

## МОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРИ РАСЧЕТНОМ СОПРОВОЖДЕНИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

И. Ю. Дроздов, П. В. Устюжанин

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

Статья поступила в редакцию 06.06.2019, после доработки – 17.09.2019, принята к публикации – 04.10.2019

В работе представлены верифицированные по набору экспериментальных данных расчетные модели реакторных установок Института ядерной и радиационной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ). Использование данных моделей позволило получить необходимую априорную информацию о нейтронных спектрах для задач диагностики нейтронных полей активационными методами. Показана возможность использования расчетных моделей для планирования облучательных экспериментов.

**Ключевые слова:** ядерно-физическая установка, метод Монте-Карло, активационный интеграл, энергетический спектр нейтронов, доза гамма-излучения, планирование эксперимента.

**MODEL DESCRIPTION OF PULSED REACTORS USED AT CALCULATION ACCOMPANIMENT OF IRRADIATION EXPERIMENTS / I. Yu. DROZDOV, P. V. USTUZHANIN //** The computational models of reactor facilities in the Institute of Nuclear and Radiation Physics (RFNC-VNIIEF) verified by experimental data are presented in the paper. The usage of these models allowed getting a priori information on neutron spectra essential for neutron field diagnostics with the aid of activation methods. The possibility of using computational models for irradiation experiments planning is shown.

**Key words:** nuclear-physics facility, Monte-Carlo method, activation integral, energy spectrum of neutrons, gamma-radiation dose, experiment planning.

### Введение

При проведении трудоемких и дорогостоящих экспериментов на ядерно-физических установках важная роль отводится этапу планирования эксперимента. В процессе планирования определяются диапазон изменения измеряемых величин и их предполагаемые погрешности. Расчетное моделирование ядерно-физических установок позволяет воспроизводить рабочие условия эксперимента и дает возможность рассчитывать значения измеряемых величин в различных редакциях эксперимента. Такой подход позволяет выбрать оптимальную конфигурацию системы «источник

излучения – облучаемый объект», а также учесть влияние объекта облучения как отражателя на реактивность активной зоны (АЗ) и появление зон локальных перегревов в топливном материале.

Для диагностики нейтронного поля в облучательных экспериментах в ИЯРФ используется активационный метод. Исследуются как пространственное, так и энергетическое распределения нейтронов. Определение энергетического спектра нейтронов осуществляется с использованием набора нейтронно-активационных детекторов (интегральных детекторов) с различными рабочими реакциями типа  $(n, n')$ ,  $(n, a)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, \gamma)$  и  $(n, f)$ . По из-

меренной наведенной активности в детекторах определяются активационные (делительные) интегралы. По набору значений активационных интегралов и известным энергетическим зависимостям сечений реакций с использованием программы КАСКАД [1] определяется спектр нейтронов. В такой постановке задача о нахождении нейтронного спектра является некорректной и требует до определения в виде априорной информации о нейтронном спектре нулевого приближения. Наиболее физически обоснованным нулевым приближением является результат расчета нейтронного спектра по методу Монте-Карло при условии проведения расчетов на верифицированных расчетных моделях.

Вышеперечисленные положения обуславливают необходимость создания и верификации расчетных моделей для всех используемых в облучательных экспериментах реакторов ИЯРФ: ГИР-2М (гамма-источник реакторный), БИГР (быстрый импульсный графитовый реактор), ВИР-2М (водный импульсный реактор), БР-1М (бустер-реактор) и БР-К1 (бустер-реактор каскадный) [2].

### Создание расчетных моделей ядерно-физических установок

Краткие характеристики АЗ ядерно-физических установок ИЯРФ приведены в табл. 1.

Моделирование проводилось по методу Монте-Карло в кодах программы TART 2016 [3].

Созданные модели проходили верификацию по ряду параметров:

- влияние на реактивность элементов АЗ реакторов: органов регулирования реактивности (ОРР) и технологического оборудования – «физический вес»;
- энергетический спектр нейтронов внутри и снаружи АЗ;
- относительные пространственные распределения полного флюенса нейтронов внутри и снаружи АЗ;
- поглощенная доза в воздухе и активационные интегралы для ряда используемых в экспериментах реакций.

Моделировались также элементы конструкций реакторного помещения: пол, стены, потолок, биологическая защита, детекторы нейтронов и др. технологическое оборудование (на рис. 1–5 они не отображены). Иллюстративно расчетные модели реакторов показаны на рис. 1–5. Частично результаты верификации приведены в табл. 2–11. Погрешность измеренных значений активационных интегралов не превышает 4 % при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 1

Краткие характеристики реакторов

Характеристика	Реактор				
	ВИР-2М	БИГР	БР-1М	ГИР-2	БР-К1*
Материал АЗ	UO <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	UO <sub>2</sub> + C	U + 10 % Мо	U + 9 % Мо	U + 9 % Мо
Масса топлива, кг	7,1 (104 л)	833	173	178	1511
Размеры АЗ, см	∅ 55×63	∅ 76×67	∅ 27×27	∅ 30	∅ 62×75
Полость для облучения, мм	∅ 142, ∅ 300	∅ 100	∅ 100	–	∅ 308×360
Максимальное энерговыделение в импульсе, МДж	60	280	11	7	–
Ширина импульса на полувысоте, мкс	2650	2000	70	300	–

\* В настоящее время используется для облучений в статическом режиме.

