\text{In}(n, n')$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$ ,  $^{58}\text{Ni}(n, p)$  в форме сечений соответствующих нейтронных взаимодействий на спектрах нейтронов в позиционных координатах  $R$  для вакуумированного пространства без стен зала и в воздушном пространстве реакторного зала представлены в табл. 6. Численные значения  $\sigma$  получены путем деления расчетного интегрального отклика на расчетный флюенс нейтронов источника в соответствующей позиционной координате  $R$  (рис. 2).

Таблица 6

Сечения избранных реакций на спектре нейтронов источника

Реакция	$\sigma$ (см <sup>2</sup> ) для позиционных координат $R$						$\bar{\sigma}$ , см <sup>2</sup> ( $\pm\delta\bar{\sigma}$ , %)
	1,013 м	1,565 м	2,215 м	3,300 м	5,500 м	7,700 м	
Вакуумированное пространство без стен зала							
$^{237}\text{Np}(n, f)$	1,007–24	1,007–24	1,007–24	1,007–24	1,007–24	1,007–24	1,007–24(0,000)
$^{237}\text{In}(n, n')$	1,105–25	1,106–25	1,106–25	1,106–25	1,106–25	1,105–25	1,106–25(0,038)
$^{238}\text{U}(n, f)$	1,822–25	1,823–25	1,823–25	1,822–25	1,822–25	1,821–25	1,822–25(0,034)
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	5,843–26	5,851–26	5,848–26	5,847–26	5,843–26	5,841–26	5,846–26(0,053)
Воздушное пространство внутри реакторного зала							
$^{237}\text{Np}(n, f)$	1,002–24	1,001–24	9,983–25	9,956–25	9,940–25	9,930–25	9,973–24(0,30)
$^{237}\text{In}(n, n')$	1,098–25	1,095–25	1,091–25	1,086–25	1,080–25	1,080–25	1,088–25(0,57)
$^{238}\text{U}(n, f)$	1,808–25	1,804–25	1,795–25	1,785–25	1,776–25	1,778–25	1,791–25(0,61)
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	5,791–26	5,775–26	5,735–26	5,690–26	5,666–26	5,687–26	5,724–26(0,73)

Из табл. 6 следует, что, несмотря на более чем 60-кратный перепад численных значений интегральных откликов и флюенсов нейтронов при переходе от  $R = 1,013$  м к  $R = 7,7$  м, имеет место практически пренебрежимый разброс частных значений  $\sigma$  от среднего для обеих выборок (вакуум и воздух). Выраженное влияние воздушной среды зала присутствует, но не превышает уровня 2 %.

С использованием версий сечений КАСКАД [2] для реакций  $^{237}\text{Np}(n, f)$  (*N37F01.sec*, код 31),  $^{115}\text{In}(n, n')$  (*I15N01.sec*, код 28; *I15N.sec*, код 8),  $^{238}\text{U}(n, f)$  (*U38F01.sec*, код 32),  $^{58}\text{Ni}(n, p)$  (*N58P01.sec*, код 26) и приведенного выше модельного решения для спектра нейтронов источника были определены следующие значения сечений перечисленных реакций:  $\sigma(^{237}\text{Np}) = 1,009 \cdot 10^{-24}$  см<sup>2</sup> (отличие от расчетного в вакууме 0,20 %),  $\sigma(^{115}\text{In01}) = 1,242 \cdot 10^{-25}$  см<sup>2</sup> (отличие от расчетного в вакууме 11 %),  $\sigma(^{115}\text{In02}) = 1,353 \cdot 10^{-25}$  см<sup>2</sup> (отличие от расчетного в вакууме 18 %),  $\sigma(^{238}\text{U}) = 1,944 \cdot 10^{-25}$  см<sup>2</sup> (отличие от расчетного в вакууме 6,3 %),  $\sigma(^{58}\text{Ni}) = 6,307 \cdot 10^{-26}$  см<sup>2</sup> (отличие от расчетного в вакууме 7,3 %).

