

9990

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



9990

P13 - 9990

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

А.Д.Рогов, Е.П.Шабалин

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
РЕАКТОРА ИБР-2

1976

P13 - 9990

А.Д.Рогов, Е.П.Шабалин

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
РЕАКТОРА ИБР-2

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Рогов А. Д., Шабалин Е. П.

P13 - 9990

Нейтронно-физические параметры реактора ИБР-2

В работе представлены уточненные результаты расчетов нейтронно-физических параметров импульсного реактора на быстрых нейтронах ИБР-2. На основе рабочих чертежей рассчитаны потоки нейтронов и распределение плотности делений в реакторе. Приведены эффекты реактивности подвижного отражателя, эффективная доля запаздывающих нейтронов, распределение реактивности топлива, потоки нейтронов с поверхности замедлителя. Форма импульса быстрых и теплых нейтронов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований

Дубна 1976

Rogov A. D., Shabalina E. P.

P13 - 9990

Calculated Neutronic Parameters of IBR-2 Reactor

In the present paper the results of the recently corrected calculations of the periodically pulsed reactor IBR-2 are compiled. Neutron flux and fission density distribution have been calculated for real geometry and composition of the reactor core and reflectors. The values of the moving reflectors reactivity effects, of the delayed neutron effective fraction, fuel reactivity distribution, of mean neutron lifetime, of neutron flux from moderators, the shapes of fast and thermal neutron fluxes are given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research

Dubna 1976

Физические особенности реактора ИБР-2 и методика расчетов

Реактор ИБР-2 представляет собой периодически пульсирующую за счет вращения части отражателя систему, в которой осуществляется самоподдерживающаяся цепная реакция на быстрых нейтронах. Строго говоря, перенос нейтронов в таком реакторе подчиняется нестационарному уравнению Больцмана. Однако, из-за того, что время жизни мгновенных нейтронов $/4 \cdot 10^{-8} \text{ с}/$ на много порядков меньше длительности импульса мощности $/10^{-4} \text{ с}/$ и коэффициент размножения мало отличается от единицы, импульс мощности развивается в условиях практически установившегося распределения потока. К тому же, период следования импульсов /от 0,02 до 0,2 с/ значительно меньше среднего периода распада предшественников запаздывающих нейтронов, и поэтому интенсивность и распределение источников нейтронов в реакторе не зависит от времени. Это позволяет рассчитывать нестационарный процесс развития мощности в приближении точечной модели, определяя интегральные параметры реактора $(k_{эфф}(t), \tau, \beta_{эфф})$, а также пространственно-энергетические зависимости потоков нейтронов в стационарном состоянии, используя методики и программы расчета критических реакторов.

Стационарные расчеты интегральных характеристик ИБР-2 и плотности делений проводились с помощью трехмерной программы MNB^{/1,2/}, основанной на методе Монте-Карло и с помощью двухмерной программы TRAXY^{/3/}, которая решает уравнение переноса методом дискретных ординат. Обе программы рассчитаны на работу с системами групповых констант АБН^{/4/} и АРАМАКО^{/5/}.

*Расчет плотности делений, потока
и ценности нейтронов*

Реальная геометрия реактора ИБР-2 показана на рис. 1^{/6/}. Для расчета плотности делений методом Монте-

