

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ РЕАКТОРА БИГР

Жирнов Александр Васильевич (otd4@expd.vniief.ru), Балашова Юлия Викторовна, Тесаловский Николай Андреевич, Александров Александр Александрович, Деманов Сергей Вячеславович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

С использованием метода нейтронного активационного анализа и расчетов по методу Монте-Карло определены значения полного и парциального флюенса нейтронов для трех позиций в центральном канале реактора БИГР. В результате восстановления энергетического спектра нейтронов получены интегральные характеристики спектра. Оценено влияние конструктивно отличающихся вариантов контейнера центрального канала на распределение флюенса нейтронов по высоте контейнера.

Ключевые слова: реактор БИГР, центральный канал, активационный анализ, метод Монте-Карло, энергетический спектр нейтронов, флюенс нейтронов.

EXPERIMENT-CALCULATED STUDY OF NEUTRON FIELD CHARACTERISTICS IN CENTRAL BIGR REACTOR CHANNEL

Zhirnov Alexandr Vasilievich (otd4@expd.vniief.ru), Balashova Yuliya Viktorovna, Tesalovskii Nikolay Andreevich, Aleksandrov Alexandr Aleksandrovich, Demanov Sergey Vyacheslavovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Values of total and partial neutron fluence were determined for three positions in a central channel of BIGR reactor using Monte Carlo method calculations and a neutron activation analysis. As a result of energy neutrons spectrum reconstruction there were obtained spectrum integral characteristics. Assessed is effect of structurally differing variants of a central channel container on neutron fluence distribution over the container height.

Keywords: BIGR reactor, central channel, activation analysis, Monte-Carlo method, neutron energy spectrum, neutron fluence.

Введение

Исследовательский импульсный реактор БИГР [1] эксплуатируется в РФЯЦ-ВНИИЭФ с 1977 г. и предназначен для облучения различных объектов мощными потоками нейтронов и гамма-квантов. В реакторе используется уникальное уран-графитовое топливо – спрессованная гомогенная смесь диоксида высокообогащенного урана и графита. Топливная часть активной зоны (АЗ) представляет собой вертикально ориентированный полый цилиндр с наружным диаметром ~760 мм, внутренним диаметром ~180 мм и высотой ~670 мм. Объекты могут располагаться снаружи (сбоку) АЗ и в контей-

нере центрального канала (КЦК). Внутренний объем КЦК имеет приблизительные габариты $\varnothing 100 \times 700$ мм. Конструктивная схема реактора БИГР представлена на рис. 1.

В статье [2] отмечено, что при проведении облучательных экспериментов на реакторе БИГР существует неперекрывающийся диапазон по величине полного флюенса нейтронов от $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Значения полного флюенса приведены для максимально разрешенного энерговыделения в АЗ БИГР при работе в импульсном режиме 280 МДж.

Значение $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ соответствует облучательной позиции снаружи АЗ, значение $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ – об-

лучательной позиции в крайней нижней области КЦК (значение полного флюенса нейтронов изменяется по высоте КЦК приблизительно в 2 раза).

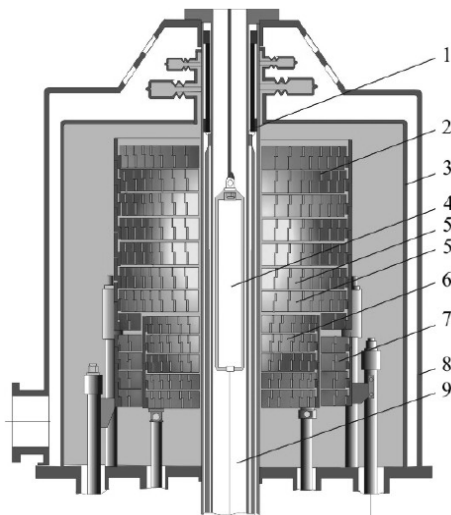


Рис. 1. Конструктивная схема реактора БИГР: 1 – импульсный блок, 2 – неподвижная часть АЗ, 3 – корпус АЗ, 4 – КЦК, 5 – топливные кольца АЗ, 6 – блок грубого регулирования АЗ, 7 – блок тонкого регулирования АЗ, 8 – кожух охлаждения, 9 – осевая полость

