

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ В РАБОЧЕМ ЗАЛЕ РЕАКТОРА С КОМПАКТНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ БР-1 (БР-1М)

А. С. Кошелев, В. Х. Хоружий

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

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.

Ключевые слова: расчет методом Монте-Карло, нейтроны поля, нейтроны источника, нейтроны фона, флюенс нейтронов, спектр единичного флюенса, средняя энергия.

SPECIFIC FEATURES OF NEUTRON FIELD FORMATION IN THE WORKING HALL OF COMPACT CORE REACTOR BR-1 (BR-1M) / A. S. KOSHELEV, V. Kh. KHORUZHYY // 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.

Key words: calculation by Monte-Carlo method, field neutrons, source neutrons, background neutrons, neutron fluence, unit fluence spectrum, average energy.

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}U с молибденом 9 %-го массового содержания в варианте БР-1 и 172,9 кг сплава урана 90 %-го обогащения по ^{235}U с молибденом 10 %-го массового содержания в варианте БР-1М), так и по конструктивной компоновке (практически изменено только на ~ 1 см расстояние между верхним и нижним блоками в критической конфигурации), как практически более целесообразный был выбран вариант развернутого расчетного исследования с использованием расчетной модели активной зоны БР-1М.

Расчетно-экспериментальный формализм

В качестве основного расчетного инструмента использовалась методика С-007 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 γ -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, комплектующих АЗ, принимался следующим (в единицах атомной концентрации « 10^{24} см^{-3} »): ^{235}U – $3,518 \cdot 10^{-2}$, ^{238}U – $3,319 \cdot 10^{-3}$, ^{234}U – $3,729 \cdot 10^{-4}$, ^{236}U – $1,791 \cdot 10^{-4}$, Мо – $1,065 \cdot 10^{-2}$, С – $1,267 \cdot 10^{-4}$, Si – $6,510 \cdot 10^{-5}$, Fe – $3,274 \cdot 10^{-5}$.

Моделирующий состав стальной плиты принимался следующим (в единицах атомной концентрации « 10^{24} см^{-3} »): Fe – $6,036 \cdot 10^{-2}$, Ni – $5,986 \cdot 10^{-3}$, Cr – $1,647 \cdot 10^{-2}$, Ti – $9,938 \cdot 10^{-4}$, С – $4,753 \cdot 10^{-4}$.

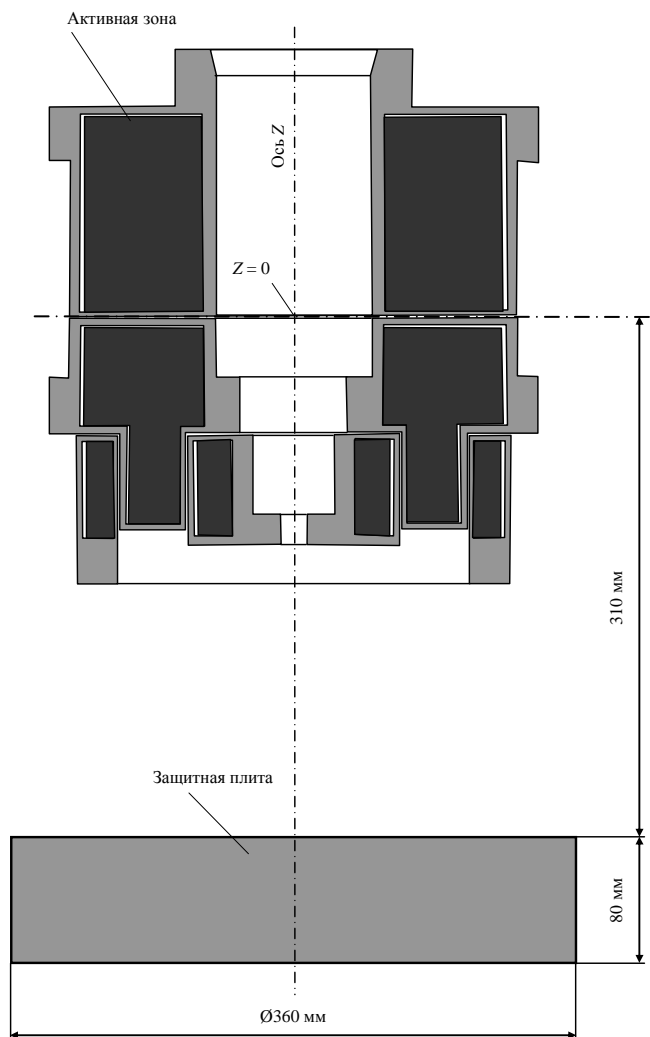


Рис. 1. Используемая в расчете схема активной зоны реактора БР-1М и массивного стального элемента γ -защиты на реакторном стенде

