

## ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СПОСОБА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЕЙ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА БИГР НА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ

*Кузнецов Виталий Андреевич, Силаев Алексей Васильевич, Данченко Николай Григорьевич,  
Тетереваков Артем Викторович, Дорошчук София Игоревна, Бартев Никита Олегович,  
Пичугин Андрей Михайлович, Жирнов Александр Васильевич,  
Кожевников Константин Владимирович, Калмыков Михаил Алексеевич*

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

Описан расчетно-экспериментальный способ прогнозирования уровней воздействия гамма-нейтронного излучения ядерного реактора БИГР на поверхности габаритных объектов с неизвестной внутренней структурой. Способ основан на проведении расчетов методом Монте-Карло, откалиброванных на экспериментальные данные.

Рассмотрены варианты постановки эксперимента при стационарном воздействии ядерного реактора БИГР при вращении объекта и без вращения во время воздействия. Проведен эксперимент, верифицирующий расчетную модель по набору экспериментальных данных – уровней экспозиционной дозы и флюенса нейтронов с энергией более 0,1 МэВ на поверхности объекта от воздействия ядерного реактора БИГР.

**Ключевые слова:** гамма-нейтронное излучение, ядерный реактор, метод Монте-Карло, неравномерность воздействия.

## VERIFICATION OF EXPERIMENT-CALCULATED METHOD OF PREDICTING RADIATION EXPOSURE LEVELS OF RESEARCH NUCLEAR REACTOR BIGR ON THE OBJECT SURFACES DURING TESTING

*Kuznetsov Vitalij Andreevich, Silaev Aleksey Vasilievich, Danchenko Nikolaj Grigorievich,  
Teterevkov Artyom Viktorovich, Doroshchuk Sofia Igorevna, Bartev Nikita Olegovich,  
Pichugin Andrej Mikhailovich, Zhirnov Aleksandr Vasilievich,  
Kozhevnikov Konstantin Vladimirovich, Kalmykov Mikhail Alekseevich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

There is described an experiment-calculated method of predicting exposure gamma-neutron radiation levels of reactor BIGR on the surfaces of properly sized objects of unknown structure. The method is based using Monte Carlo method, (the calculations being) calibrated with experimental data.

There are considered the versions of experiment setup under stationary effect of nuclear reactor BIGR at the object rotation or without it during the effect. There was performed the experiment verifying the calculation model on the base of a set of experimental data – levels of exposure dose and neutron fluence with the energy more than 0,1 MeV on the object surface caused by nuclear reactor BIGR effect.

**Key words:** gamma-neutron radiation, nuclear reactor, Monte-Carlo method, non-uniform effect.

### Введение

Ядерные реакторы исследовательского типа являются мощными источниками гамма-нейтронного

излучения, поэтому их широко используют для проведения испытаний радиационной стойкости. Экспериментально-испытательная база РФЯЦ-ВНИИЭФ включает в себя несколько таких установок, одной из

которых является ядерный реактор БИГР. Апериодический импульсный ядерный реактор БИГР является мощным источником  $n$ - $\gamma$  излучения с возможностью функционирования в импульсном, квазиимпульсном и стационарном режимах [1].

Проведение испытаний радиационной стойкости габаритных объектов сопряжено с рядом проблем. В соответствии с существующей нормативно-технической документацией допустимая неравномерность воздействия по поверхности объекта испытаний не должна превышать 30 %. Поэтому способ прогнозирования уровней воздействия по поверхности объекта является важным инструментом для выбора оптимальной редакции эксперимента с целью выполнения данного требования.

### Калибровка расчетной модели

Расчетно-экспериментальный способ оценки распределения поглощенной дозы в объекте и прогнозирования уровней воздействия по поверхности объекта основан на численном моделировании радиационного воздействия методом Монте-Карло [2–4].