Согласно [2] для флюенса нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ (как применяемой меры радиационного воздействия при проведении исследований) соответствующий диапазон составляет от $\sim 0,75 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до $\sim 3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

С точки зрения практических задач применения реактора БИГР (как источника нейтронного излучения) наличие такого неперекрывающегося диапазона означает следующее. Предположим, в импульсном (или статическом) пуске реактора с энерговыделением ~ 280 МДж облучается объект у боковой поверхности АЗ (до уровня $\sim 0,75 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ по флюенсу нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ). Если при этом возникает необходимость облучения дополнительного объекта до уровня, например, $\sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, по флюенсу нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ, то реализовать такое облучение в том же пуске реактора, используя позицию снаружи АЗ или объем КЦК, невозможно. Указанный уровень для дополнительного объекта с одной стороны превышает значения, достижимые снаружи АЗ, а с другой стороны не попадает в диапазон, реализующийся в пуске с таким энерговыделением в пределах КЦК (от $3,5 \cdot 10^{15}$ до $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$).

В статье [2] отмечено, что при облучениях в центральном канале (ЦК) реактора БИГР диапазон флюенса нейтронов может быть расширен в область меньших значений (ниже $3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ для флюенса нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ) за счет удаления штатной нижней конструктивной части КЦК.

Для получения количественных результатов, иллюстрирующих эту возможность, в настоящей

работе проводилось экспериментально-расчетное исследование характеристик нейтронного поля в ЦК реактора БИГР. Для экспериментального исследования использовался метод нейтронно-активационного анализа. Расчетное исследование проводилось с использованием программы, реализующей метод Монте-Карло для решения задач переноса излучения.

Целью работы являлось получение экспериментальных данных, которые в дальнейшем могут быть использованы для планирования и оптимизации постановки облучательных экспериментов, а именно определение достижимых значений флюенса нейтронов (полного и с энергией выше 0,1 МэВ) в следующих возможных областях облучения:

- в ЦК ниже КЦК при использовании двух различных вариантов нижней конструктивной части КЦК;

- в верхней части внутреннего объема КЦК.

Позиция в верхней части КЦК интересна тем, что позволяет уточнить указанный для КЦК диапазон флюенса нейтронов за счет учета фактической формы распределения по высоте (возможно наличие несимметричности).

Дополнительно исследовалось распределение удельной активации пороговых активационных детекторов из никеля (реакция по высоте ЦК (во внутреннем объеме КЦК и ниже КЦК).

Постановка экспериментальной части исследования

Проведено 2 статических пуска на реакторе БИГР для облучения комплектов активационных детекторов, располагаемых в ЦК (облучения № 1 и № 2, соответственно).

Схемы размещения активационных детекторов относительно конструктива КЦК в облучениях № 1 и № 2 представлены на рис. 2.

В обоих статических пусках на 2-х металлических штангах (верхней и нижней) из алюминиевого сплава с шагом 50 мм закреплялись активационные детекторы 1–3, 14, 15, 17–19, рис. 2, из никеля (диски $\varnothing 10 \times 1$ мм из никеля марки НП-2 с содержанием примесей не более 0,2 %).

В качестве нижней конструктивной части КЦК реактора БИГР предусмотрено использование или штатной пробки высотой 190 мм, содержащей графит, или стальной заглушки высотой 25 мм. Далее по тексту для обозначения нижних частей КЦК принимаются следующие наименования: графитовая пробка и стальная пробка, соответственно.

За начало отсчета вертикального положения детекторов в облучении № 1 принималась верхняя поверхность стальной пробки, в облучении № 2 – верхняя поверхность графитовой пробки (в привязке к КЦК их положение совпадает).

Общая информация по облучениям активационных детекторов приведена в табл. 1.