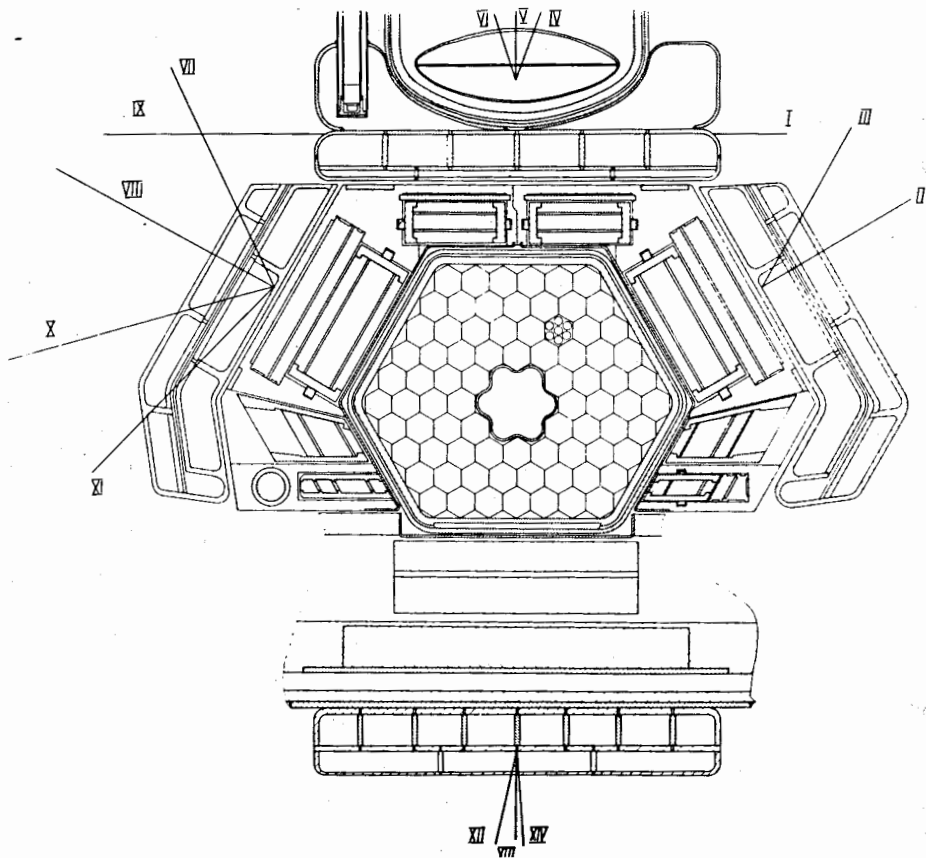


Рис. 1. Сечение активной зоны реактора ИБР-2.

Карло использовалась модель, показанная на рис. 2. Полное количество геометрических элементов, из которых составлялась модель реактора, равно 3584. По высоте активная зона реактора разбивалась на шесть

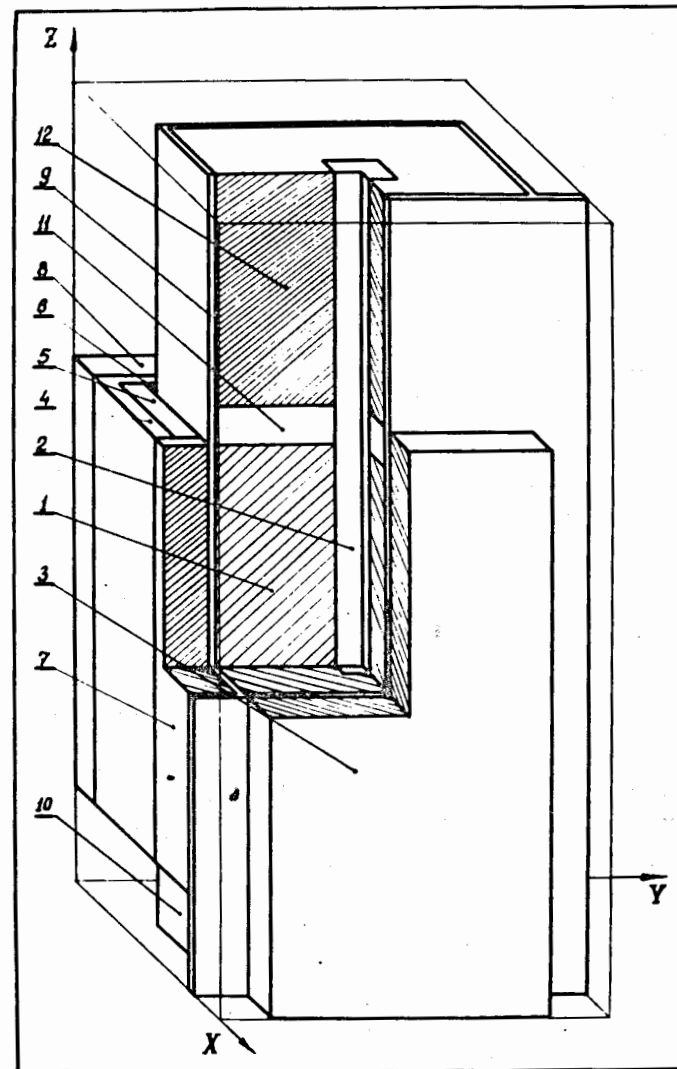


Рис. 2. Модель для расчета методом Монте-Карло. 1 - активная зона, 2 - канал мишени, 3 - подвижный отражатель, 4 - бористая сталь, 5 - компенсатор реактивности, 6 - блок медленной аварийной защиты /МАЗ/, 7 - блок быстрой аварийной защиты /БАЗ/ и регулятора /АР/, 8 - водяной замедлитель, 9 - корпус активной зоны, 10 - опорная плита, 11 - вольфрамобые пробки, 12 - натриевый коллектор.

равных слоев по 74 мм. Число физических зон было равно 13. Ядерные концентрации элементов по зонам приведены в табл. 1. Расчет проводился в 26-групповом приближении.