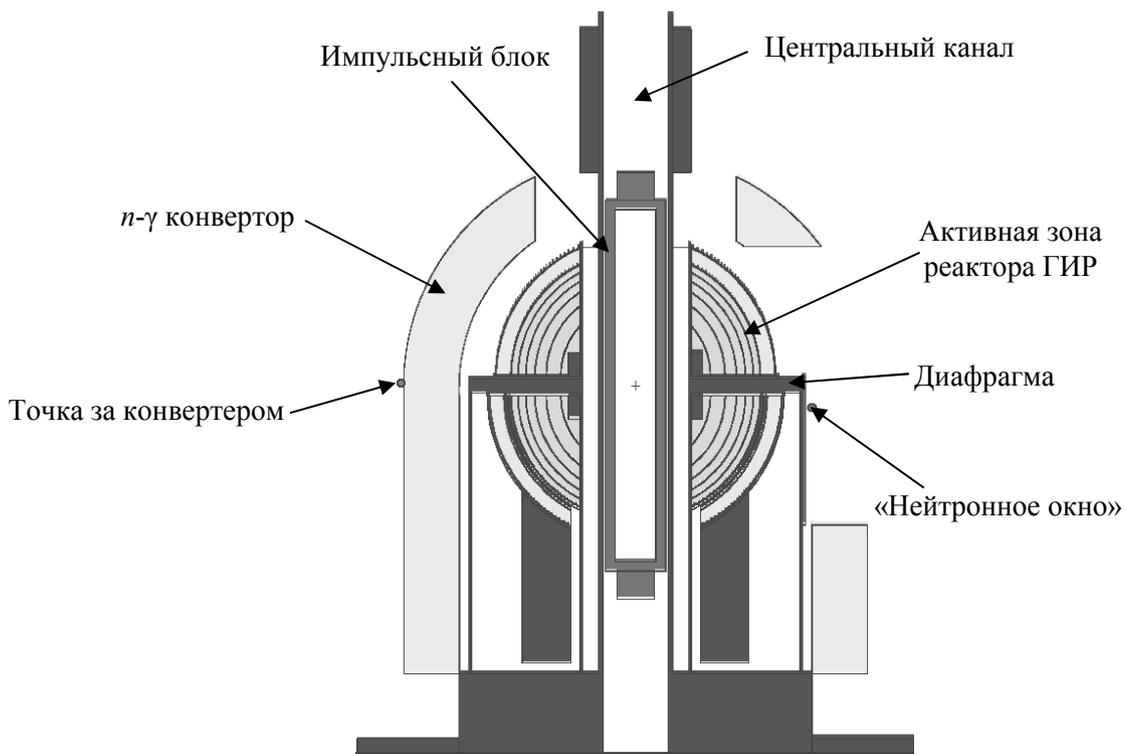


Рис. 1. Модельное представление АЗ ГИР-2 (фрагмент)

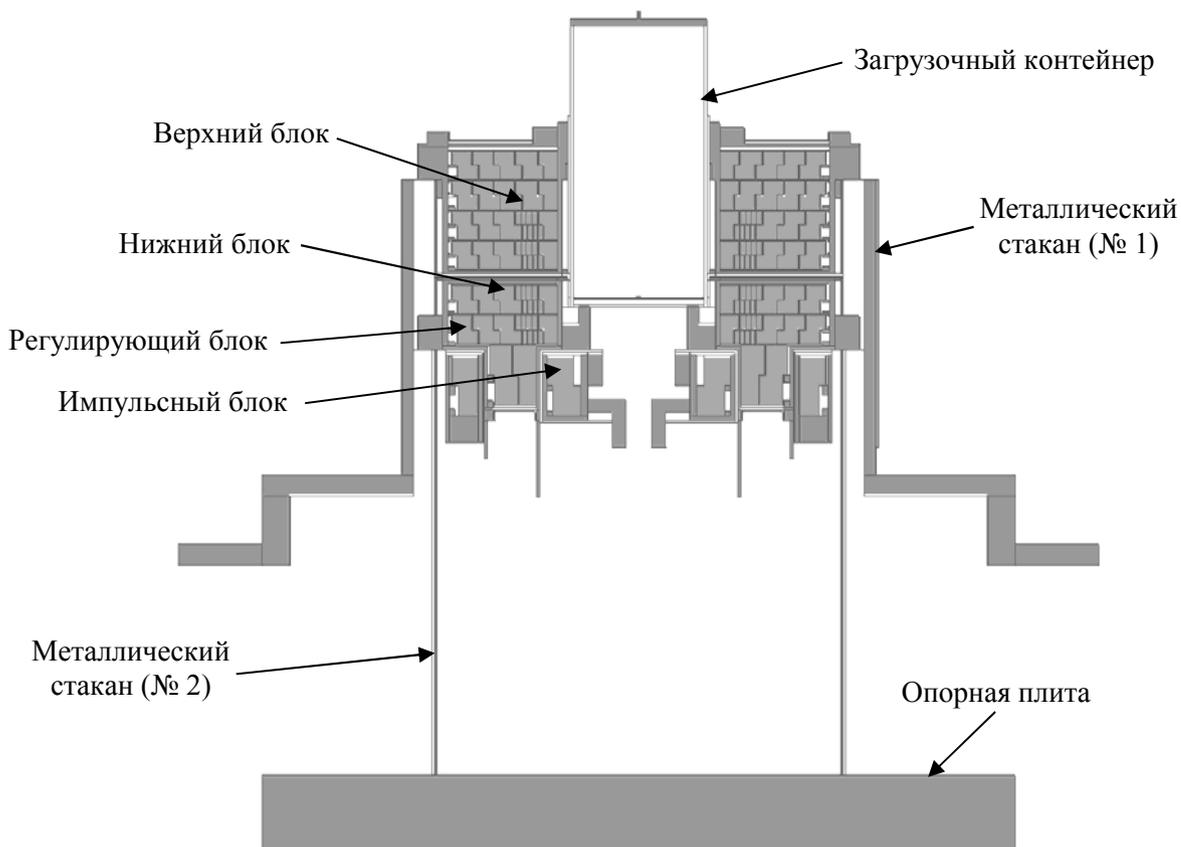


Рис. 2. Модельное представление АЗ БР-1М (фрагмент)