Общая информация по облучениям

№ облучения	Нижняя конструкционная часть	Количество детекторов из никеля, шт.	№ наборов активационных детекторов	Положение набора активационных детекторов относительно верхней поверхности пробки, мм
1	стальная пробка	19	1	655
			2	-125
2	графитовая пробка	17	3	-230

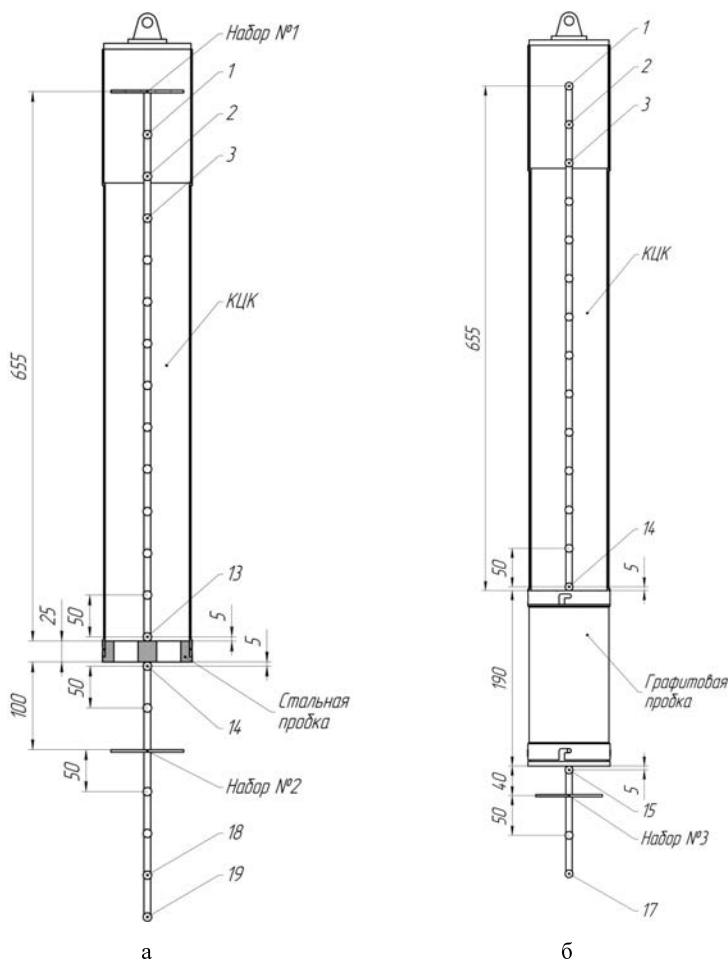


Рис. 2. Схемы размещения активационных детекторов: а – в облучении № 1, б – в облучении № 2; 1–3, 14, 15, 17–19 – активационные детекторы

Схемы размещения КЦК с активационными детекторами в ЦК реактора БИГР в облучениях № 1 и № 2 представлены на рис. 3.

Каждый набор активационных детекторов включал следующие материалы:

- индий (диск $\varnothing 20 \times 1$ мм, реакция $^{115}\text{In}(n, n)^{115m}\text{In}$, без экрана);
- алюминий (диск $\varnothing 20 \times 1$ мм, реакция $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, без экрана);
- никель (диск $\varnothing 20 \times 1$ мм, реакция $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$, без экрана);

- ниобий (диск $\varnothing 20 \times 1$ мм, реакция $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92}\text{Nb}$, без экрана);

- золото (диск диаметром 10 мм, толщиной 20 мкм, реакция $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$, без экрана и в кадмиевом экране толщиной 0,5 мм);

- медь (диск диаметром 20 мм и толщиной 40 мкм, реакция $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$, без экрана и в кадмиевом экране толщиной 0,5 мм).

Энерговыделение в АЗ реактора БИГР определялось по штатной методике, применяемой на установке (по активации детекторов из никеля, размещаемых в каждом пуске установки в фиксированных позициях на технологическом оборудовании).

