

5619

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



11-5619

А.Д.Рогов, Е.П. Шабалин

РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА  
ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО;  
СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

1971

## Ранг публикаций Объединенного института ядерных исследований

Препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) являются самостоятельными публикациями. Они издаются в соответствии со ст. 4 Устава ОИЯИ. Отличие препринтов от сообщений заключается в том, что текст препринта будет впоследствии воспроизведен в каком-либо научном журнале или аperiodическом сборнике.

## Индексация

Препринты, сообщения и депонированные публикации ОИЯИ имеют единую нарастающую порядковую нумерацию, составляющую последние 4 цифры индекса.

Первый знак индекса - буквенный - может быть представлен в 3 вариантах:

"Р" - издание на русском языке;

"Е" - издание на английском языке;

"Д" - работа публикуется на русском и английском языках.

Препринты и сообщения, которые рассылаются только в страны-участницы ОИЯИ, буквенных индексов не имеют.

Цифра, следующая за буквенным обозначением, определяет тематическую категорию данной публикации. Перечень тематических категорий изданий ОИЯИ периодически рассылается их получателям.

Индексы, описанные выше, проставляются в правом верхнем углу на обложке и титульном листе каждого издания.

## Ссылки

В библиографических ссылках на препринты и сообщения ОИЯИ мы рекомендуем указывать: инициалы и фамилию автора, далее - сокращенное наименование института-издателя, индекс, место и год издания.

Пример библиографической ссылки:

*И.И. Иванов. ОИЯИ, P2-4985, Дубна, 1971.*

11-5619

А.Д.Рогов, Е.П. Шабалин

**РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА  
ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО;  
СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ**

## В в е д е н и е

Для оценки интегральных характеристик импульсного реактора с подвижным отражателем (ПО), в Объединенном институте ядерных исследований была разработана методика и создана программа МНВ, основанная на методе статистических испытаний. Описание способа оценки коэффициента размножения, среднего времени жизни поколения нейтронов, полной эффективности подвижного отражателя ( $\Delta k$ ), эффекта смещения ПО на 1 см от положения, соответствующего максимальной реактивности (так называемого "параболического коэффициента реактивности")  $\alpha$ , было изложено в [1]. Сущность метода расчёта  $\alpha$  заключалась в оценке дополнительных делений, вызванных за счёт смещения ПО на некоторую заданную величину. К недостаткам метода следует отнести сложность алгоритма, невозможность одновременного расчёта  $\alpha$  и  $\Delta k$  для ПО одного размера, а также приближение постоянной по активной зоне "ценности" нейтронов дополнительных делений. Последнее обстоятельство приводило к завышенным оценкам параметра  $\alpha$ . Описанию нового алгоритма расчёта  $\alpha$ , примененного и опробованного авторами, посвящена эта работа. Его особенностью является замена оценки эффекта возмущения  $k_{эфф}$ , при сдвиге ПО на некоторую определенную величину оценкой производной  $k_{эфф}$ , по смещению ПО.

Метод оценки параболического коэффициента реактивности  
 $\alpha$  подвижного отражателя

Геометрическая схема рассматриваемого варианта реактора показана на рис. 1. Коэффициент размножения как функцию параметра  $h$  — смещения ПО из положения, симметричного относительно плоскости  $y = Y_N/2$ , выразим рядом Тэйлора:

$$k(h) = k(0) + \frac{1}{2} k''_{h=0} h^2 + \frac{1}{24} k^{(IV)}_{h=0} h^4 + \dots$$

Нечетные производные равны нулю из-за симметрии реактора относительно плоскости  $y = Y_N/2$ . Из результатов измерений  $k(h)$  на критических сборках ясно, что достаточно ограничиться второй производной:

$$k(h) = k(0) + \frac{1}{2} k''_{h=0} h^2 = k(0) - \alpha h^2.$$

Дифференцируя это соотношение по  $h$ , получим

$$\alpha = - \frac{1}{2h} k'_h \quad \text{при } h \neq 0.$$

Изменение коэффициента размножения при небольшом смещении ПО  $\Delta h$  можно выразить формулой малых возмущений:

$$\Delta k(\Delta h) = k(h + \Delta h) - k(h) = \frac{(\phi^*, \Delta N \phi)}{(\phi^*, \phi)}. \quad (1)$$