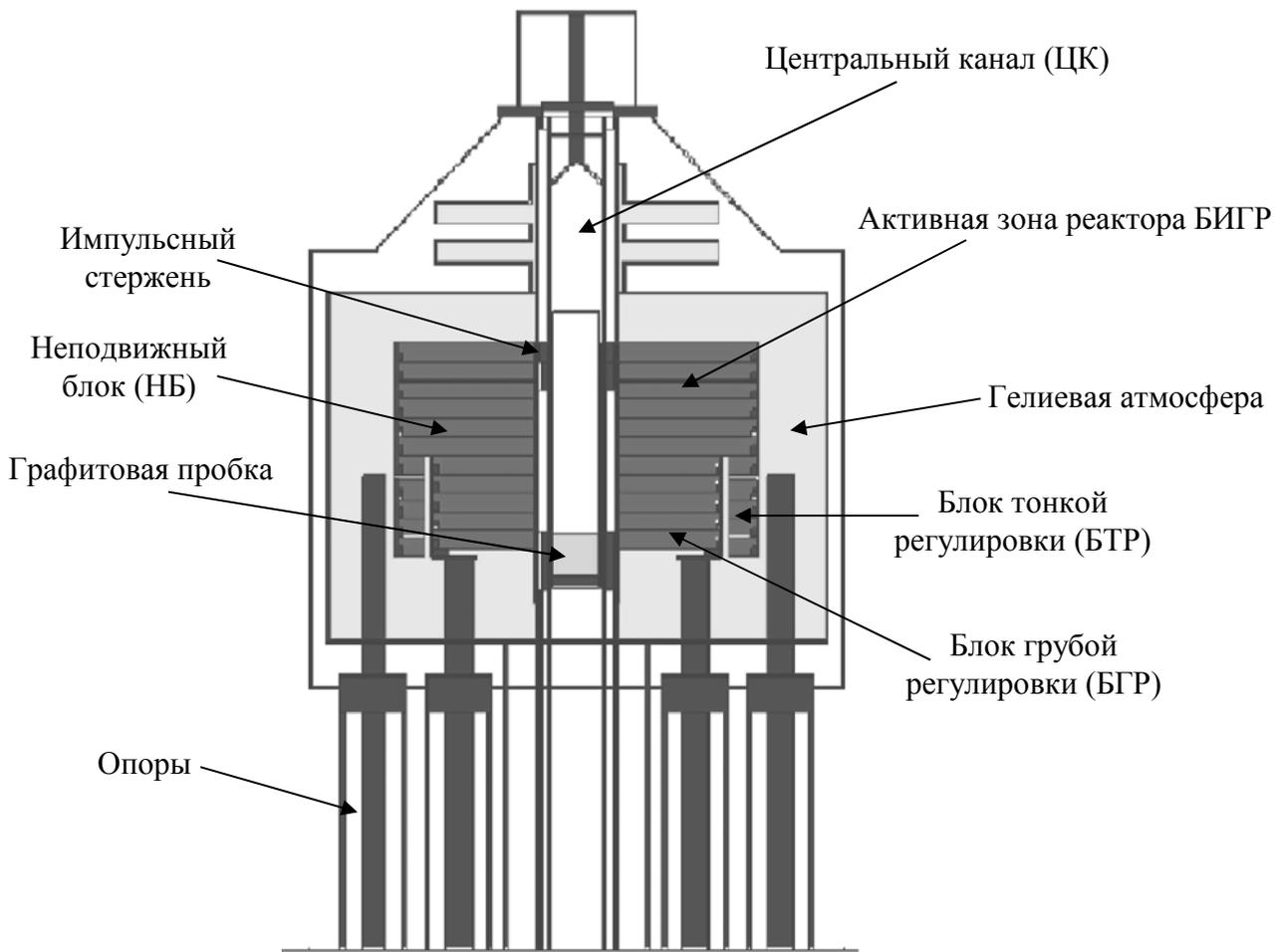


Рис. 3. Модельное представление АЗ БИГР (фрагмент)