Моделирующий состав материалов бетонной оболочки рабочего зала принимался следующим (в единицах атомной концентрации « 10^{24} см^{-3} »): О – $3,938 \cdot 10^{-2}$, Si – $1,806 \cdot 10^{-2}$, Н – $7,469 \cdot 10^{-3}$, Са – $2,988 \cdot 10^{-3}$, 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} »): N – $3,890 \cdot 10^{-5}$, О – $1,048 \cdot 10^{-5}$, Ar – $2,533 \cdot 10^{-7}$.

В качестве непосредственно рассчитываемых были выбраны следующие 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 объемом 1 см^3 в нормировке на одно деление в АЗ в единицах «нейтр./см²·дел.АЗ»;

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

– флюенс только рассеянных (фоновых) нейтронов в избранной позиционной координате реакторного зала \bar{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 \bar{F} и нейтронов фона \bar{F} в 31-групповом энергетическом формате, средние энергии групп \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 отклика определялось внутри сферического элемента пространства объемом 1 см^3 , содержащего по одному атому соответствующего материала.

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 данных работы [7] с целью более детального рассмотрения выявленных особенностей формирования базовых компонентов (источник и фон) поля нейтронов в реакторном зале БР-1 (БР-1М).

Позиционные координаты R расположены на радиальной осевой, проходящей через центр АЗ, и выбраны равными (следуя [2, 3]) $R1 = 1,013 \text{ м}$, $R2 = 1,565 \text{ м}$, $R3 = 2,215 \text{ м}$, $R4 = 3,300 \text{ м}$, $R5 = 5,500 \text{ м}$, $R6 = 7,700 \text{ м}$. Позиционные координаты X расположены на осевой, ориентированной па-

раллельно центральной осевой рельсовой колее перемещения стенда горизонтальной загрузки (СГЗ) реактора, на расстоянии (в плане) 2,5 м от указанной оси. Выбраны равными $X1 = -3 \text{ м}$, $X2 = -2 \text{ м}$, $X3 = -1 \text{ м}$, $X4 = 1 \text{ м}$, $X5 = 3 \text{ м}$, $X6 = 5 \text{ м}$, $X7 = 7 \text{ м}$, $X8 = 8,3 \text{ м}$, $X9 = 9,6 \text{ м}$.

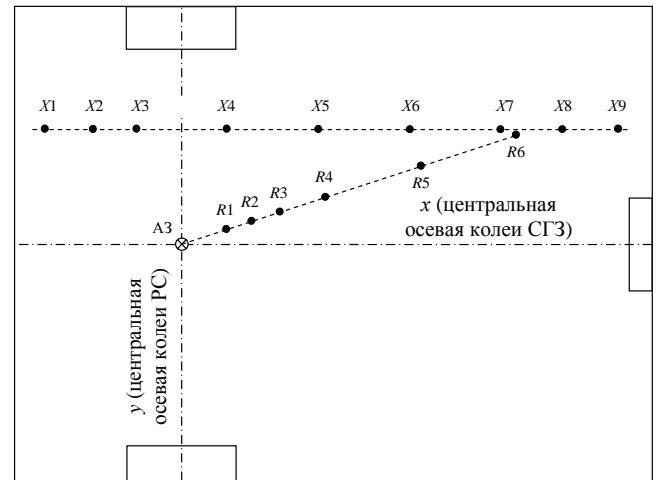


Рис. 2. Схема расположения расчетных позиций R и X в реакторном зале

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 колеей перемещения реакторного стенда, РС) и на расстоянии 5,2 м от каждой из симметричных боковых стен.