В каждой кассете, содержащей 7 твэлов, считалась средняя плотность делений в каждой i -ой осевой зоне:

$$Q_i = \frac{1}{V_i} \iint \Phi(\vec{r}, \vec{v}) \cdot \Sigma_f(\vec{r}, \vec{v}) d\vec{r} d\vec{v}.$$

Интегрирование производится по элементу объема кассеты V_i /высотой 74 мм/ и во всем пространстве скоростей нейтронов \vec{v} . Здесь $\Phi(\vec{r}, \vec{v})$ - плотность потока нейтронов в точке \vec{r} , обладающих скоростью \vec{v} , $\Sigma_f(\vec{r}, \vec{v})$ - сечение деления. Полное количество делений во всей активной зоне принято равным 100. Распределение плотности делений по кассетам приведено на рис. 3. Распределение плотности делений по высоте для нескольких кассет показано на рис. 4. Для расчета плотности делений было проведено 300000 историй; статистическая ошибка составляет не более 5%.

Основные геометрические характеристики активной зоны реактора ИБР-2

1. Высота активной зоны, мм	444±4
2. Эквивалентная высота реактора, без отражателя, мм	570
3. Число кассет с топливом	78
4. Размер кассеты под ключ, мм	26,2
5. Шаг решетки, мм	27,25
6. Толщина стенки кассеты, мм	0,4
7. Число твэлов в кассете	7
8. Наружный диаметр оболочки твэла, мм	8,6
9. Толщина оболочки твэла, мм	0,45
10. Наибольший диаметр топливной таблетки, мм	7,55
11. Плотность топлива в таблетке, г/см ³	10,0±10,3

12. Высота верхнего вольфрамового отражателя, мм	60
13. Высота газовой полости в твэле, мм	300
14. Вес топлива в твэле, не менее г	183
15. Площадь поперечного сечения активной зоны, включая область мишени, см ²	500
16. Площадь сечения мишени, см ²	45
17. Объем активной зоны, л	20

Геометрия реактора для расчета по программе TRAXY в X-Y геометрии приведена на рис. 5. Расчет проводился в S_4 -приближении для 12 энергетических групп, полученных объединением последних 15 групп из 26-групповой системы констант в одну. Число разбиений по оси X составляет 26, а по оси Y - 18. Число физических зон равно 11, и в каждой из них учитывалась анизотропия рассеяния в P_1 -приближении. Учет конечности размеров реактора по высоте производился путем добавления в полное сечение эффективного сечения поглощения:

$$\Sigma_{a,z} = \frac{\Sigma_{tr}}{3} \left(\frac{\pi}{Z_h \cdot \Sigma_{tr} + 1,4209} \right)^2,$$

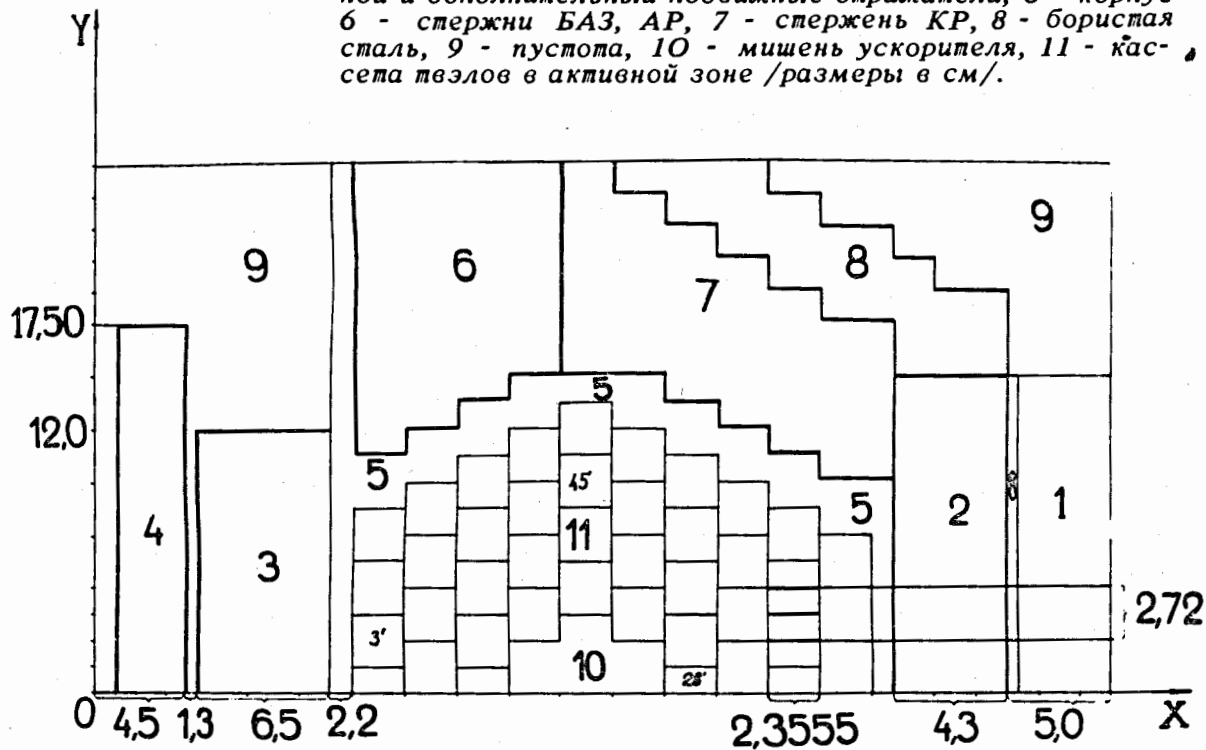
где Z_h - эффективная высота реактора /для ИБР-2 $Z_h = 57,0$ см из расчета методом Монте-Карло/, Σ_{tr} - транспортное сечение, 1,4209/ Σ_{tr} - длина экстраполяции из связанной задачи Милна.