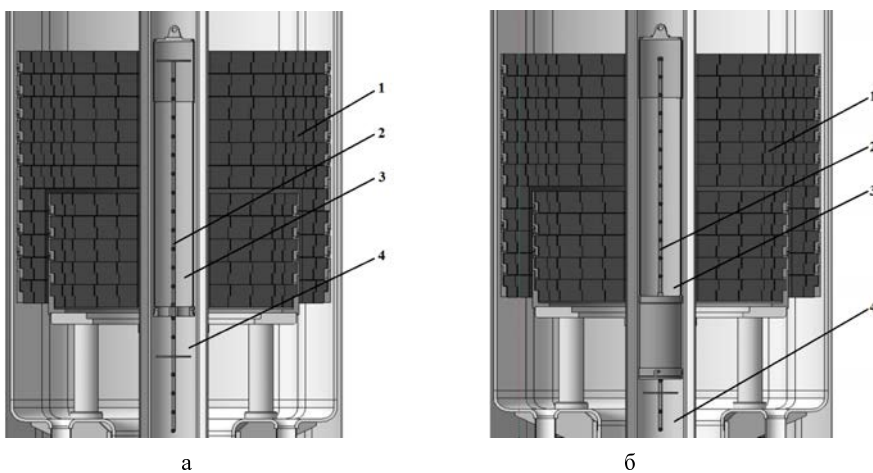


Рис. 3. Схемы размещения КЦК с активационными детекторами в ЦК реактора БИГР: а – в облучении № 1, б – в облучении № 2; 1 – АЗ,2 – штанга с детекторами, 3 – КЦК (а – со стальной пробкой, б – с графитовой пробкой), 4 – ЦК

Результаты активационных измерений

После каждого облучения для всех активационных детекторов определялись значения активационного интеграла реакций (по результатам измерения наведенной гамма-активности нуклидов в материале детекторов). Для этого использовался гамма-спектрометр многоканальный для измерения рентгеновского и гамма-излучения.

Полученные значения активационных интегралов приведены в табл. 2, 3. Погрешность определения активационного интеграла – не более $\pm 4\%$ при доверительной вероятности $P = 0,95$.

В соответствии со штатной методикой в 2-х статических пусках реактора БИГР получены следующие значения энерговыделения в АЗ установки (статистическая погрешность измерения активации детекторов не более $\pm 4\%$ при доверительной вероятности $P = 0,95$): в облучении № 1 – 287 МДж, в облучении № 2 – 166 МДж.

Сравнение распределений активации детекторов из никеля по высоте ЦК

По результатам измерений проведено сравнение распределений по высоте ЦК активационных интегралов реакции $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ в детекторах из никеля, использованных в облучениях № 1 и № 2. Напомним, что разница между пусками заключается в использовании различных вариантов нижней конструкционной части КЦК (в облучении № 1 – стальная пробка, в облучении № 2 – графитовая пробка). Графическое сравнение распределений активации детекторов из никеля представлено на рис. 4.

Сравнение распределений активации детекторов показывает, что выбор одного из двух вариантов нижней конструкционной части КЦК в пределах погрешности не влияет на относительное распределение активации никелевых детекторов по высоте

КЦК. Абсолютные значения активационного интеграла в максимумах высотных распределений (для положения 305 мм относительно верхней поверхности пробки) при нормировке на единицу энерговыделения в пределах погрешности активационного интеграла также совпадают.

Результаты восстановления спектров нейтронов

По результатам измерений для наборов № 1–№ 3 в соответствующих местах их размещения в облучениях № 1 и № 2 восстановлены спектры нейтронов в соответствии с МИ 2804-2003 [3] (использован метод расчета спектра).

Согласно МИ 2804-2003 [3] при восстановлении спектра по результатам измерений с интегральными активационными детекторами, отличающимися спектральной чувствительностью к нейтронному излучению, реализуется итерационная процедура, использующая метод минимизации направленного расхождения. В связи с некорректностью математической задачи по нахождению спектрального решения результат восстановления спектра чувствителен к выбору начального («нулевого») приближения.

В качестве «нулевого приближения» спектра нейтронов при его восстановлении использовалось спектральное распределение поля нейтронов, полученное расчетно по программе С-95 [4], реализующей метод Монте-Карло для задач переноса ионизирующего излучения.