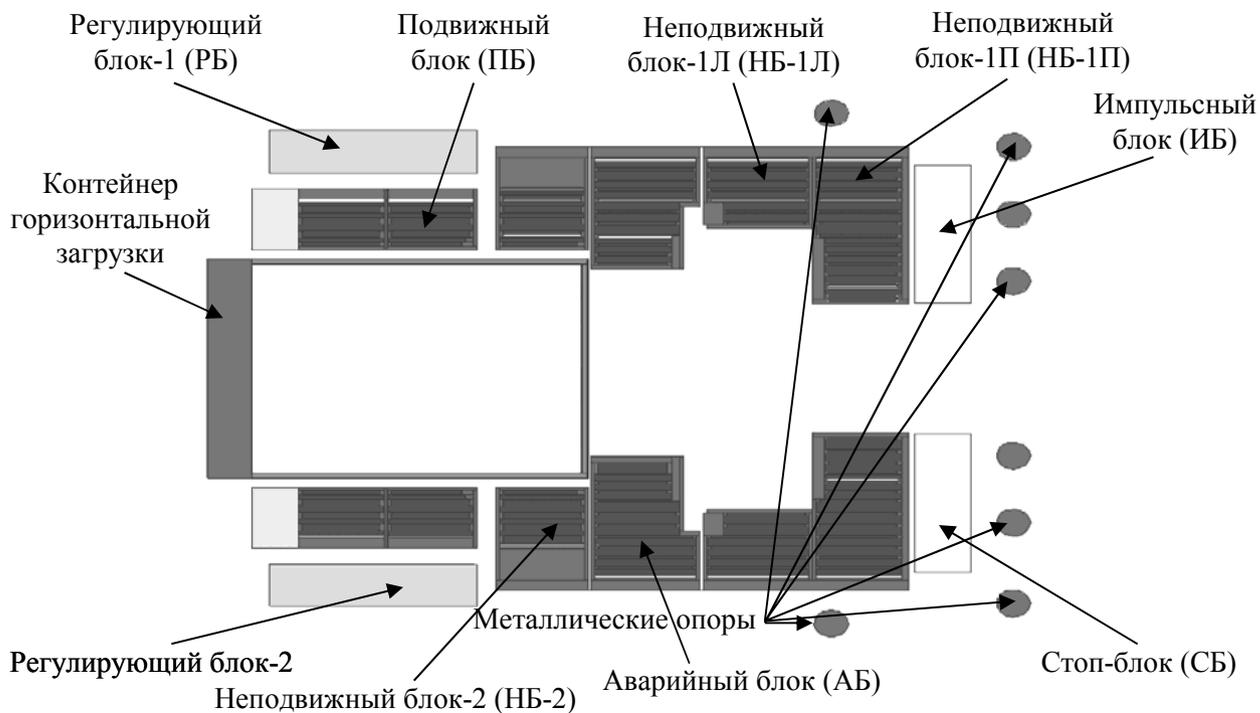


Рис. 4. Расчетная модель реактора БР-К1 в осевом разрезе, вид сверху

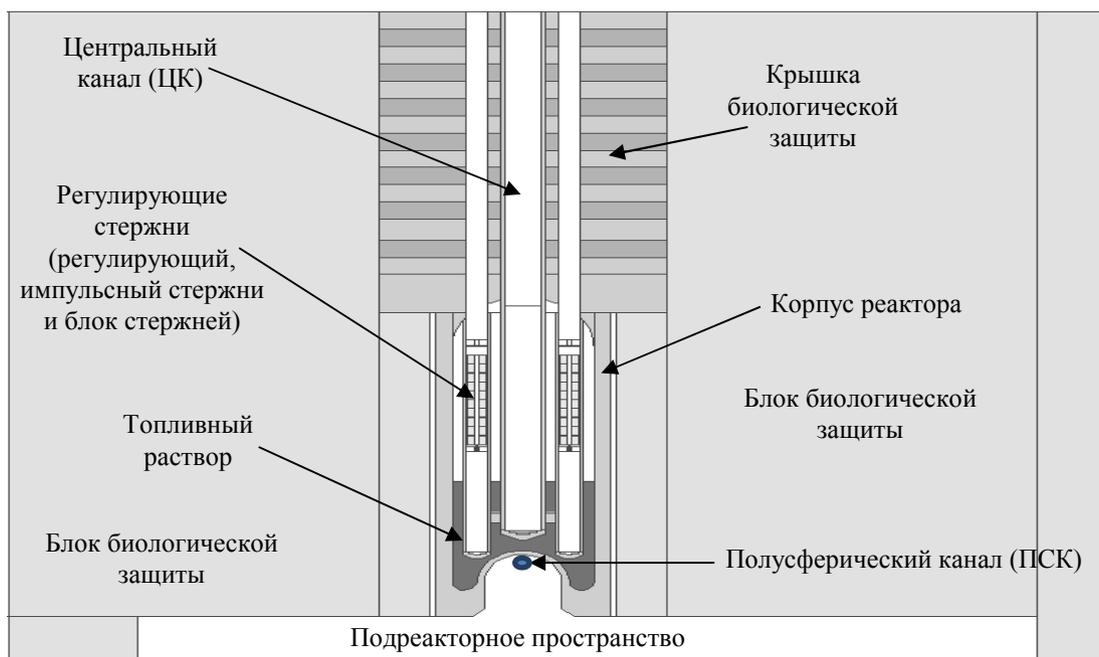


Рис. 5. Расчетная модель реактора ВИР-2М в осевом разрезе

Таблица 2

Результаты верификации расчетной модели установки ГИР-2  
(органы регулирования реактивности)

Параметр	Эксперимент	Расчет
Эффективный коэффициент размножения	1,0081	1,00828
Физический вес конвертора, $\beta_{эф}$	6,0	6,402
Физический вес импульсного блока, $\beta_{эф}$	1,0	0,9976

Примечание. Погрешность расчетных данных составила 2 %, экспериментальных – 20 %.

Таблица 3

Результаты верификации расчетной модели установки ГИР-2 (активационные интегралы, реакций ядро<sup>-1</sup>) при энерговыделении в АЗ реактора 7 МДж

Реакция	«Нейтронное окно»		За конвертером	
	Расчет	Эксперимент[4]	Расчет	Эксперимент [4]
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	$3,18 \cdot 10^{-11}$	$3,28 \cdot 10^{-11}$	$3,50 \cdot 10^{-11}$	$3,59 \cdot 10^{-11}$
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)^{64}\text{Cu}$	$2,79 \cdot 10^{-13}$	$2,54 \cdot 10^{-13}$	$2,56 \cdot 10^{-13}$	$2,63 \cdot 10^{-13}$
$^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$	$1,88 \cdot 10^{-13}$	$1,76 \cdot 10^{-13}$	$6,76 \cdot 10^{-14}$	$6,66 \cdot 10^{-14}$
$^{238}\text{U}(n, f)$	$2,84 \cdot 10^{-13}$	$2,74 \cdot 10^{-13}$	$1,08 \cdot 10^{-13}$	$1,09 \cdot 10^{-13}$
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	$8,87 \cdot 10^{-14}$	$9,22 \cdot 10^{-14}$	$4,10 \cdot 10^{-14}$	$3,83 \cdot 10^{-14}$
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	$5,36 \cdot 10^{-16}$	$5,54 \cdot 10^{-16}$	$3,81 \cdot 10^{-16}$	$3,18 \cdot 10^{-16}$
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92}\text{Nb}$	$3,52 \cdot 10^{-16}$	$3,82 \cdot 10^{-16}$	$1,83 \cdot 10^{-16}$	$2,16 \cdot 10^{-16}$
Флюенс, см <sup>-2</sup>	$1,001 \cdot 10^{14}$	$0,923 \cdot 10^{13}$	$1,96 \cdot 10^{13}$	$1,86 \cdot 10^{13}$
Средняя энергия, МэВ	1,035	1,024	0,84	0,896

Примечание. Погрешность расчетных данных составила 3 %, экспериментальных – 5 %.