## Нейтроны фона

Конкретизация двух формирователей фона реакторного зала – защитных бетонных стен зала (основной) и массивной стальной плиты в конструкции стенда реактора – предопределила двухвариантную форму расчетной процедуры определения характеристик нейтронов фона. В дополнение к основному варианту расчета, включающего в себя обобщенный фоновый эффект (и за счет стен, и за счет плиты), был осуществлен расчет, ориентированный на учет фоновой составляющей, обусловленной только стальной плитой. Данный вариант расчета был использован только в шести позиционных координатах  $R$  и только в вакуумированном пространстве в отсутствие стен зала.

Значимые в практическом аспекте результаты расчета фоновой компоненты, формируемой массивной защитной плитой (рис. 1), представлены в табл. 7. Акцентируем внимание на следующем:

- в ближнем околосонном пространстве фоновая компонента, формируемая защитной плитой, не может рассматриваться пренебрежимо малой при проведении экспериментов, направленных на выделение нейтронов источника из суммарного поля нейтронов;

- имеется возможность аппроксимационного представления флюенса нейтронов защитной плиты  $F_{зп}$  в виде  $^{approx}F_{зп} = 1,1039R^{-2,4811}$  с практически мало значимым отличием соответствующих расчетных и аппроксимационных величин;

- спектр нейтронов защитной плиты, в первом приближении, в пространстве зала изменяется незначительно, содержит преимущественно быстрые нейтроны и может быть охарактеризован средней энергией 0,756 МэВ.

Таблица 7

Флюенс и спектр флюенса нейтронов, обусловленные защитной плитой

Параметр	Значение параметра в позиционной координате $R$ , м					
	1,013	1,565	2,212	3,300	5,500	7,700
Флюенс нейтронов источника $F_{ни}$ , нейтр./см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	1,174–5	4,803–6	2,369–6	1,056–6	3,770–7	1,916–7
Флюенс нейтронов защитной плиты $F_{зп}$ , нейтр./см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	1,098–6	3,658–7	1,500–7	5,491–8	1,589–8	7,252–9
$100 F_{зп}/F_{ни}$ , %	8,55	7,08	5,96	4,94	4,04	3,65
$^{approx}F_{зп} = 1,1039R^{-2,4811}$ , нейтр./см <sup>2</sup> ·дел. АЗ	1,069–6	3,633–7	1,535–7	5,707–8	1,607–8	6,974–9
$100 \left( ^{approx}F_{зп} - F_{зп} \right) / F_{зп}$ , %	-2,63	-0,67	+2,31	+3,94	+1,13	-3,84
Средняя энергия нейтронов защитной плиты $\bar{E}$ , МэВ	0,734	0,744	0,752	0,760	0,769	0,774

Единой формы представления результатов, полученных для позиционных координат  $R$  и  $X$ , в рамках настоящей работы найти не удалось. Результаты, иллюстрирующие изменение флюенса нейтронов и средней энергии единичного флюенса для выборок данных по  $R$  и  $X$  отдельно, в графической форме представлены на рис. 3 и 4. Для наглядности представляемых данных была выбрана относительная форма их отображения. Переход в относительный формат был осуществлен делением расчетных значений флюенса и средней энергии как для позиционных координат  $R$ , так и для позиционных координат  $X$ , на минимальные расчетные значения указанных параметров,

полученных для позиционной координаты  $X = 9,6$  м (расстояние от центра АЗ по радиусу 9,92 м) равными  $1,330 \cdot 10^{-6}$  нейтр./см<sup>2</sup>·дел. АЗ для флюенса и 0,189 МэВ для средней энергии.