Данные о распределении плотности потока, ценности и тока нейтронов хранятся на магнитной ленте; они использовались для расчетов реактивности и эффективной доли запаздывающих нейтронов реактора ИБР-2. Поток и ценности получены с относительной точностью $5 \cdot 10^{-4}$. Коэффициент размножения для полностью загруженной зоны $k_{эфф} = 1,068$ и получен с относительной точностью $2 \cdot 10^{-5}$. Для достижения такой точности потребовалось около 15 итераций источника и 5 часов работы ЭВМ БЭСМ-6. Рассчитанное распределение плотности потоков и ценностей по оси X /при Y=0, Z=0/ дано на рис. 6 и 7. Поток нейтронов с поверхности замед-

Таблица 1
Концентрации элементов по зонам реактора ИБР-2,
 10^{24} яд/см³

№№ ПП	Наименование Физической зоны	Э Л Е М Е Н Т							
		Pu	Na	Fe	O	N	H	B-10	B-11
1.	Активная зона	0,00983	0,00706	0,0156	0,01964	-	-	-	-
2.	Мишень	-	0,0063	0,0305	-	-	-	-	-
3.	Подвижный отражатель	-	-	0,0848	-	-	-	-	-
4.	Бористая сталь	-	-	0,0738	-	-	-	0,00103	0,0040
5.	Компенсирующие блоки	-	-	0,02025	-	0,0358	-	-	-
6.	Блок МАЭ	-	-	0,0342	-	0,0278	-	-	-
7.	Органы регулиро- вания	-	-	0,0433	-	0,0190	-	-	-
8.	Водяной замедлитель	-	-	-	0,0333	-	0,0667	-	-
9.	Корпус реактора	-	0,00581	-	0,0444	-	-	-	-
10.	Опорная плита	-	0,00645	0,0611	-	-	-	-	-
11.	Торцевой отражатель	-	0,00706	0,0256	-	0,0236	-	-	-
12.	Пустые зоны	-	-	-	0,000003	-	-	-	-

Рис. 5. Модель для расчета методом дискретных ординат.
 1 - водяной замедлитель, 2 - стержни МАЗ, 3,4 - основной и дополнительный подвижные отражатели, 5 - корпус
 6 - стержни БАЗ, АР, 7 - стержень КР, 8 - борисстая сталь, 9 - пустота, 10 - мишень ускорителя, 11 - кассета твэлов в активной зоне /размеры в см/.



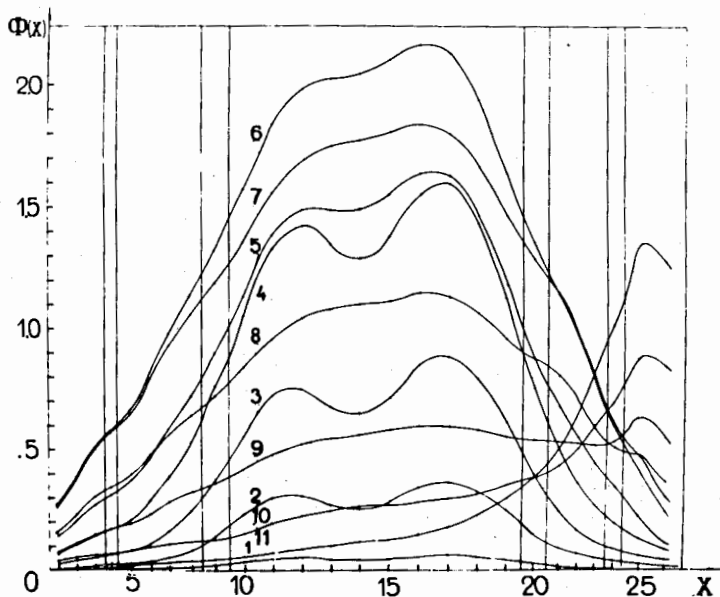


Рис. 6. Распределение потока нейтронов для 11 энергетических групп по оси X в плоскости симметрии реактора /произвольные единицы/, X - в см.