Здесь интегральный оператор  $\Delta N$  действует по правилу:

$$\Delta N \phi = N_2 \phi - N_1 \phi,$$

$$N_1 \phi = \int_V p_1(u, u') \phi(u') du',$$

$$\Delta N \phi = \int_V \Delta p(u, u') \phi(u') du',$$

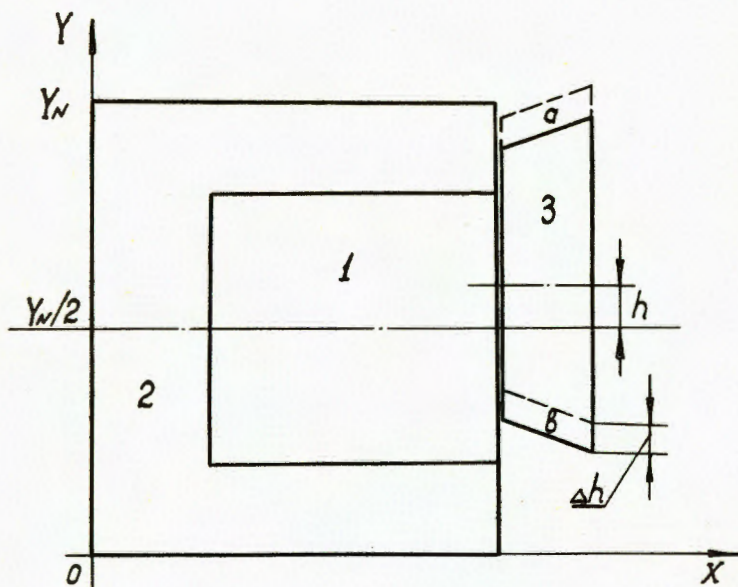


Рис. 1. Схема модели реактора с подвижным отражателем: 1 - активная зона; 2 - стационарный отражатель; 3 - подвижный отражатель. Максимальный размер реактора в направлении оси  $Y - Y_N$ ; ПО сдвинут из центральной позиции на величину  $h$ .

где:  $v$  - фазовый объем блужданий нейтрона.  $u, u' \in v$ ;  $p(u, u')$  - плотность нейтронов в точке  $u$ , "рожденных" нейтронами, испущенными из точки  $u'$ ,  $\phi(u)$  - собственная функция оператора  $N$  или равновесная плотность нейтронов деления,  $\phi^*(u)$  - собственная функция сопряженного оператора или распределение "ценности" нейтронов деления,  $(f, \phi)$ -скалярное произведение функций.

Индексы 1 и 2 относятся к величинам для невозмущенного и возмущенного реактора соответственно.

Предельный переход  $h \rightarrow 0$  в формуле (1) приводит к соотношению для первой производной  $k_{эф\phi}$  по параметру  $h$ :

$$k'_h = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{\Delta k(\Delta h)}{\Delta h} = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{(\phi^*, \Delta N \phi)}{\Delta h (\phi^*, \phi)} = \frac{(\phi^*, N'_h \phi)}{(\phi^*, \phi)}.$$

В<sup>1/</sup> было показано, что оценкой функционала  $(\phi^*, \Delta N \phi) / (\phi^*, \phi)$  при моделировании случайного процесса переноса нейтронов методом Монте-Карло будет выражение:

$$\Delta k = \frac{(\phi^*, \Delta N \phi)}{(\phi^*, \phi)} = \frac{1}{n} \sum_i w_{g1} \frac{\nu \sum_{t1} \phi_i^*}{\sum_{t1}} / \sum_i w_i \frac{\nu \sum_{t1} \phi_i^*}{\sum_{t1}}, \quad (2)$$