Для расчетов по программе С-95 использовалась упрощенная модель установки БИГР, состоящая из трех основных частей: неподвижной части, блока грубой регулировки и блока точной регулировки. В первом случае (для облучения № 1) в описанной модели отсутствует стальная пробка, во втором случае (для облучения № 2) – добавлена графитовая пробка. Отсутствие в первом случае стальной пробки в модели основано на предположении ее минимального влияния на нейтронное поле. Обоснованиями этому слу-

Активационные интегралы реакции $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$

№ п/п	Облучение № 1			Облучение № 2		
	обознач. детектора	положение отн. верхней повер-ти пробки, мм	активац. интеграл, реакций/ядро	обознач. детектора	положение отн. верхней повер-ти пробки, мм	активац. интеграл, реакций/ядро
1	«1»*	655	$7,75 \cdot 10^{-11}$	1	655	$4,82 \cdot 10^{-11}$
2	1	605	$1,12 \cdot 10^{-10}$	2	605	$6,84 \cdot 10^{-11}$
3	2	555	$1,50 \cdot 10^{-10}$	3	555	$9,15 \cdot 10^{-11}$
4	3	505	$1,86 \cdot 10^{-10}$	4	505	$1,12 \cdot 10^{-10}$
5	4	455	$2,18 \cdot 10^{-10}$	5	455	$1,28 \cdot 10^{-10}$
6	5	405	$2,40 \cdot 10^{-10}$	6	405	$1,40 \cdot 10^{-10}$
7	6	355	$2,51 \cdot 10^{-10}$	7	355	$1,47 \cdot 10^{-10}$
8	7	305	$2,58 \cdot 10^{-10}$	8	305	$1,46 \cdot 10^{-10}$
9	8	255	$2,51 \cdot 10^{-10}$	9	255	$1,42 \cdot 10^{-10}$
10	9	205	$2,38 \cdot 10^{-10}$	10	205	$1,36 \cdot 10^{-10}$
11	10	155	$2,15 \cdot 10^{-10}$	11	155	$1,24 \cdot 10^{-10}$
12	11	105	$1,88 \cdot 10^{-10}$	12	105	$1,08 \cdot 10^{-10}$
13	12	55	$1,56 \cdot 10^{-10}$	13	55	$9,15 \cdot 10^{-11}$
14	13	5	$1,19 \cdot 10^{-10}$	14	5	$7,18 \cdot 10^{-11}$
15	14	-30	$6,66 \cdot 10^{-11}$	–	–	–
16	15	-80	$5,70 \cdot 10^{-11}$	–	–	–
17	«2»*	-125	$4,55 \cdot 10^{-11}$	–	–	–
18	16	-180	$3,30 \cdot 10^{-11}$	15	-195	$1,01 \cdot 10^{-11}$
19	17	-230	$2,49 \cdot 10^{-11}$	«3»*	-230	$1,08 \cdot 10^{-11}$
20	18	-280	$1,96 \cdot 10^{-11}$	16	-280	$9,60 \cdot 10^{-12}$
21	19	-330	$1,57 \cdot 10^{-11}$	17	-330	$7,82 \cdot 10^{-12}$

* – обозначение детектора из никеля, соответствующего номеру активационного набора.

Таблица 3

Активационные интегралы реакций в детекторах из наборов № 1–№ 3

№ п/п	Реакция	Активационный интеграл, реакций/ядро		
		облучение № 1		облучение № 2
		набор № 1	набор № 2	набор № 3
1	$^{115}\text{In}(n, n)^{115m}\text{In}$	$2,05 \cdot 10^{-10}$	$1,23 \cdot 10^{-10}$	$3,05 \cdot 10^{-11}$
2	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	$3,81 \cdot 10^{-13}$	$2,20 \cdot 10^{-13}$	$4,85 \cdot 10^{-14}$
3	$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92}\text{Nb}$	$2,42 \cdot 10^{-13}$	$1,42 \cdot 10^{-13}$	$3,40 \cdot 10^{-14}$
4	$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	$7,75 \cdot 10^{-11}$	$4,55 \cdot 10^{-11}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$
5	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	$2,23 \cdot 10^{-10}$	$1,27 \cdot 10^{-10}$	$4,40 \cdot 10^{-11}$
6	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	$2,73 \cdot 10^{-9}$	$1,97 \cdot 10^{-9}$	$1,01 \cdot 10^{-9}$
7	$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$ (в кадмиевом экране)	$2,10 \cdot 10^{-10}$	$1,25 \cdot 10^{-10}$	$4,35 \cdot 10^{-11}$
8	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ (в кадмиевом экране)	$2,69 \cdot 10^{-9}$	$1,93 \cdot 10^{-9}$	$9,86 \cdot 10^{-10}$

жат как наличие в стальной пробке двух сквозных технологических отверстий (составляют до ~40 % от всего ее объема), так и ее небольшая толщина (25 мм).