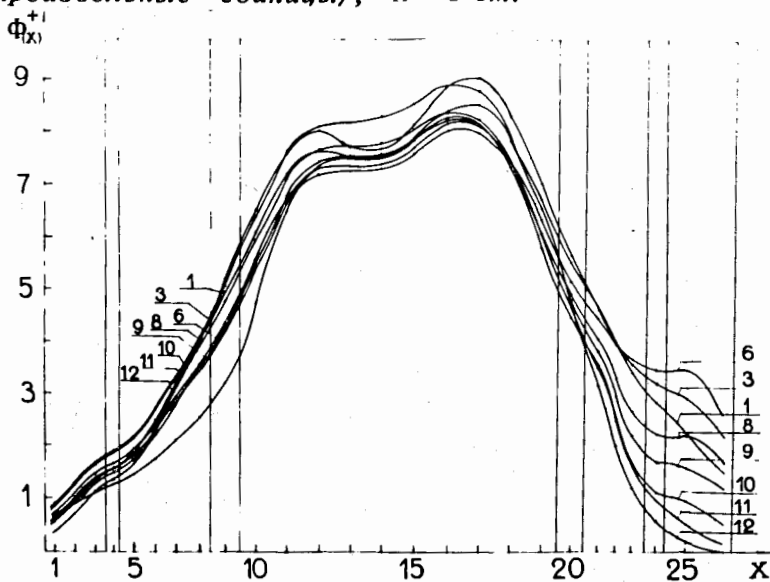


Рис. 7. Распределение ценности нейтронов для 12 групп по оси X в плоскости симметрии реактора /произвольные единицы/.

лителей ИБР-2 и распределение потока по энергии приведены на рис. 8.

Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов

Эффективная доля запаздывающих нейтронов вычислялась согласно соотношению:

$$\bar{\beta}_j = \frac{\int_V \int_E \Phi^*(\vec{r}, E) \cdot \chi_j^d(E) \cdot dE \int_{E'} \nu_j^d \cdot \Sigma_f(\vec{r}, E') \cdot \Phi(\vec{r}, E') dE' \cdot dV}{\int_V \int_E \Phi^*(\vec{r}, E) \cdot \chi(E) \cdot dE \int_{E'} \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \cdot \Phi(\vec{r}, E') dE' \cdot dV}$$

и

$$\bar{\beta}_{эфф} = \sum_{j=1}^6 \bar{\beta}_j$$

где $\Phi(\vec{r}, E)$ и $\Phi^*(\vec{r}, E)$ - прямой и сопряженный потоки, соответственно, $\chi_j^d(E)$ - энергетический спектр j -ой группы запаздывающих нейтронов; $\chi(E)$ - энергетический спектр мгновенных нейтронов; $\nu_j^d \Sigma_f(\vec{r}, E) = \sum_i \nu_{ij}^d \cdot \Sigma_{fi}(\vec{r}, E)$, где суммирование проводится по всем делящимся изотопам; ν_{ij}^d - выход запаздывающих нейтронов в j -ой группе из i -го изотопа.

Для ИБР-2 значение $\bar{\beta}_{эфф}$ получилось равным 0,002165.

Расчет эффектов реактивности

Под эффектом реактивности понимается изменение эффективного коэффициента размножения $k_{эфф}$, вызываемое каким-либо изменением в составе, размерах или ядерных свойствах реактора. Для вычисления небольших эффектов реактивности /не более $5 \div 10 \beta_{эфф}$ / обычно применяется теория возмущений первого порядка. Согласно работе /8/, имеем:

Таблица 2

Выход запаздывающих нейтронов и постоянные распада источников запаздывающих нейтронов от деления изотопов плутония

j	$\nu_{ij}^d \cdot \frac{\text{конст.}}{\text{дел.}} \times 100$		λ_j
	^{239}Pu	^{240}Pu	
1	0,024 ± 0,002	0,028 ± 0,003	0,0129 ± 0,0002
2	0,176 ± 0,009	0,237 ± 0,016	0,0311 ± 0,0005
3	0,136 ± 0,024	0,162 ± 0,046	0,134 ± 0,003
4	0,207 ± 0,012	0,314 ± 0,038	0,331 ± 0,012
5	0,065 ± 0,007	0,106 ± 0,026	1,26 ± 0,115
6	0,022 ± 0,003	0,039 ± 0,008	3,21 ± 0,255

Энергетический спектр запаздывающих нейтронов заимствован из работы /7/. Он принят одинаковым для всех групп запаздывающих нейтронов.