где  $\nu \sum_t / \sum_t$  - число вторичных нейтронов деления на столкновение,  $i$  - номер столкновения, сквозной по всем траекториям,  $w_{g1} = w_g \prod_{p=1}^{p1} (1 - \nu \sum_t / \sum_t)_p$  - дополнительные "веса", отличные от нуля для нейтронов, траектория которых проходит через область возмущения,  $p$  - номер столкновения в  $s$ -ой ветви расщепленной траектории.

При попадании нейтрона в область возмущения ( $a$  или  $b$ ) его траектория разветвляется: одна из ветвей начинается с "вынужденного" столкновения, вторая ветвь является продолжением траектории в невозмущенном реакторе. Значение и знак дополнительного веса  $w_{gs}$  при расщеплении зависят от области возмущения и ветви траектории (см.<sup>1/</sup>).

При оценке  $k'_h$  области возмущения вырождаются в плоские грани ПО; предельный переход в (2) дает формулу для оценки  $k'_h$ :

$$k'_h = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{\Delta k(\Delta h)}{\Delta h} = \frac{1}{n} \sum_i w'_{g1} \frac{\nu \sum_{t1} \phi_i^*}{\sum_{t1}} / \sum_i w_i \frac{\nu \sum_{t1} \phi_i^*}{\sum_{t1}}, \quad (3)$$

где

$$w'_{g't} = w'_{g's} \prod_{p=1}^{p_t} (1 - \nu \Sigma_f / \Sigma_t)_p .$$

Можно показать, что

$$\lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{w_{g's}(h + \Delta h) - w_{g's}(h)}{\Delta h} = w'_{g's}$$

существует и равен  $w \Sigma_t / |\mu_y|$  для ПО с прямоугольным сечением.

Значение  $w'_{g's}$  для ПО с сечением трапециевидальной формы есть

$$w \Sigma_t \left| \frac{B}{A \mu_x + B \mu_y} \right| ,$$

где  $Ax + By + C = 0$  - уравнение следа грани а или б ПО на плоскости XY,  $\mu_y$  - направляющий косинус в точке пересечения траектории нейтрона граничных плоскостей а или б (рис. 1),  $w$  - "вес" нейтрона до расщепления.

Очевидно, что направление скорости нейтрона, вызывающего деление, равно как и абсолютное значение его скорости, весьма слабо влияют на спектр и угловое распределение нейтронов деления. Вследствие этого  $\phi^*$  является только функцией координаты точки деления. В качестве "ценности" нейтрона деления была взята функция распределения плотности делений в активной зоне, рассчитанная в диффузионном односкоростном приближении. Однородное уравнение диффузии решалось численным методом в плоской геометрии XY; двумерное распределение диффузионного потока в активной зоне прямоугольного сечения аппроксимировалось двойным рядом полиномов Лежандра и использовалось в качестве  $\phi^*(\vec{r})$  в формуле (3); в направлении оси Z "ценность" считалась постоянной.

### Результаты расчётов по программе МНВ

Для проверки надежности методов расчёта характеристик импульсного реактора и оценки их точности программа МНВ была опробована на критических сборках на быстрых нейтронах с подвижным отражателем реактора ИБР-2 на Большом физическом стенде (БФС) в Обнинске<sup>4/</sup> и реактора PFR (сборки CEPFR) Брукхэйвенской национальной лабо-



ратории США/2/. Кроме того рассчитывалась сборка **GODIVA** для сопоставления расчётных и экспериментальных спектров/3/. Все расчёты проводились в предположении гомогенных активных зон; вычислялись следующие величины:

- коэффициент размножения  $k_{\text{эфф.}}$ ;
- время жизни поколения нейтронов деления  $\tau$  ;
- эффективность ПО  $\Delta k$  ;
- параболический коэффициент реактивности  $\alpha$  ;
- спектр утечки нейтронов;
- вероятная статистическая ошибка оценки каждой величины.