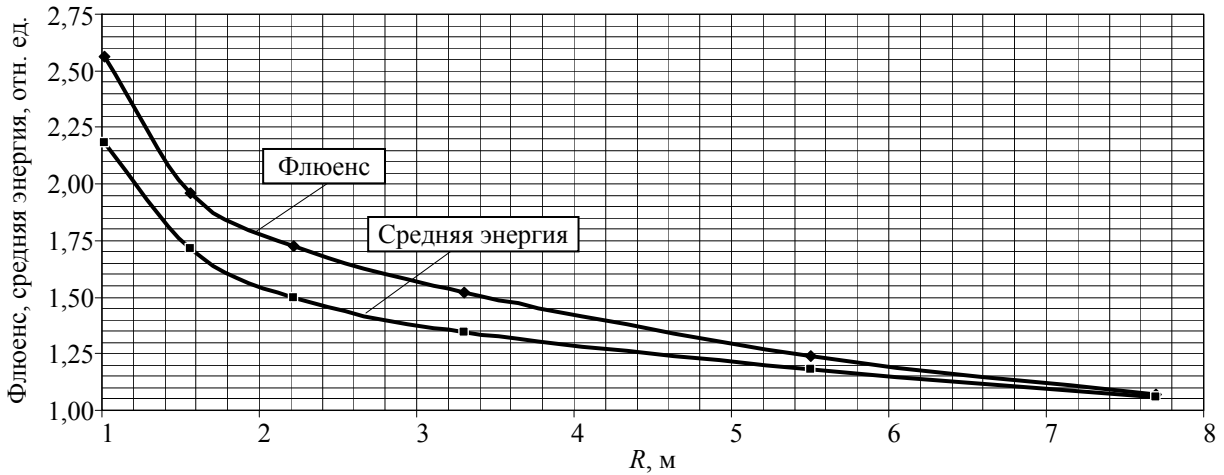


Рис. 3. Относительное изменение флюенса и средней энергии спектра единичного флюенса для позиционных координат  $R$  (рис. 2)

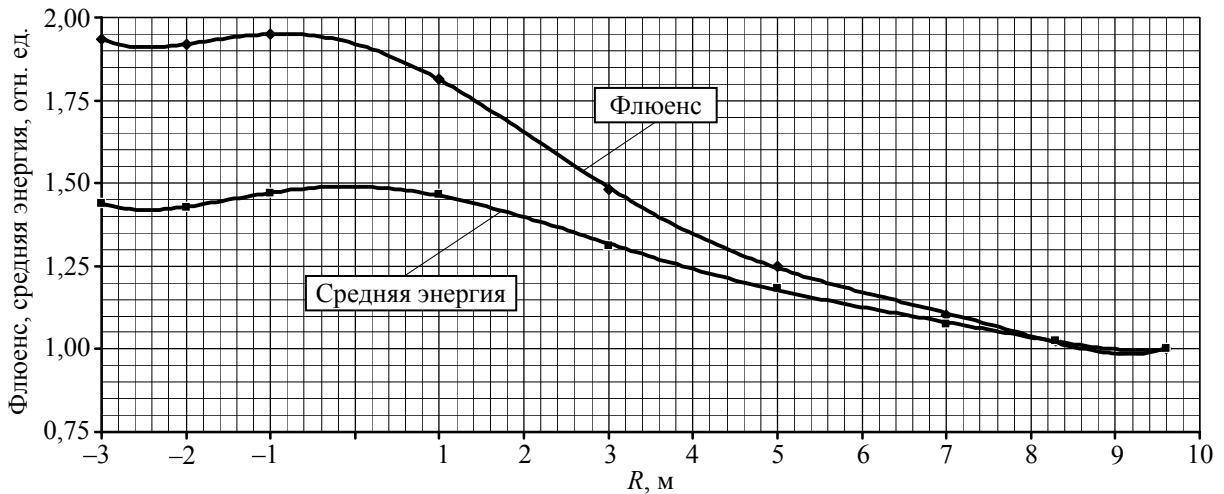


Рис. 4. Относительное изменение флюенса и средней энергии спектра единичного флюенса для позиционных координат  $X$  (рис. 2)

Для распределений по  $R$  характерным является их монотонный рост по мере приближения к АЗ с результирующим увеличением в  $\sim 2,5$  раза для флюенса и  $\sim 2,25$  раза для средней энергии. Сплошные линии на графиках рис. 3 – простые соединительные расчетных величин.

Для распределений по  $X$  характер изменения и флюенса, и средней энергии более сложный, с выраженными особенностями в пространстве между АЗ и биологической защитой зала и при приближении к торцевым стенам зала. Сплошными линиями на графиках рис. 4 отображены аппроксимирующие выборки соответствующих расчетных величин функционалы в виде полиномов

шестого порядка. Максимальное изменение флюенса составляет ~2 раза, средней энергии ~1,5 раза.