Таблица 3

Энергетический спектр запаздывающих нейтронов для системы констант БНАБ-26

Номер энергетической группы БНАБ-26	$\chi^d(E)$	
	^{239}Pu	^{240}Pu
4	0,035	0,036
5	0,136	0,137
6	0,346	0,347
7	0,259	0,259
8	0,145	0,143
9	0,079	0,078

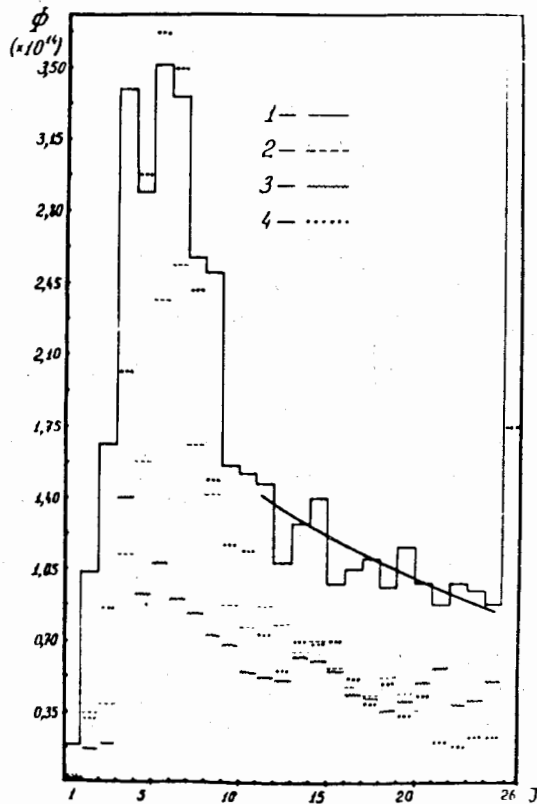


Рис. 8. Поток нейтронов с поверхности замедлителей на 1 МВт мощности реактора /нейтр/с МВт/. Группам соответствуют следующие энергетические интервалы: 1 - /6,5-10,5 МэВ/, 2 - /4,0-6,5 МэВ/, 3 - /2,5-4,0 МэВ/, 4 - /1,4-2,5 МэВ/, 5 - /0,8-1,4 МэВ/, 6 - /0,4-0,8 МэВ/, 7 - /0,2-0,4 МэВ/, 8 - /0,1-0,2 МэВ/, 9 - /46,5-100 кэВ/, 10 - /21,5-45,5 кэВ/, 11 - /10,0-21,5 кэВ/, 12 - /4,65-10 кэВ/, 13 - /2,15-4,65 кэВ/, 14 - /1,0-2,15 кэВ/, 15 - /465-1000 эВ/, 16 - /215-465 эВ/, 17 - /100 - 215 эВ/, 18 - /46,5 - 100 эВ/, 19 - /21,5 - 46,5 эВ/, 20 - /10,0-21,5 эВ/, 21 - /4,65-10,0 эВ/, 22 - /2,15-4,65 эВ/, 23 - /1,0-2,15 эВ/, 24 - /0,465-1,0 эВ/, 25 - /0,215-0,465 эВ/, 26 - /0 - 0,215 эВ/. 1 - стационарный замедлитель 5 см воды, с площади 200 см², 2 - 3 см воды после ДПО из железа, с площади 130 см², 3 - 3 см воды после ДПО из бериллия, с площади 130 см², 4 - 2 см воды после ДПО из железа, с площади 130 см².

$$\frac{\delta k}{k} = \frac{\frac{1}{k} \cdot \int_V dV \int_E dE \cdot \chi(E) \cdot \bar{\Phi}^*(\vec{r}, E) \int_{E'} dE' [\nu \Sigma_f'(E', \vec{r}) - \nu \Sigma_f(\vec{r}, E')] \bar{\Phi}(\vec{r}, E')}{\int_V dV \int_E dE \int_{\vec{\Omega}} d\vec{\Omega} (\Sigma_{tr}'(E, \vec{r}) - \Sigma_{tr}(\vec{r}, E)) \cdot \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) \cdot \phi^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega})} + \frac{\int_V dV \int_E dE \cdot \bar{\Phi}^*(\vec{r}, E) \cdot \int_{E'} dE' (\Sigma_s'(E, E') - \Sigma_s(E, E')) \cdot \bar{\Phi}(\vec{r}, E')}{\text{ЦНД}}$$

$$\text{ЦНД} = \frac{1}{k} \cdot \int_V dV \int_E dE \cdot \chi(E) \cdot \bar{\Phi}^*(\vec{r}, E) \cdot \int_{E'} dE' \cdot \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \cdot \bar{\Phi}(\vec{r}, E')$$