Создана расчетная модель в соответствии с проведенным экспериментом, которая учитывает трехмерную геометрию редакции эксперимента, спектрально-энергетические и угловые распределения излучений активной зоны реактора (далее по тексту АЗ), габаритно-массовые характеристики объекта и  $n$ - $\gamma$  конвертора. Для проведения расчетов необходимо знать не только габаритно-массовые характеристики объектов, используемых в расчетной модели, но и их химические составы. В большинстве случаев при проведении испытаний аппаратуры отсутствует детальная информация, как о внутренней структуре, так и о химическом составе объекта. В этой ситуации объект испытаний представляет собой «черный ящик», что существенно усложняет расчет и обеспечение необходимого радиационного воздействия испытательной установки.

В настоящей работе внутренняя структура объекта испытаний моделировалась в виде гомогенного состава, включающего в себя химические элементы, характерные для современной радиоэлектронной

аппаратуры. Плотность состава определялась на основании габаритно-массовых характеристик изделия.

Плотная упаковка потенциально чувствительной к радиации электроники позволяет в качестве чувствительной области выделить всю внутреннюю часть объекта испытаний, за исключением его корпуса. Для установления соответствия между результатами расчета и экспериментальными данными для чувствительной области изделия подобран эффективный химический состав.

Эффективный химический состав является абстракцией расчетной модели и представляет собой эквивалент реальному химическому составу объекта по рассматриваемому явлению (в данном случае по радиационному воздействию). Подбор эффективного химического состава по результатам экспериментальных данных позволяет проводить оценку дозового воздействия на объект даже при отсутствующей детальной информации о его реальном химическом составе.

Подбор эффективного химического состава проводился по критерию соответствия экспериментальных данных и результатов, полученных с использованием только нейтронной компоненты источника в предложенной расчетной модели.

После подбора эффективного химического состава для учета соотношения  $D_{\text{эксп}}$  и  $\Phi_{E>0,1}$  для точек расположения детекторов (рис. 1), а также установления соответствия между расчетными и измеренными уровнями воздействия по их абсолютному значению, проведена калибровка параметров расчетной модели (рис. 2).

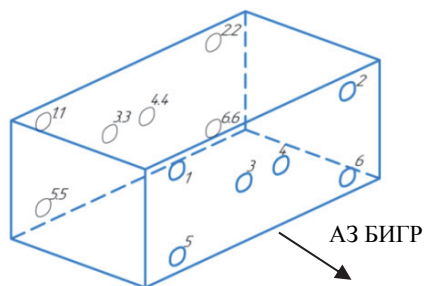


Рис. 1. Расположение детекторов на поверхности объекта

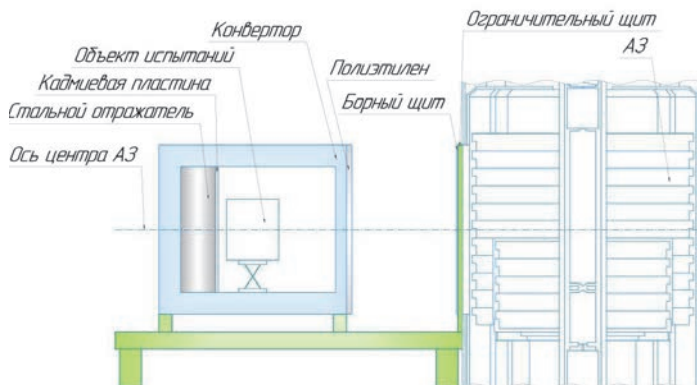


Рис. 2. Редакция эксперимента для проведения калибровки

Калибровочными параметрами расчетной модели являются  $\gamma$ - $n$  соотношение ( $Q_{ист}$ ) и коэффициент интенсивности ( $I_{ист}$ ) источника воздействия. Соотношение  $\gamma$ - $n$  источника показывает отношение вероятности рождения фотона к вероятности рождения нейтрона на модельном источнике излучений. Коэффициент интенсивности модельного источника представляет собой весовой множитель для расчетных значений уровней воздействия.