Результаты верификации расчетной модели установки БР-1М (ОРР)

Параметр	Эксперимент	Расчет
Физический вес экрана-отражателя вертикальной загрузки, $\beta_{эф}$	0,516	0,474
Физический вес регулирующего блока, $\beta_{эф}$	2,37	2,76
Физический вес импульсного блока, $\beta_{эф}$	2,94	2,82

Примечание. Погрешность расчетных данных составила 2 %, экспериментальных – 20 %.

Результаты верификации расчетной модели установки БР-1М (активационные интегралы, реакций  $\times$ ядро $^{-1}$ ), ЦК, энерговыделение в АЗ  $1 \cdot 10^{17}$  дел.

Реакция	Эксперимент [4]	Расчет
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	$2,789 \cdot 10^{-13}$	$2,760 \cdot 10^{-13}$
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	$1,2860 \cdot 10^{-11}$	$1,264 \cdot 10^{-11}$
$^{56}\text{Fe}(n, p)$	$4,274 \cdot 10^{-13}$	$4,224 \cdot 10^{-13}$
$^{115}\text{In}(n, n')$	$9,258 \cdot 10^{-11}$	$8,592 \cdot 10^{-11}$
$^{64}\text{Zn}(n, p)$	$1,384 \cdot 10^{-11}$	$1,396 \cdot 10^{-11}$
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)$	$1,695 \cdot 10^{-13}$	$1,870 \cdot 10^{-13}$
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	$4,240 \cdot 10^{-11}$	$3,931 \cdot 10^{-11}$
$^{235}\text{U}(n, f)$	$1,0430 \cdot 10^{-9}$	$1,002 \cdot 10^{-9}$
Флюенс, $\text{см}^{-2}$	$2,81 \cdot 10^{14}$	$2,74 \cdot 10^{14}$
Средняя энергия, МэВ	1,256	1.192

Примечание. Погрешность расчетных данных составила 3 %, экспериментальных – 5 %.

Результаты верификации расчетной модели установки БИГР (ОРР)

Параметр	Эксперимент [4]	Расчет
Физический вес БГР, $\beta_{эф}$	18,5	17,7
Физический вес БТР, $\beta_{эф}$	5,25	5,04
Физический вес импульсного стержня, $\beta_{эф}$	0,814	0,772

Примечание. Погрешность расчетных данных составила 2 %, экспериментальных – 20 %.

Результаты верификации расчетной модели установки БИГР (активационные интегралы, реакций  $\text{хядро}^{-1}$ ), ЦК, при энерговыделении в АЗ реактора 280 МДж

Реакция	Фильтр		Эксперимент [4]	Расчет
	Cd	$^{10}\text{В}$		
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	–	–	$2,38 \cdot 10^{-8}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$
$^{235}\text{U}(n, f)$	–	–	$2,21 \cdot 10^{-8}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$
$^{235}\text{U}(n, f)$	1 мм	–	$2,21 \cdot 10^{-8}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$
$^{235}\text{U}(n, f)$	–	1,04 г/см <sup>2</sup>	$1,33 \cdot 10^{-8}$	$1,16 \cdot 10^{-8}$
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	1 мм	–	$8,60 \cdot 10^{-10}$	$7,51 \cdot 10^{-10}$
$^{237}\text{Np}(n, f)$	–	–	$6,03 \cdot 10^{-9}$	$5,83 \cdot 10^{-9}$
$^{115}\text{In}(n, n')$	–	–	$5,73 \cdot 10^{-10}$	$5,81 \cdot 10^{-10}$
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	–	–	$2,24 \cdot 10^{-10}$	$2,32 \cdot 10^{-10}$
$^{32}\text{S}(n, p)$	–	–	$1,42 \cdot 10^{-10}$	$1,42 \cdot 10^{-10}$
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	–	–	$1,14 \cdot 10^{-10}$	$1,15 \cdot 10^{-10}$
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)$	1 мм	–	$9,43 \cdot 10^{-9}$	$9,11 \cdot 10^{-9}$
Флюенс в ЦК, см <sup>2</sup>	–	–	$1,074 \cdot 10^{16}$	$9,84 \cdot 10^{15}$
Средняя энергия в ЦК, МэВ	–	–	0,684	0,721

Примечание. Погрешность расчетных данных составила 3 %, экспериментальных – 5 %.

Результаты верификации расчетной модели установки БР-К1(ОРР)

Параметр	Эксперимент	Расчет
Физический вес ИБ, $\beta_{\text{эф}}$	1,29	1,52
Физический вес РБ, $\beta_{\text{эф}}$	1,25	1,75
Физический вес ПБ, $\beta_{\text{эф}}$	3,3	3,66
Физический вес СБ, $\beta_{\text{эф}}$	1,29	1,52

Примечание. Погрешность расчетных данных составила 2 %, экспериментальных – 20 %.