где значения сечений со штрихом относятся к возмущенному состоянию реактора, k - коэффициент размножения в невозмущенном состоянии $\Phi(\vec{r}, E)$ и $\Phi^*(\vec{r}, E)$ - скалярный поток и ценность нейтронов в точке \vec{r} с энергией E , $\Phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$ и $\Phi^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$ - угловой поток и ценность нейтронов в направлении $\vec{\Omega}$, $\nu \Sigma_f(\vec{r}, E)$ - макроскопическое сечение деления, умноженное на среднее число вторичных нейтронов на одно деление, $\chi(E)$ - спектр деления, $\Sigma_f(\vec{r}, E)$ - полное сечение, $\Sigma_s(\vec{r}, E, E')$ - изотропное сечение рассеяния.

Для расчета эффектов реактивности по вышеприведенной формуле, записанной в многогрупповом приближении, была составлена программа на ЭВМ БЭСМ-6. Расчет производится для реактора в двумерной X-Y геометрии. Угловой поток и ценность описывают в P_1 -приближении, предположив, что они являются линейной функцией направляющих косинусов:

$$\Phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = \bar{\Phi}(\vec{r}, E) + 3\mu \cdot I(\vec{r}, E) + 3\eta \cdot J(\vec{r}, E),$$

$$\Phi^*(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) = \bar{\Phi}^*(\vec{r}, E) + 3\mu \cdot I^*(\vec{r}, E) + 3\eta \cdot J^*(\vec{r}, E),$$

где: $I(\vec{r}, E)$, $J(\vec{r}, E)$ - токи нейтронов соответственно в направлении осей X и Y.

Потоки, токи и ценности нейтронов, заданные в ячейках конечно-разностной сетки, считаются с магнитной ленты. Согласно результатов расчета реактивностей по данной программе и по программе, использующей метод Монте-Карло ^{1/2/}, можно считать хорошим, если учесть отличие расчетных геометрий /табл. 4/. Распределение

Таблица 4

Эффекты реактивности подвижных отражателей ИБР-2

	S_i -приближение	Метод Монте-Карло
<u>Основной подвижный отражатель</u>		
Полная эффективность	—	$(2,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$ ж)
Сдвиг в направлении оси X на 1 мм	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Параметр α , 1/см ²	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$
<u>Дополнительный подвижный отражатель</u>		
Полная эффективность	—	$(0,86 \pm 0,06) \cdot 10^{-2}$
Сдвиг в направлении оси X на 1 мм	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$(1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$
Параметр α , 1/см ²	$0,5 \cdot 10^{-4}$	—

*) Получено непосредственным расчётом $k_{эфф}$; остальные результаты - по теории возмущений 1-го порядка.

реактивностей при удалении единичного объема топлива из любой точки реактора приведено на рис. 9.

С использованием вычисленных значений интегральных параметров реактора $\beta_{эфф}$ и τ /среднего времени жизни поколения нейтронов/ и эффективности подвижных отражателей была рассчитана временная зависимость потока нейтронов в ИБР-2 /см. рис. 10/.

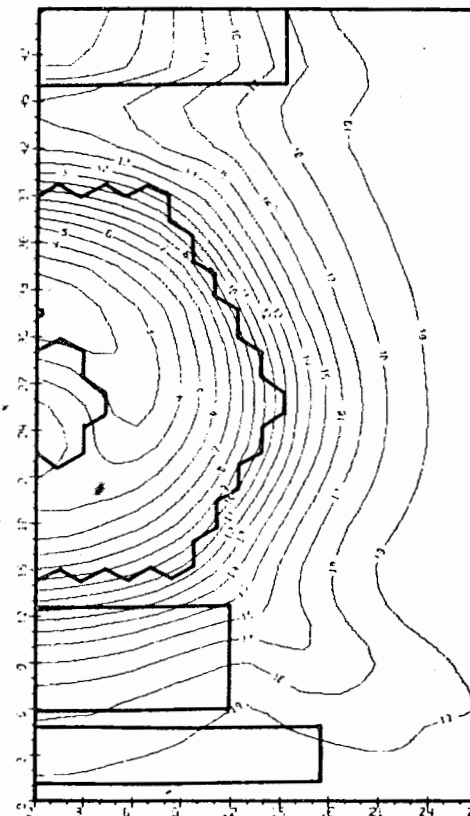
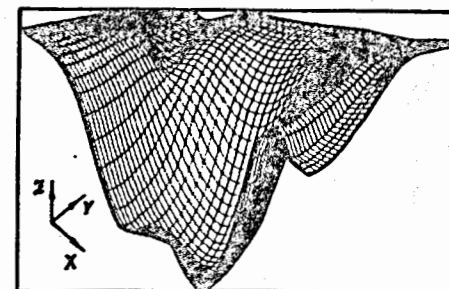


Рис. 9. Распределение реактивностей при удалении единичного объема топлива из любой точки реактора. Линии равного уровня проведены с интервалом $0,89 \cdot 10^{-4} k_{эфф}$, максимальное значение реактивности - $1,8 \cdot 10^{-3}$ 1/см².