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 выбором 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 конкретизируют данные, представленные в табл. 1.

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]).

Энергетический формат, использованный в расчетах по методике С-003

i	E_i , МэВ	$E_i + dE_i$, МэВ	i	E_i , МэВ	$E_i + dE_i$, МэВ	i	E_i , МэВ	$E_i + dE_i$, 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	26	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	–	–	–

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 ² ·дел.АЗ	1.897–5	9.242–6	5.543–6	3.391–6	2.087–6	1.649–6
F_p , нейтр/см ² ·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 ² ·дел.АЗ	3.461–7	3.535–7	3.532–7	3.832–7	3.832–7	3.713–7
F_p , нейтр/см ² ·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 ² ·дел.АЗ	1.594–5	6.947–6	3.552–6	1.790–6	8.160–7	5.181–7
F_p , нейтр/см ² ·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 \bar{E}_p от \bar{E}_3 , %	+9.15	+6.29	+2.67	–0.77	0.00	+1.79

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-групповом формате КАСКАД для экспериментальных данных и в 31-групповом

формате для расчетных данных. Ограничение выборки данных шестью позиционными координатами с маркировкой R определяется соответствующим ограничением в наличии экспериментальных данных.

Из табл. 2 следует, что для всех рассмотренных характеристик поля нейтронов результаты расчета и эксперимента в пределах критерияльного условия 20 % согласуются.

Уровни согласованности экспериментальных и расчетных данных в каждой группе 31-группового 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_{zi} групповых флюенсов

i	Отличие F_{pi} от F_{zi} (%) 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

Результаты расчета избранных интегральных откликов в сравнении с экспериментальными данными

Интегральный отклик, реакц./ядро-дел.АЗ	Значение интегрального отклика в позиционных координатах R , м					
	1,013	1,565	2,215	3,300	5,500	7,700
Реакция $^{237}\text{Np}(n,f)$						
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
Реакция $^{238}\text{U}(n,f)$						
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 $^{115}\text{In}(n,n')$						
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 $^{58}\text{Ni}(n,p)$						
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).

В графе *aprox* (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, существует значимое различие 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

Избранные характеристики флюенса нейтронов источника

Позиция		Флюенс, нейтр./см ² ·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

Таблица 6

Сечения избранных реакций на спектре нейтронов источника

Реакция	σ (см ²) для позиционных координат R , м						$\bar{\sigma}$, см ² ($\pm\delta\sigma$), %
	1,013	1,565	2,215	3,300	5,500	7,700	
Вакуумированное пространство без стен зала							
²³⁷ 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 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 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 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 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 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 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 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)

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 $F(E) = b_1 \cdot MC1 + b_2 \cdot MC2$ ($MC1 = 2\sqrt{\alpha_1^3 E/\pi} \cdot e^{-\alpha_1 E}$ с $\alpha_1 = 802$ МэВ⁻¹, $MC2 = \alpha_2^2 E e^{-\alpha_2 E}$ с $\alpha_2 = 5$ МэВ⁻¹, $b_1 + b_2 = 0,5419 + 0,4581 = 1,0000$), было сформировано модельное решение для спектра нейтронов источника в виде $F(E) = b_1 \cdot MC1 + b_2 \cdot MC2$ с $\alpha_1 = 802$ МэВ⁻¹ и $\alpha_2 =$

$= 5$ МэВ⁻¹, для которого при $b_1 = 0,677$ и $b_2 = 0,323$ имеет место $\bar{E} = 1,395$ МэВ.

Результаты расчета интегральных откликов реакций ²³⁷Np(n,f), ¹¹⁵In(n,n'), ²³⁸U(n,f), ⁵⁸Ni(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 σ получены путем деления расчетного интегрального отклика на расчетный флюенс нейтронов источника в соответствующей позиционной координате R (рис. 2).