На рис. 5–7 приведены расчетные («нулевые приближения») и восстановленные спектры нейтронов. В табл. 4 приведены полученные результаты определения интегральных характеристик восстановленных спектров нейтронов (полного и с энергией

выше 0,1 МэВ флюенсов нейтронов, доля нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ и средняя энергия нейтронов).

Погрешность восстановленных спектров нейтронов оценивалась с применением метода статистических испытаний и рассматривалась как функция неопределенности исходных данных, используемых в процедуре восстановления: интегральных откликов

и сечений реакций активации [3]. Погрешность значе- ний флюенса нейтронов оценена величиной $\sim 16\%$, средней энергии – $\sim 9\%$, доли нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ – $\sim 17\%$.

Значения полного и парциального (с энергией выше 0,1 МэВ) флюенсов нейтронов для трех иссле- дуемых областей облучения ЦК, нормированные на энерговыделение в АЗ, равное 280 МДж, пред- ставлены в табл. 5. Дополнительно в табл. 5 приве- дены значения флюенса нейтронов из статьи [2], а также полученные оценки значений флюенса ней- тронов в области под стальной пробкой КЦК на раз- ных высотах ЦК (для положений – 30 мм и – 330 мм относительно верхней поверхности пробки), норми- рованные на 280 МДж. Оценки значений флюенса нейтронов в области под стальной пробкой КЦК оп- ределены по результатам измерений детекторов из никеля в предположении незначительного измене- ния спектра нейтронов. Все значения флюенсов в табл. 5 приведены в порядке их возрастания.

Заключение

В настоящей работе проводилось эксперимен- тально-расчетное исследование характеристик ней- тронного поля в ЦК реактора БИГР. Получены инте- гральные характеристики нейтронного поля для трехобластей облучения в ЦК. Результаты работы могут быть использованы для планирования и опти- мизации постановки облучательных экспериментов на реакторе БИГР.

Результаты проделанной работы при сопостав- лении с непрерывающимся диапазоном по полно- му и парциальному (с энергией выше 0,1 МэВ) флю- енсам нейтронов из статьи [2] (см. табл. 5 и рис. 8) показывают, что для уменьшения данного диапазона могут использоваться следующие области облучения в ЦК:

– в верхней части внутреннего объема КЦК, где определено уменьшение флюенса нейтронов

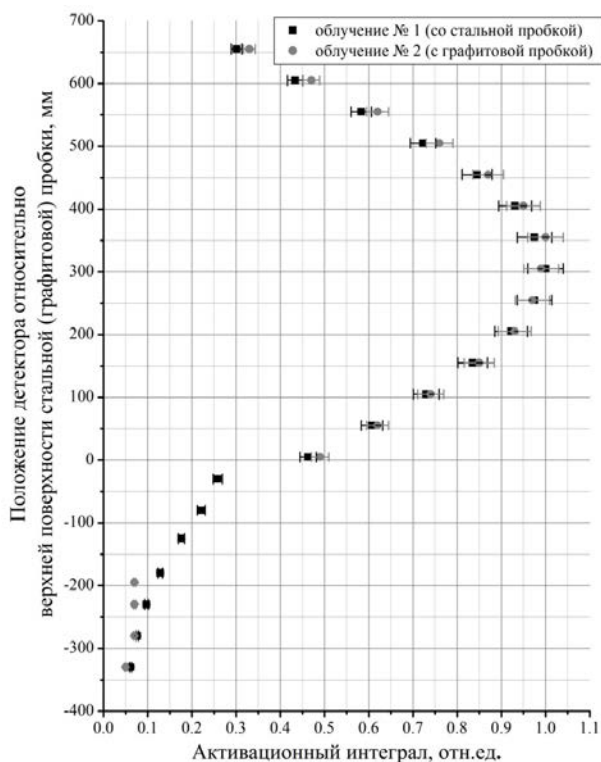


Рис. 4. Нормированные распределения активации детекторов из никеля по высоте ЦК

Таблица 4

Результаты определения интегральных характеристик восстановленных спектров нейтронов