Результаты верификации расчетной модели установки БР-К1 (активационные интегралы, реакций  $\text{хядро}^{-1}$ ), число делений в АЗ реактора  $1 \cdot 10^{18}$

Реакция	Эксперимент [4]	Расчет
$^{239}\text{Pu}(n, f)$	$7,90 \cdot 10^{-10}$	$7,83 \cdot 10^{-10}$
$^{235}\text{U}(n, f)$	$6,12 \cdot 10^{-10}$	$6,19 \cdot 10^{-10}$
$^{103}\text{Rh}(n, n')$	$1,32 \cdot 10^{-10}$	$1,51 \cdot 10^{-10}$
$^{237}\text{Np}(n, f)$	$2,77 \cdot 10^{-10}$	$3,15 \cdot 10^{-10}$
$^{238}\text{U}(n, f)$	$3,58 \cdot 10^{-11}$	$4,15 \cdot 10^{-11}$
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	$1,16 \cdot 10^{-11}$	$1,21 \cdot 10^{-11}$
$^{32}\text{S}(n, p)$	$7,10 \cdot 10^{-12}$	$7,39 \cdot 10^{-12}$
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	$7,04 \cdot 10^{-14}$	$7,57 \cdot 10^{-14}$
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)$	$4,36 \cdot 10^{-14}$	$4,48 \cdot 10^{-14}$

Примечание. Погрешность расчетных данных составила 3 %, экспериментальных – 5 %.

Результаты верификации расчетной модели установки ВИР-2М (ОРР)

Положение ОРР*, см	$k_{эф}$	
	Эксперимент	Расчет
ИС = 0, РС = 60, БС = 65	$1 \pm 0,04$	$0,99954 \pm 0,00025$
ИС = 0, РС = 60, БС = 67	$1 \pm 0,04$	$0,99916 \pm 0,00027$
ИС = 0, РС = 60, БС = 69	$1 \pm 0,04$	$1,00015 \pm 0,00028$

*Примечание.* «Положение ОРР» означает смещение регулирующего стержня (ИС, РС и БС) относительно своего крайнего нижнего положения. Погрешность расчетных данных составила 2 %, экспериментальных – 5 %.

Таблица 11

Результаты верификации расчетной модели установки ВИР-2М (активационные интегралы, реакций  $\times \text{ядро}^{-1}$ ), в ЦК, при энерговыделении в АЗ реактора 56 МДж

Реакция	Экран толщиной 0,5 мм	Эксперимент [4]	Расчет
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	–	$1,37 \cdot 10^{-13}$	$1,28 \cdot 10^{-13}$
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	–	$2,02 \cdot 10^{-10}$	$1,80 \cdot 10^{-10}$
$^{197}\text{Au}(n, g)$	Cd	$2,08 \cdot 10^{-8}$	$2,09 \cdot 10^{-8}$
$^{115}\text{In}(n, n')$	–	$3,90 \cdot 10^{-11}$	$3,73 \cdot 10^{-11}$
$^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$	Cd	$8,83 \cdot 10^{-11}$	$7,49 \cdot 10^{-11}$
$^{197}\text{Au}(n, g)$	–	$2,09 \cdot 10^{-8}$	$2,24 \cdot 10^{-8}$
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)$	–	$9,34 \cdot 10^{-14}$	$8,16 \cdot 10^{-11}$
$^{58}\text{Ni}(n, p)$	–	$2,02 \cdot 10^{-11}$	$1,87 \cdot 10^{-11}$
Флюенс в ЦК, $\text{см}^{-2}$	–	$7,00 \cdot 10^{14}$	$7,49 \cdot 10^{14}$
Средняя энергия в ЦК, МэВ	–	0,829	0,670

*Примечание.* Погрешность расчетных данных составила 3 %, экспериментальных – 5 %.

Использование верифицированных расчетных моделей реакторных установок позволило получить нулевые приближения нейтронных спектров для всех пространственных областей снаружи и внутри АЗ, в которых проводится облучение исследуемых объектов. Такой подход дает возможность сформировать библиотеку нулевых приближений нейтронного спектра и тем самым унифицировать процедуру определения нейтронного спектра с использованием программы КАСКАД.

На рис. 6–9 приведены результаты определения нейтронного спектра для некоторых АЗ с использованием расчетного нулевого приближения. Приведенные на рисунках спектральные распределения для нейтронов нормированы на единичный флюенс. Для всех верифицированных моделей коррекция нулевого приближения при определении спектра,

не противоречащего экспериментальным данным, незначительна.

Особенную ценность использование расчетного нулевого приближения имеет при определении нейтронного спектра в интервале 0,05–0,5 МэВ, являющемся проблемным для активационных методов. В этом интервале наличие достоверной априорной информации о форме спектра особенно важно.

При планировании и выборе редакции облучательного эксперимента использование верифицированных расчетных моделей реакторных установок позволяет прогнозировать экспериментальные значения нейтронного флюенса и поглощенной дозы гамма-излучения с погрешностью не более 20 %. В качестве примера в табл. 12 и 13 приведены расчетные (прогнозируемые) и экспериментальные данные для некоторых АЗ реакторов в экспериментальных точках.

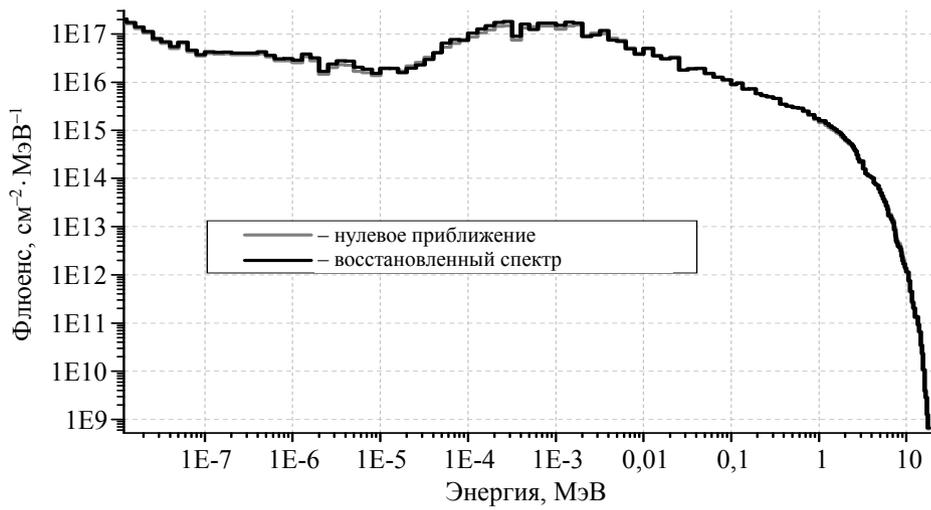


Рис. 6. Расчетный и восстановленный спектры нейтронов в центре АЗ БИГР (восстановленный спектр – результат коррекции нулевого приближения)