Из табл. 6 следует, что, несмотря на более чем 60-кратный перепад численных величин инте-

гральных откликов и флюенсов нейтронов при переходе от $R = 1,013$ м к $R = 7,7$ м, имеет место практически пренебрежимый разброс частных значений σ 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: $\sigma(^{237}\text{Np}) = 1,009 \cdot 10^{-24}$ см² (отличие от расчетного в вакууме 0,20 %), $\sigma(^{115}\text{In01}) = 1,242 \cdot 10^{-25}$ см² (отличие от расчетного в вакууме 11 %), $\sigma(^{115}\text{In02}) = 1,353 \cdot 10^{-25}$ см² (отличие от расчетного в вакууме 18 %), $\sigma(^{238}\text{U}) = 1,944 \cdot 10^{-25}$ см² (отличие от расчетного в вакууме 6,3 %), $\sigma(^{58}\text{Ni}) = 6,307 \cdot 10^{-26}$ см² (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 фоновых компонент, формируемого массивной защитной плитой (рис. 1), представлены в табл. 7, 8. Акцентируем внимание на следующем:

- в ближнем околосонном пространстве фоновый компонент, формируемый защитной плитой, не может рассматриваться пренебрежимо малым при проведении экспериментов, направленных на выделение нейтронов источника из суммарного поля нейтронов;

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

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 $F_{\text{ни}}$, нейтр./см ² ·дел.А3	1.174–5	4.803–6	2.369–6	1.056–6	3.770–7	1.916–7
Флюенс нейтронов защитной плиты $F_{\text{зп}}$, нейтр./см ² ·дел.А3	1.098–6	3.658–7	1.500–7	5.491–8	1.589–8	7.252–9
$100F_{\text{зп}}/F_{\text{ни}}$, %	8.55	7.08	5.96	4.94	4.04	3.65
$\text{approx } F_{\text{зп}} = 1,1039R^{-2,4811}$, нейтр./см ² ·дел.А3	1.069–6	3.633–7	1.535–7	5.707–8	1.607–8	6.974–9
$100 \left(\frac{\text{approx } F_{\text{зп}} - F_{\text{зп}}}{F_{\text{зп}}} \right)$, %	-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

Таблица 8

Доля фоновых компонент нейтронов поля

Доля флюенса фоновых нейтронов во флюенсе нейтронов поля, %	Значение параметра в позиционной координате R , м					
	1,013	1,565	2,215	3,300	5,500	7,700
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

– 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.

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 раздельно, в графической форме представлены на рис. 3 и 4. Для на-

глядности представляемых данных была выбрана относительная форма их отображения. Переход в относительный формат был осуществлен путем деления расчетных значений флюенса и средней энергии как для позиционных координат R , так и для позиционных координат X на минимальные расчетные значения указанных параметров, полученные для позиционной координаты $X = 9,6$ м (расстояние от центра АЗ по радиусу 9,92 м) равными $1,330 \cdot 10^{-6}$ нейтр./см²·дел.АЗ для флюенса и 0,189 МэВ для средней энергии.