№ облу- чения	Энерго- выделение, МДж	Положение отн. верхней повер- ти пробки, мм	Полный флюенс н-нов, 10^{15} см^{-2}	Флюенс н-нов с энергией выше 0,1 МэВ, 10^{15} см^{-2}	Доля н-нов с энергией выше 0,1 МэВ	Средняя энергия н-нов, МэВ
1	287	655	3,5	2,4	0,69	0,72
		–125	2,2	1,5	0,69	0,70
2	166	–230	0,51	0,35	0,69	0,73

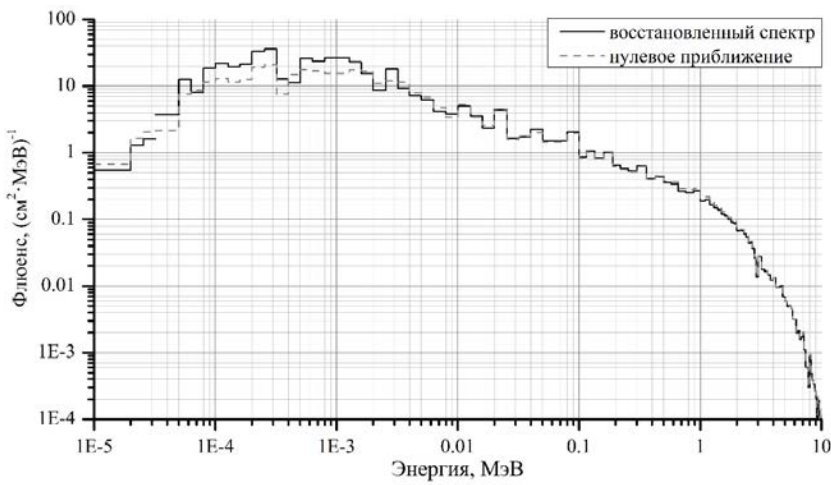


Рис. 5. Расчетный («нулевое приближение») и восстановленный спектры нейтронов для положения 655 мм относительно верхней поверхности пробки (облучение № 1)

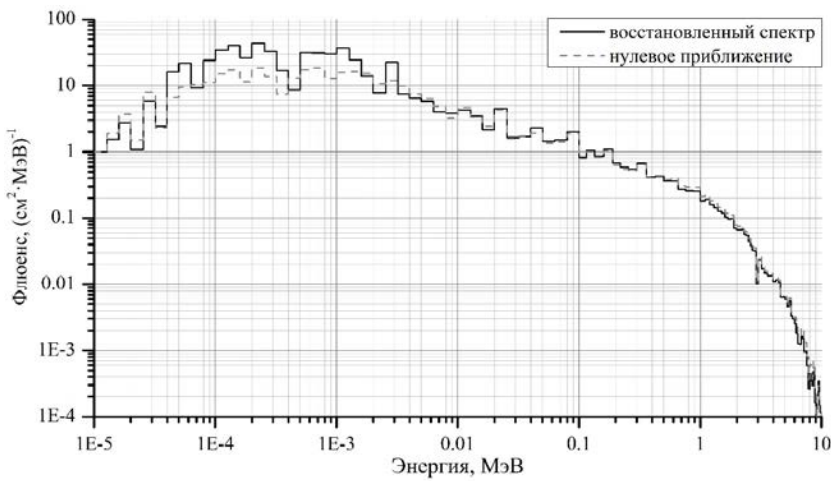


Рис. 6. Расчетный («нулевое приближение») и восстановленный спектры нейтронов для положения – 125 мм относительно верхней поверхности пробки (облучение № 1)