Оценка доли флюенса нейтронов фона во флюенсе нейтронов поля была осуществлена в трех вариантах:

– в варианте 1 флюенс нейтронов фона определялся как разность расчетного флюенса нейтронов поля и расчетного флюенса нейтронов источника для вакуумированного пространства вокруг АЗ, а его доля – как отношение полученной разности к расчетному флюенсу нейтронов поля;

– в варианте 2 флюенс нейтронов фона определялся как разность расчетного флюенса нейтронов поля и расчетного флюенса нейтронов источника для воздушного пространства реакторного зала, а его доля – как отношение полученной разности к расчетному флюенсу нейтронов поля;

– в варианте 3 флюенс нейтронов фона определялся как разность экспериментального флюенса нейтронов поля и флюенса нейтронов утечки, определяемого по соотношению  $F_{ни}(R) = 1,2254 \cdot 10^{-5} R^{-2,0343}$ .

Полученные результаты представлены в табл. 8.

Таблица 8

*Доля фоновой компоненты нейтронов поля*

Параметр	Значение параметра в позиционной координате $R$ , м					
	1,013	1,565	2,215	3,300	5,500	7,700
Доля флюенса фоновых нейтронов во флюенсе нейтронов поля, %:						
вариант 1	23,2	35,9	49,7	66,0	81,5	88,2
вариант 2	22,5	34,8	48,7	65,0	81,0	88,0
вариант 3	37,1	46,7	56,2	68,1	81,7	88,3

При определенном различии вариантного определения долевой компоненты фона в составе нейтронов поля, можно однозначно констатировать, во-первых, значительность ее величины даже в околосонном пространстве, во-вторых, практическое нивелирование различий вариантной оценки на расстояниях свыше ~3 м от центра АЗ.

Установлено также, что при использовании модельного представления КАСКАД для спектра нейтронов источника в виде  $F(E) = 0,677MC1 + 0,323MC2$  изменения флюенса нейтронов источника по  $R$  в виде  $F_{ни}(R) = 1,2254 \cdot 10^{-5} R^{-2,0343}$  и спектральных решений КАСКАД для флюенса нейтронов поля в позиционных координатах  $R$  3,3; 5,5 и 7,7 м [3] для определения средних энергий флюенса нейтронов фона в указанных координатах  $R$  имеет место совпадение полученных численных значений с соответствующими расчетными значениями С-007 для соответствующих координат  $R$ . Для позиционной координаты  $R = 3,3$  м имеем 0,267 МэВ (модельный расчет) и 0,254 МэВ (расчет С-007), для позиционных координат  $R$  5,5 и 7,7 м имеем, соответственно, 0,224 МэВ против 0,223 МэВ и 0,193 МэВ против 0,200 МэВ.

## Заключение

При вполне удовлетворительном уровне согласованности результатов расчета и эксперимента для основных характеристик поля нейтронов в рабочем зале реактора с компактной активной зоной БР-1 (БР-1М) анализ полученных в рамках настоящей работы расчетных данных позволил существенно уточнить особенности формирования структурных составляющих поля (нейтроны источника, нейтроны фона реакторного стенда, нейтроны фона реакторного зала) по сравнению с ранее сложившимися представлениями [2].

Выявлено, что имеет место спектральная неизменность нейтронов источника (нейтронов утечки из АЗ реактора) во всем пространстве реакторного зала. С использованием методологии КАСКАД [3] удалось подобрать спектральное решение для единичного флюенса нейтронов источника, обеспечивающее согласование с расчетными значениями С-007 соответствующих средних энергий, сечений реакций  $^{237}\text{Np}(n, f)$ ,  $^{115}\text{In}(n, n')$ ,  $^{238}\text{U}(n, f)$ ,  $^{58}\text{Ni}(n, p)$  и долевых вкладов фона на расстояниях более 3 м от АЗ.