Сборки БФС ИБР-2 предназначались главным образом для измерения эффектов реактивности, связанных со смещением подвижного отражателя, оптимизации его размеров, а также для выбора наилучшего варианта компоновки и размера активной зоны. Горючим служил высокообогащенный уран-235, отражателем - уран-238. Активная зона сборок ИБР-2 имела форму неправильного шестиугольника, который в расчётах заменялся эквивалентным прямоугольником с сохранением площади сечения и концентраций всех элементов. Специальные расчёты показали, что это упрощение не влияет практически на оценку  $k_{\text{эфф.}}$ ; изменение  $\alpha$  находится в пределах статистической погрешности.

Критические сборки **CEPFR**, содержащие в активной зоне обогащенный уран и имеющие стационарный отражатель из стали, предназначались для измерения параметров импульсного реактора, выбора материала и размера подвижного отражателя. Форма активной зоны - прямоугольная, что в точности моделировалось при расчётах по программе МНВ.

Сферическая геометрия **GODIVA** также учитывалась точно.

Результаты - и экспериментальные и расчётные - сведены в таблицы 1,2 и 3. Удовлетворительная сходимость всех параметров для одного варианта сборки получалась за время не более 30 минут на машине БЭСМ-6. За это время для разных вариантов сборок моделировалось неодинаковое число историй - (от 20000 до 200000), что объясняется отличием объемов сборок.

Вычисление  $k_{\text{эфф.}}$  В основу расчёта параметров взаимодействия нейтронов со средой для программы МНВ была положена 26-групповая

система констант ФЭИ<sup>5/</sup>. Однако расчётные значения  $k_{\text{эфф}}$  оказались существенно завышенными (см. табл. 1). Были модифицированы сечения для делящихся веществ на основе последних экспериментальных данных<sup>6,7/</sup>. В результате расхождение с экспериментом уменьшилось (табл. 1). Наибольшее расхождение расчётного и экспериментального значения  $k_{\text{эфф}}$  не превышает 4%, и наблюдалось лишь на тех сборках, где значительна гетерогенность композиции активных зон.

Время жизни нейтронов  $\tau$ , рассчитанное по методу Монте-Карло, для большинстваборок получилось заниженным на 25-30% по сравнению с экспериментом. Расчёты в Брукхэйвенской Национальной Лаборатории S-p методом тоже дали сильно заниженное время жизни нейтронов (40-50%). Такое расхождение отмечено и в ряде других работ, например<sup>8/</sup>. Отличие можно объяснить, возможно, тем, что расчёт дает более жесткий спектр, чем эксперимент. При моделировании траекторий вычисляется время между последовательными столкновениями нейтронов, т.е. величина, равная пробегу нейтрона, деленному на его скорость в данной группе. Очевидно, что основной вклад в среднее время жизни поколения вносят нейтроны низких энергий, порядка десятка кэв и ниже. Доля нейтронов с такими энергиями мала и поэтому вклад их в коэффициент размножения и другие характеристики реактора, кроме  $\tau$ , незначителен.

Другое объяснение заключается в возможной ошибке интерпретации Росси -  $\alpha$  измерений по формуле Орндорфа для реакторов со сложной геометрией. Одноточечная модель кинетики может оказаться не совсем точной<sup>9/</sup>.

Эффективность ПО ( $\Delta k$ ) и параболический коэффициент реактивности ( $\alpha$ ). Расчёты этих параметров проводились с учётом и без учета "ценности" нейтронов деления. Из таблиц 1 и 2 видно, что расчётные значения с учётом "ценности" нейтронов деления находятся в лучшем согласии с экспериментом. Для большинства вариантов отношение  $\alpha$  и  $\Delta k$ , рассчитанных с учётом и без учета "ценности", примерно постоянно и равно 0,75 для  $\Delta k$  и 0,7 для  $\alpha$ .