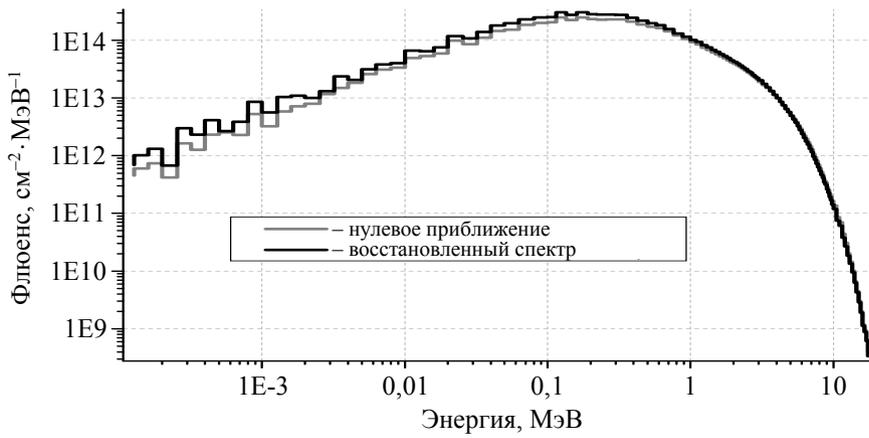


Рис. 7. Расчетный и восстановленный спектры нейтронов в центре АЗ БР-1М (восстановленный спектр – результат коррекции нулевого приближения)

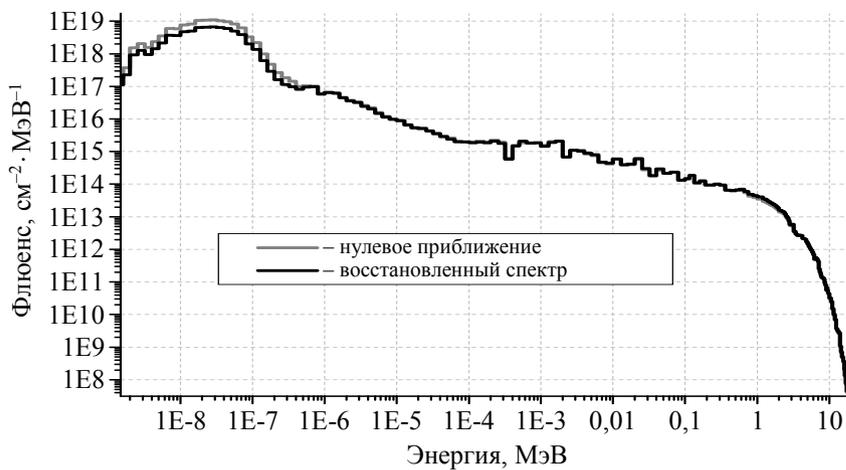


Рис. 8. Расчетный и восстановленный спектры нейтронов на поверхности АЗ БИГР (восстановленный спектр – результат коррекции нулевого приближения)

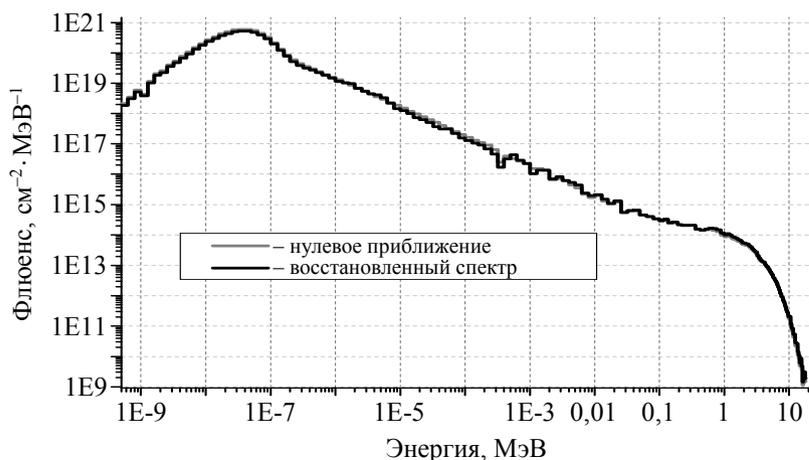


Рис. 9. Расчетный и восстановленный спектры нейтронов в центральном канале АЗ ВИР-2М (восстановленный спектр – результат коррекции нулевого приближения)

Таблица 12

Сравнение расчетных и экспериментальных значений полного флюенса нейтронов (для максимального энерговыделения в АЗ), см<sup>-2</sup>

Рабочая область	Установка							
	БИГР		ГИР-2		ВИР-2М		БР-1М	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Центральный канал	1,1·10 <sup>16</sup>	1·10 <sup>16</sup>	–	–	7,49·10 <sup>14</sup>	7,00·10 <sup>14</sup>	7,59·10 <sup>14</sup>	7,40·10 <sup>14</sup>
Поверхность АЗ	1,01·10 <sup>15</sup>	0,85·10 <sup>15</sup>	1,01·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	–	–	2,22·10 <sup>14</sup>	2,14·10 <sup>14</sup>
Полусферический канал	–	–	–	–	6,81·10 <sup>14</sup>	6,8·10 <sup>14</sup>	–	–