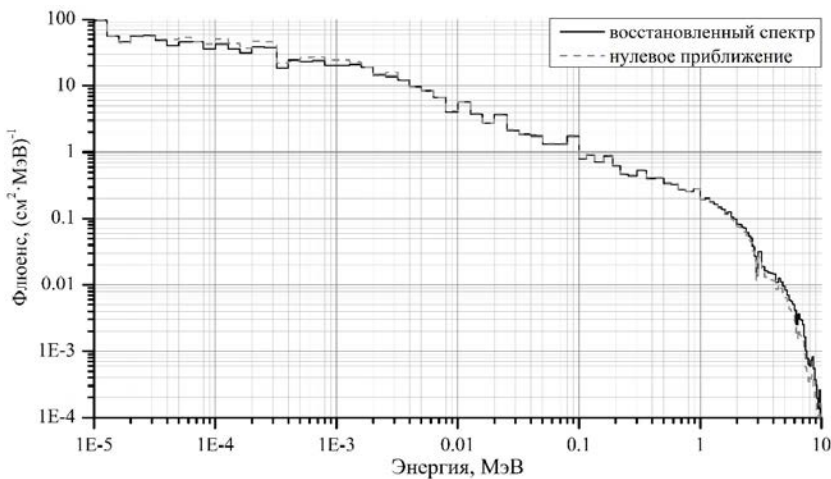


Рис. 7. Расчетный («нулевое приближение») и восстановленный спектры нейтронов для положения – 230 мм относительно верхней поверхности пробки (облучение № 2)

в ~ 3 раза относительно максимума распределения флюенса по высоте КЦК (в сравнении с нижней ча-

стью внутреннего объема КЦК, где наблюдается спад в ~ 2 раза);

Значения флюенсов нейтронов, нормированные на 280 МДж

№ п/п	Облучательная позиция	Полный флюенс нейтронов, 10^{15} см^{-2}	Флюенс нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ, 10^{15} см^{-2}
1	положение – 330 мм относительно верхней поверхности стальной пробки	0,75*	0,51*
2	положение – 230 мм относительно верхней поверхности графитовой пробки	0,86	0,58
3	на боковой поверхности АЗ (из статьи [2])	~ 1	~ 0,75
4	положение – 125 мм относительно верхней поверхности стальной пробки	2,2	1,5
5	положение – 30 мм относительно верхней поверхности стальной пробки	3,2*	2,2*
6	положение 655 мм относительно верхней поверхности стальной пробки	3,4	2,4
7	нижняя часть внутреннего объема КЦК (из статьи [2])	~ 5	~ 3,5

* – результат оценки по измерениям детекторов из никеля

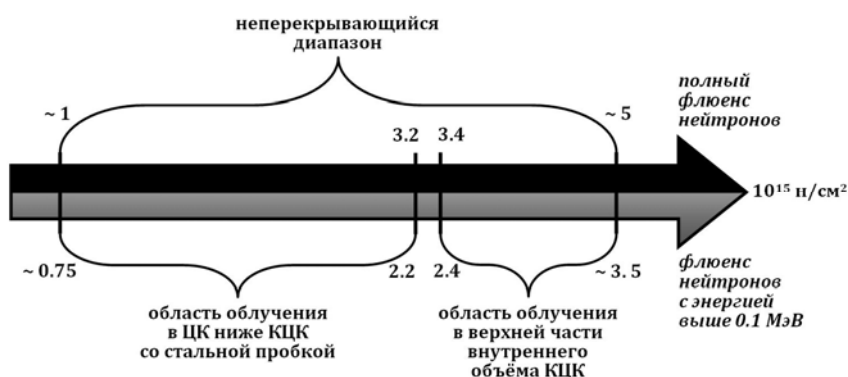


Рис. 8. Схематичное представление возможностей уменьшения неперекрывающегося диапазона флюенса нейтронов

– в ЦК ниже КЦК при использовании в качестве нижней конструкционной части КЦК стальной пробки (область ниже графитовой пробки не имеет практической значимости, т. к. значение флюенса нейтронов в ней ниже, чем на облучательной позиции у боковой поверхности АЗ).

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Апериодические импульсные реакторы. Монография в 2 т. Изд. 2-е, перераб. и доп. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007.
2. Кувшинов М. И., Смирнов И. Г., Богданов В. Н. Возмущение реактивности и плотности деления в активной зоне образцами, размещенными

в центральном канале реактора БИГР // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1989. Вып. 4. С. 18–24.

3. МИ 2804-2003. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Характеристики реакторных нейтронных полей. Метод расчета спектра нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами». Утв. ГНМЦ «ВНИИФТРИ» Госстандарта России 19.03.2003, зарегистрирована «ВНИИМС» 07.07.2003.

4. Кочубей Ю. К., Жигник А. К., Артемьева Е. В. и др. Программа С-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и γ -квантов методом Монте-Карло // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 2. С. 49–52.