Выявлено, что имеет место значительное отклонение от предполагаемого изменения флюенса нейтронов источника по закону  $1/R^2$  по радиусу от центра АЗ. Определен коэффициент функционального отклонения от закона  $1/R^2$ . По выборке расчетных данных для флюенса нейтронов источника подобрана аппроксиманта, отображающая фактическое изменение флюенса по радиусу от центра АЗ. Ожидаемое качественно (цилиндрическая АЗ далеко не точечного размера; выход нейтронного излучения не по лучу, а по закону  $\sim \cos^2$ ), в количественном выражении отклонение оказалось неожиданно большим. Полученные аналитические формы представления флюенса и спектра флюенса нейтронов источника обеспечивают возможность оперативной оценки соответствующих величин (адекватных результатам расчета С-007) для произвольной позиционной координаты в реакторном зале.

Выявлено, что имеет место значительная вариативность как флюенса нейтронов фона, так и его средней энергии, в зависимости от ориентации позиционной координаты в пространстве реакторного зала относительно АЗ, реакторного стенда и стен реакторного зала. Аналитических форм обобщенного представления выявленной вариативности в рамках настоящей работы установить не удалось. Для прогнозных оценок вне изученного координатного пространства реакторного зала необходимо либо получение соответствующих расчетных данных (с использованием С-007), либо данных эксперимента с определением спектра и флюенса нейтронов поля (для расстояний более 3 м от АЗ реактора).

## Список литературы

1. Севастьянов В. Д., Воронцов С. В., Дроздов И. Ю. и др. Экспериментальные залы быстрых реакторов с открытой активной зоной как формователи энергетических спектров нейтронов // Приборы и техника эксперимента, 2004, № 6. С. 5–14.
2. Кошелев А. С., Маслов Г. Н., Одинцов Ю. М. Избранные пространственно-энергетические характеристики стационарного поля нейтронного поля нейтронов снаружи активной зоны импульсного реактора БР-1 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 1996. Вып. 1. С. 38–47.

3. Севастьянов В. Д., Кошелев А. С., Маслов Г. Н. Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления, генераторы 14 МэВ нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, устройства, конвертирующие нейтронное излучение. Справочник / Под ред. доктора техн. наук В. Д. Севастьянова. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007, 654 с.

4. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2011. Вып. 1. С. 17–24.

5. Павловский А. И., Малинкин А. А., Колесов В. Ф. и др. Бустер-реактор БР-1 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1985. Вып. 1. С. 3–13.

6. Воинов М. А., Воронцов С. В., Девяткин А. А. и др. Исследовательские ядерные установки РФЯЦ-ВНИИЭФ (основные характеристики, аспекты совершенствования СУЗ, элементов конструкции и правил эксплуатации) // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2012. Вып. 3. С. 3–16.

7. Брегадзе Ю. И., Степанов Э. К., Ярына В. П. Прикладная метрология ионизирующих излучений // Под ред. Ю. И. Брегадзе. – Москва: Энергоатомиздат, 1990, 264 с.

8. Крайтор С. Н. Дозиметрия при радиационных авариях / Под ред. И. Б. Кеирим-Маркуса. – Москва: Атомиздат, 1979, 280 с.

9. Дмитриев А. Б., Малышев Е. К. Нейтронные ионизационные камеры для реакторной техники. – Москва: Атомиздат, 1975, 96 с.

## **Specific features of neutron field formation in the working hall of compact core reactor BR-1 (BR-1M)**

A. S. Koshelev, V. Kh. Khoruzhy

*Presented are results of a detailed calculation study of neutron field formation peculiar features in the working hall of the reactor BR-1 (BR-1M) on the whole as well as two basic structural field components – leakage neutrons from the reactor core (source neutrons) and background neutrons, formed as a result of interaction between leakage neutrons and efficiently moderating medium of shielding walls of the reactor hall and massive scatter elements in the reactor stand design.*

*There are itemized special features of functional dependencies of fluence and average energy of source of neutron fluence and background neutrons from the positional field coordinate in the reactor hall.*

*The results of calculation for neutron field on the whole are compared to the available experimental data.*