Таблица 13

Сравнение расчетных и экспериментальных значений дозовых нагрузок, Гр

Рабочая область	Установка							
	БИГР, энерговыделение 280 МДж		ГИР-2, энерговыделение 7 МДж		ВИР-2М, энерговыделение 60 МДж		БР-1М, энерговыделение 10 <sup>17</sup> дел.	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Центральный канал	17400	16000	–	–	5400	5000	753	755
Поверхность АЗ	1720	1914	580	600	–	–	135	152
Полусферический канал	–	–	–	–	4500	5000	–	–

Ниже приведен пример использования расчетных моделей АЗ для прогнозирования результатов измерений в облучательных экспериментах. На рис. 10 показано моделирование облучательного опыта на реакторе БР-1М

с использованием *n*-γ конвертора из кадмированного полипропилена. В табл. 14 представлены требуемые уровни радиационной нагрузки объекта исследования, результаты расчетов по модели и результаты измерений.

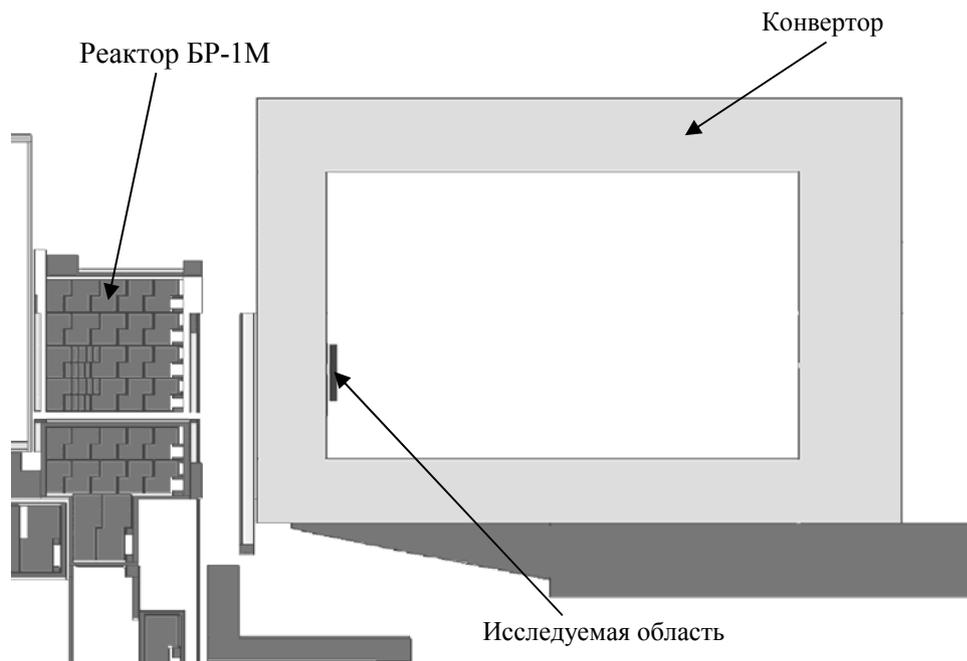


Рис. 10. Расчетная модель «реактор БР-1М-конвертор»

Таблица 14

*Уровни радиационного нагружения объекта исследования при максимальном энерговыделении в АЗ реактора БР-1М*

Требуемые уровни		Прогнозируемые в данной редакции эксперимента		Результаты измерений	
Нейтроны, см <sup>-2</sup>	Доза, Гр	Нейтроны, см <sup>-2</sup>	Доза, Гр	Нейтроны, см <sup>-2</sup>	Доза, Гр
4·10 <sup>13</sup>	900	3,70·10 <sup>13</sup>	859	4,150·10 <sup>13</sup>	935

Статистическая погрешность результатов расчета не превышала 6 % при доверительной вероятности 0,95. Полная погрешность результатов измерений не превышала 20 % при доверительной вероятности 0,95.

Из данных, приведенных в табл. 14, видно, что при расчетном моделировании облучательных экспериментов прогнозируемые результаты измерений отличаются от реальных результатов на величину, не превосходящую погрешность измерений. Отличие прогнозируемых результатов от требуемых уровней радиационного нагружения также не превосходит допустимую погрешность требуемых уровней радиационного нагружения (20 %).

С привлечением расчетного моделирования отпадает необходимость в комплексе под-

готовительных пробных облучений, направленных на определение оптимальной редакции эксперимента, удовлетворяющей требованиям заказчика по уровням радиационного нагружения исследуемых объектов.

Таким образом, расчетное моделирование реакторных установок и их окружения успешно решает следующие задачи:

- получения физически обоснованного нулевого приближения спектра для задач нейтронной спектрометрии;
- выбора оптимальной редакции облучательного эксперимента;
- снижения амортизационных затрат на эксплуатацию реакторных установок;
- снижения дозового нагружения эксплуатирующего персонала реакторных установок.

## Список литературы

1. Кошелев А. С., Маслов Г. Н., Петров Ю. В. КАСКАД – комплексная вычислительная программа для метода интегральных нейтронных детекторов // V Всесоюзное совещание по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. Тезисы докладов. – М.: НПО, 1990, с. 116–118.

2. Колесов В. Ф. Аперiodические импульсные реакторы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.

3. TART2016: A Coupled Neutron-Photon 3-D, Time Dependent, Combinatorial Geometry Monte Carlo Transport Code, Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL-TR-577352, July 22, 2012, by D. E. Cullen. CCC-0638/11, ID C17F015.

4. Характеристики полей нейтронов. Источники элементарных нейтронов деления, генераторы 14 МэВ нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, устройства, конвертирующие нейтронное излучение. Справочник. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2007. 654 с.

Контактная информация –

Дроздов Игорь Юрьевич,  
начальник научно-исследовательской  
лаборатории ИЯРФ,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 87–98.