ТАБЛИЦА №1

экспериментальные и расчетные значения  
характеристик сборки БФС-ИБР2

Вид сборки и размер по	Объем а.з. (литров)		$k_{эф}$	$\Delta k, \%$	$d \times 10^{+4} \text{см}^{-2}$
I- I А	30	э	$0,998 \pm 0,004$	$3,63 \pm 0,12$	$0,88 \pm 0,03$
		о	$0,993 \pm 0,004$	$6,50 \pm 0,22$	$1,20 \pm 0,24$
		ж	$1,015 \pm 0,005$	$4,95 \pm 0,15$	$0,90 \pm 0,18$
I-4 С	32	э	$1,000 \pm 0,011$	$5,60 \pm 0,01$	$1,16 \pm 0,07$
		о	$1,007 \pm 0,004$	$6,80 \pm 0,20$	$1,53 \pm 0,20$
		ж	-	$5,20 \pm 0,20$	$1,07 \pm 0,20$
II С	14	э	$1,000 \pm 0,004$	-	$1,56 \pm 0,07$
		о	$1,041 \pm 0,005$	-	$2,10 \pm 0,41$
		ж	-	-	$1,50 \pm 0,30$
III В	20	э	$1,000 \pm 0,040$	$4,80 \pm 0,22$	$1,38 \pm 0,04$
		о	$1,041 \pm 0,004$	$6,40 \pm 0,35$	$2,40 \pm 0,40$
		ж	$1,074 \pm 0,005$	$4,80 \pm 0,20$	$1,70 \pm 0,30$

Обозначения: А - размер ПО 30 x 7 x 45см ( $H_y \times H_x \times H_z$ )

В - размер ПО 25 x 7 x 45см

С - размер ПО 35 x 7 x 45см

Материал ПО - везде углеродистая сталь;

э - экспериментальные величины;

Расчёт:

о - без учёта функции "ценности" для величин  $\Delta k$  и  $d$   
(и расчёт  $k_{эф}$  по модифицированным константам  
для И<sup>235</sup>).

ж - с учётом функции "ценности" для величин  $\Delta k$  и  $d$   
(и расчёт  $k_{эф}$  по константам ФЭИ, /5/).

ТАБЛИЦА №2  
экспериментальные и расчетные значения характеристик  
сборки BNL-CEPFR

Материал и размер по		$k_{эф}$	$\tau \times 10^3$ (сек)	$\Delta k$ (%)	$L \times 10^4$ (см <sup>-2</sup> )
нет	э	1.000	200	-	-
	о	0.998±0.003	156		
Нерж. сталь А	э	1.012	137	4.03	0.91
	о	1.015±0.003	90	5.77±0.17	0.99±0.19
	ж			4.09±0.12	0.80±0.16
Нерж. сталь В	э	1.002	135	2.95	0.64
	о	0.998±0.003	92	4.55±0.14	1.02±0.22
	ж			3.14±0.10	0.59±0.12
Нерж. сталь С	э	1.000	130	1.19	0.27
	о	0.989±0.003	96	1.65±0.05	0.33±0.06
	ж			1.09±0.03	0.25±0.05
Углерод. сталь А	э	1.002	135	3.12	0.84
	о	1.006±0.003	101	5.02±0.15	1.46±0.3
	ж			3.41±0.10	0.71±0.14
Никель А	э	1.016	134	4.55	1.34
	о	1.015±0.003	100	5.85±0.15	1.83±2.0
	ж			4.10±0.12	1.30±1.8
Никель В	э	1.005	132	3.5	1.05
	о	1.009±0.003	102	4.85±0.14	1.60±0.26
	ж			3.00±0.10	0.94±0.19
Бериллий А	э	1.040	191	7.3	2.35
	о	1.026±0.003	135	7.8±0.23	2.73±0.54
	ж	-	-	-	-