Для определения калибровочных параметров проведен предварительный расчет с учетом образования фотонов от нейтронного воздействия и образования нейтронов от фотонного воздействия. Для такого расчета в качестве начальных значений  $\gamma$ - $n$  соотношения ( $Q'_{ист}$ ) и коэффициента интенсивности ( $I'_{ист}$ ) приняты единичные значения. По результатам предварительного расчета найдены калибровочные параметры в соответствии с выражениями (1) – (2):

$$Q_{ист} = Q'_{ист} \frac{\Phi_{E>0,1 \text{ расч}}}{D_{экс \text{ расч}}} \frac{D_{экс \text{ расч}}}{\Phi_{E>0,1}}, \quad (1)$$

$$I_{ист} = I'_{ист} \frac{\Phi_{E>0,1}}{\Phi_{E>0,1 \text{ расч}}}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{E>0,1 \text{ расч}}$ ,  $D_{экс \text{ расч}}$  – расчетные значения флюенса нейтронов с энергией более 0,1 МэВ и экспозиционной дозы гамма-излучения соответственно;

$\Phi_{E>0,1}$ ,  $D_{экс \text{ расч}}$  – экспериментальные значения флюенса нейтронов с энергией более 0,1 МэВ и экспозиционной дозы гамма-излучения соответственно.

Результаты определения параметров расчетной модели:  $Q_{ист} = 1,6 \pm 0,1$ ;  $I_{ист} = (1,4 \pm 0,2) \cdot 10^{19}$ . Подробнее калибровка расчетной модели и результаты оценки распределения поглощенной дозы в объекте представлены в докладе на конференции Стойкость-2022 г. Лыткарино. Для определения уровня экспозиционной дозы применялись детекторы стеклянные твердотельные ДТС-0,01/1,0, а для определения флюенса нейтронов с энергией более 0,1 МэВ – кремниевые транзисторы типа 2Т301Ж.

### Результаты прогнозирования уровней гамма-нейтронного воздействия по поверхности объекта при использовании опорно-поворотного устройства

Прогнозирование уровней гамма-нейтронного воздействия проведено с применением опорно-поворотного устройства (ОПУ), режим которого предполагает поворот объекта на  $180^\circ$  через равные промежутки времени. Объект помещается в  $n$ - $\gamma$  конвертор и устанавливается на ОПУ. Расстояние от передней стенки конвертора до корпуса реактора составляет  $\sim 32$  см. Редакция расчетной модели с применением ОПУ показана на рис. 3.

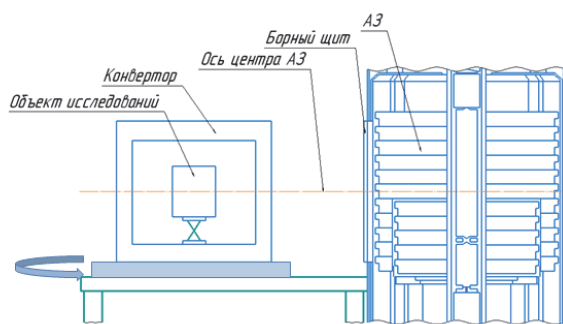


Рис. 3. Редакция расчетной модели с применением ОПУ

Расчет проведен в предположении, что мощность и время воздействия ядерного реактора БИГР соответствуют значениям, полученным при проведении калибровочного эксперимента. Коэффициент интенсивности может уточняться для других значений мощности и времени воздействия ядерного реактора. Результаты прогнозирования экспозиционной дозы и флюенса нейтронов с энергией более 0,1 МэВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные уровни гамма-нейтронного воздействия на поверхности объекта

№ детектора	$D_{экс \text{ расч}}$ , кР	$\Phi_{E>0,1}$ , $10^{13} \text{ см}^{-2}$
1	59,04	4,46
2	58,71	4,53
3	62,53	5,09
4	62,98	5,13
5	59,13	4,48
6	59,02	4,49
1.1	59,04	4,46
2.2	58,71	4,53
3.3	62,53	5,09
4.4	62,98	5,13
5.5	59,13	4,48
6.6	59,02	4,49

### Верификация расчетно-экспериментального способа

Проведен эксперимент для верификации результатов прогнозирования уровней гамма-нейтронного воздействия. Эксперимент проводился в течение 5 ч, через 2 ч 30 мин от начала воздействия конвертор с объектом поворачивался при помощи ОПУ на  $180^\circ$ .