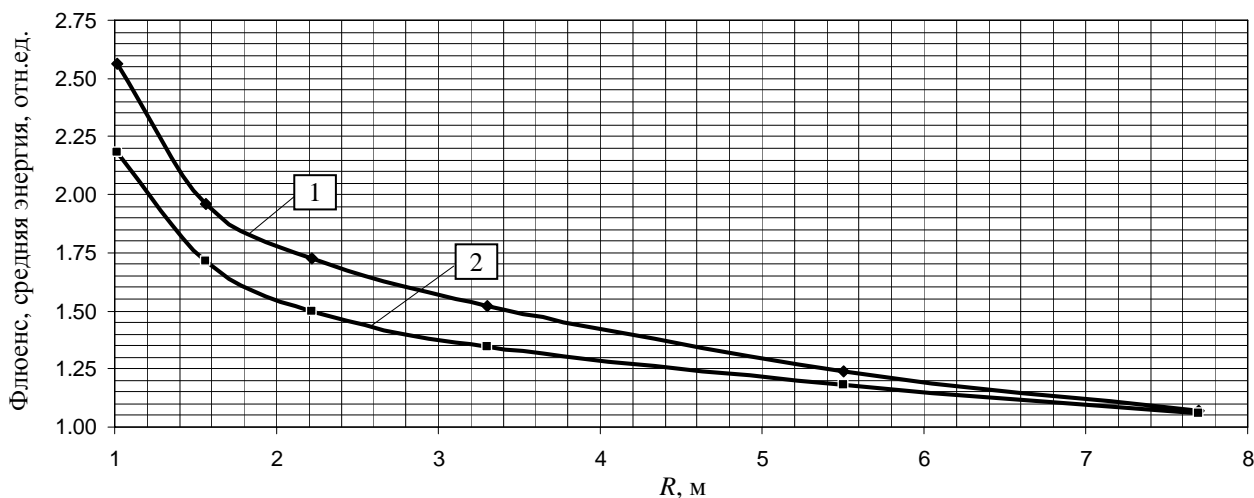


Рис. 3. Относительное изменение флюенса (1) и средней энергии (2) спектра единичного флюенса для позиционных координат R (рис. 2)

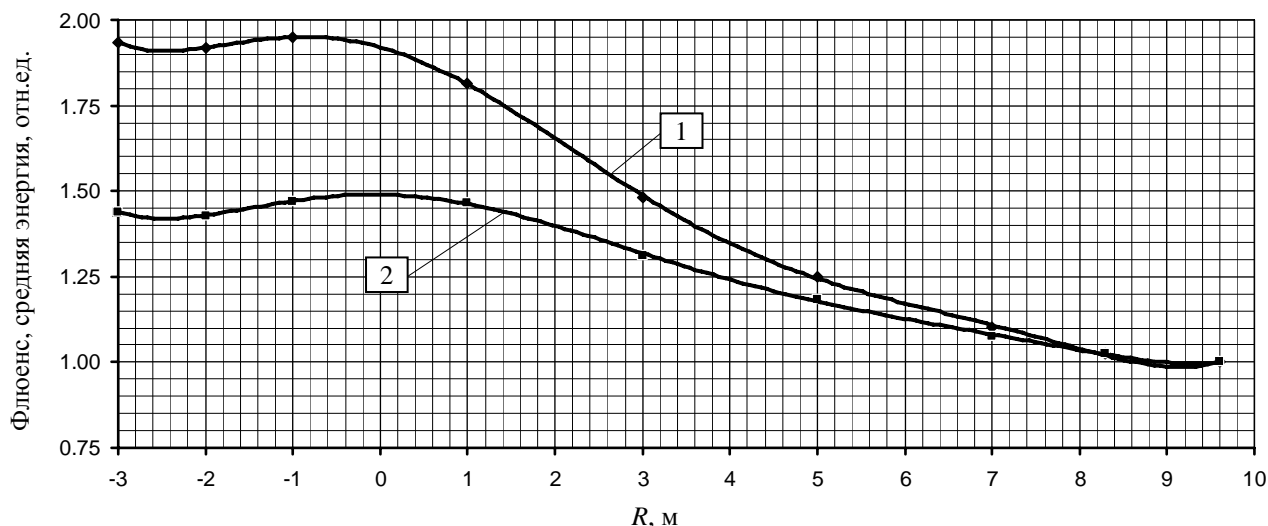


Рис. 4. Относительное изменение флюенса (1) и средней энергии (2) спектра единичного флюенса для позиционных координат X (рис. 2)

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 ~ 2 -кратное, средней энергии $\sim 1,5$ -кратное.

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

– флюенс нейтронов фона определяется 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;

– флюенс нейтронов фона определяется 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;

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

При определенном различии вариантного определения долевого компонента фона в составе нейтронов поля, можно однозначно констатировать, во-первых, значительность его величины даже в околосонном пространстве, и, 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 $F(E) = 0,677 \cdot \text{MC1} + 0,323 \cdot \text{MC2}$ изменения флюенса нейтронов источника по R в виде $F_{\text{фон}}(R) = 1,2254 \cdot 10^{-5} R^{-2,0343}$ 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 , полученные численные значения совпадают 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 долевого вклада 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 // ВАНТ. 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 / Под ред. д-ра техн. наук В. Д. Севастьянова. – Менделеево, 2007.

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 // ВАНТ. 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 // ВАНТ. 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) // ВАНТ. 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. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 264 с.

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

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

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
тел. (831 30) 3-06-87

Статья поступила в редакцию 10.06.2014.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2014, вып. 3, с. 72–82.