Примечание: 1. э - экспериментальные данные  
 о - данные без учета ценности нейтронов деления  
 ж - данные с учетом ценности нейтронов деления  
 2. А - 37см высота х 23см ширина х 10см толщина  
 В - 37см высота х 23см ширина х 5см толщина  
 С - 37см высота х 7,6см ширина х 10см толщина

Таблица №3

Расчетный и экспериментальный спектры утечки  
из GODIVA ,  $df/dE$  (МэВ<sup>-1</sup>)

Но гр	Энергетические интервалы	Эксперимент	Расчёт
I	6.5 — 10.5 мэВ		0.005
2	4.0 — 6.5 мэВ	0.050±0.005	0.046
3	2.5 — 4.0 мэВ	0.135±0.001	0.147
4	1.4 — 2.5 мэВ	0.29±0,02	0.300
5	0.8 — 1.4 мэВ	0.68±0.03	0.630
6	0.4 — 0.8 мэВ	0.92±0.03	0.910
7	0.2 — 0.4 мэВ	1.00±0.04	1.000
8	0.1 — 0.2 мэВ		0.915
9	46.5 — 0.1 кэВ		0.633
10	21.5 — 46.5 кэВ		0.400
11	10.0 — 21.5 кэВ		0.100
12	4.65 — 10.0 кэВ		0.000

## Л и т е р а т у р а

1. В.И. Кочкин, Е.П. Шабалин. Препринт ОИЯИ 11-4098, Дубна 1968.
2. "Progress Report Brookhaven National Laboratory", Pulsed Fast Research Reactor Project, BNL-12470, 1968.
3. G.M. Frye et al., Los-Alamos Scientific Laboratory, TID-10073, 1954.
4. В.Д. Ананьев и др. Доклад, представленный на 4-ю Женевскую конференцию по использованию атомной энергии, 1971 г.
5. Л.П. Абагян и др. "Групповые константы для расчёта ядерных реакторов", Атомиздат, 1964.
6. P.H. White et al., "Physics and Chemistry Proceedings of a Symposium", Salzburg, 1965, IAEA, Vienna.
7. BNL-325, Neutron Cross Section, Volume IIA, 1965.
8. E. Kiefhaber, "Comment of the Calculation of Neutron Lifetime and Material Worth", KFK-882, Karlsruhe, 1968.
9. В.И. Кочкин, Е.П. Шабалин. Препринт ОИЯИ 11-5407, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел

19 мая 1971 года.

## Условия обмена

Препринты и сообщения ОИЯИ рассылаются бесплатно, на основе взаимного обмена, университетам, институтам, лабораториям, библиотекам, научным группам и отдельным ученым более 50 стран.

Получателям изданий ОИЯИ предоставляется возможность самим проявить инициативу в бесплатной посылке публикаций в Дубну. В порядке обмена принимаются научные книги, журналы, препринты и иного вида публикации по тематике ОИЯИ.

Единственный вид публикаций, который нам присылать не следует, это репринты (оттиски статей, уже опубликованных в научных журналах).

В ряде случаев мы сами обращаемся к научным учреждениям – наиболее крупным получателям наших изданий – с просьбой бесплатно прислать нам какие-либо книги или выписать для нашей библиотеки научные журналы, издающиеся в их странах.

## Отдельные запросы

Издательский отдел ежегодно выполняет около 3000 отдельных запросов на высылку изданий ОИЯИ. В таких запросах следует обязательно указывать индекс запрашиваемого издания.

## Адреса

Письма по всем вопросам обмена публикациями, а также запросы на отдельные издания следует направлять по адресу:

*Москва,  
Главный почтамт, п/я 79.  
Издательский отдел  
Объединенного института  
ядерных исследований.*

Адрес для посылки всех публикаций в порядке обмена, а также для бесплатной подписки на научные журналы:

*Москва,  
Главный почтамт, п/я 79.  
Научно-техническая библиотека  
Объединенного института  
ядерных исследований.*