Так как время и мощность воздействия ядерного реактора БИГР не соответствовали калибровочному эксперименту, то проведен пересчет коэффициента интенсивности:  $I_{ист} = (5,2 \pm 0,2) \cdot 10^{18}$ . Результаты прогноза и верификации уровней экспозиционной дозы и флюенса нейтронов с энергией более 0,1 МэВ с учетом полученного коэффициента интенсивности приведены в табл. 2.

Расчетные и экспериментальные значения уровней гамма-нейтронного воздействия на поверхности объекта с применением ОПУ

№ детектора	Результаты прогнозирования		Результаты верификационного эксперимента		Отклонения прогнозируемых значений от экспериментальных	
	$D_{\text{эксп}}$ , кР	$\Phi_{E>0,1}$ , $10^{13}$ см <sup>-2</sup>	$D_{\text{эксп}}$ , кР	$\Phi_{E>0,1}$ , $10^{13}$ см <sup>-2</sup>	$D_{\text{эксп}}$ , %	$\Phi_{E>0,1}$ , %
1	21,19	1,60	22,9	1,74	7,5	8,1
2	21,07	1,62	22,4	1,52	5,9	6,9
3	22,44	1,83	21,9	1,70	2,5	7,5
4	22,60	1,84	21,7	1,70	4,2	8,4
5	21,22	1,61	24,5	1,69	13,4	5,0
6	21,18	1,61	24,3	1,76	12,8	8,4
1.1	21,19	1,60	22,1	1,59	4,1	0,6
2.2	21,07	1,62	23,2	1,56	9,2	4,1
3.3	22,44	1,83	21,2	1,77	5,9	3,2
4.4	22,60	1,84	21,7	1,65	4,2	11,6
5.5	21,22	1,61	23,5	1,70	9,7	5,5
6.6	21,18	1,61	25,0	1,76	15,3	8,4

Из табл. 2 видно, что отклонения прогнозируемых значений от экспериментальных данных находятся в пределах погрешности измерений уровней экспозиционной дозы и флюенса нейтронов с энергией более 0,1 МэВ (15 % и 18 % соответственно).

### Заключение

Проведен эксперимент, верифицирующий результаты расчетов ранее разработанной и откалиброванной расчетной модели. Максимальное отклонение прогнозируемых уровней гамма-нейтронного воздействия ядерного реактора БИГР в точках расположения детекторов не превышает погрешности измерений. Сходимость расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о корректности и адекватности расчетной модели.

Апробирован способ прогнозирования уровней гамма-нейтронного воздействия по поверхности объекта. Предложенный расчетно-экспериментальный подход, учитывает эффективный химический состав и позволяет проводить оценку распределения поглощенной дозы в габаритном объекте с неизвестной внутренней структурой.

### Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. Саров: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 1999. С. 1032.
2. 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. Менделеево: «ВНИИФТРИ», 2007. С. 654.
3. Кошелев А. С., Хоружий В. Х. Спектральные характеристики гамма-полей реакторных установок ВНИИЭФ // ВАНТ Физика ядерных реакторов, 2013. Вып. 3. С. 65–82.
4. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П., Горбунов А. В., Завьялов А. Н., Иванов Н. В., Малькин А. Г., Рослов В. И., Семенова Т. В., Субботин А. Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ СМК № 2011610500. Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научный исследовательский институт экспериментальной физики «ВНИИЭФ» // Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11 января 2011 г.