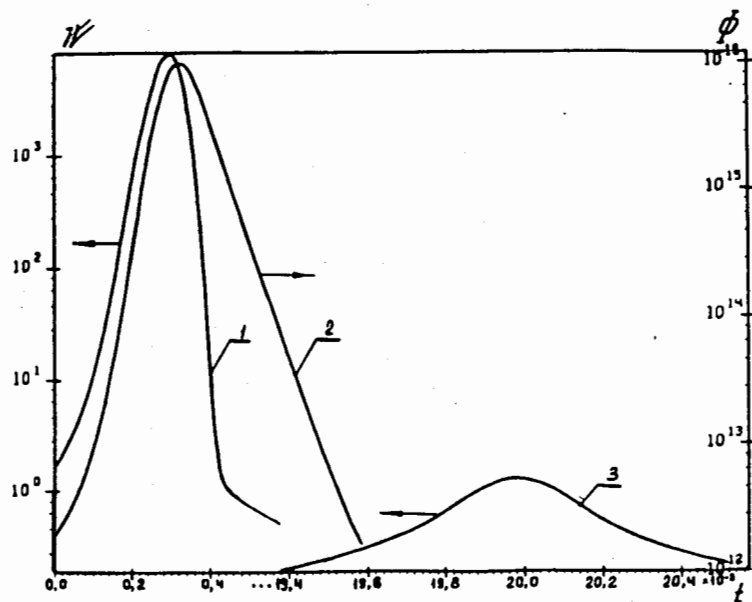


Рис. 10. Кинетика мощности ИБР-2 /форма импульса нейтронов/ за один оборот ОПО /5 с⁻¹, 4 МВт/. 1 - основной импульс быстрых нейтронов /МВт/, 2 - импульс тепловых нейтронов /нейтр/см²·с/, 3 - побочный импульс мощности; время - с /для основного импульса ось времени имеет разрыв/.

В заключение приводятся главные нейтронно-физические параметры ИБР-2, рассчитанные для рабочего варианта реактора.

Нейтронно-физические характеристики ИБР-2 /импульсные характеристики даны при частоте вспышек 5 с⁻¹/

- | | |
|---|-------------------------|
| 1. Критическая загрузка без натрия | 74±3 кассет,
96,3 кг |
| 2. Загрузка с натрием при k _{эфф} =1,06±0,02 | 78 кассет, 101,5 кг |
| 3. Полуширина импульса | 92 мкс |

- | | |
|---|---|
| 4. Количество делений в импульсе | 2,3 · 10 ¹⁶ |
| 5. Средняя мощность | 4 МВт |
| 6. Мощность в импульсе | 8300 МВт |
| 7. Энергия импульса | 0,75 МДж |
| 8. Реактивность на мгновенных нейтронах в импульсе | 1,80 · 10 ⁻³ |
| 9. Время жизни ценности нейтронов | 4 · 10 ⁻⁸ с |
| 10. Плотность потока быстрых нейтронов /E > 0,01 МэВ/ в активной зоне: | |
| а/ средняя по времени | 3 · 10 ¹⁴ нейтр/см ² ·с |
| б/ в импульсе | 6 · 10 ¹⁷ нейтр/см ² ·с |
| 11. Дифференциальная угловая плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя перпендикулярно к поверхности | |
| а/ средняя по времени | 1,35 · 10 ¹² нейтр/см ² ·с·ср |
| б/ в импульсе | 2,3 · 10 ¹⁵ нейтр/см ² ·с·ср |
| 12. Плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя | 5,8 · 10 ¹² нейтр/см ² ·с |

Литература

- В.И.Кочкин, Е.П.Шабалин. Препринт ОИЯИ, 11-4098, Дубна, 1968.
- А.Д.Рогов, Е.П.Шабалин. Сообщение ОИЯИ, 11-5619, Дубна, 1971.
- А.Д.Рогов и др. "Применение S_n-метода для расчетов реакторов на ЭВМ БЭСМ-6 с использованием 26 групповых констант в подгрупповом представлении". Сборник докладов совещания СЭВ по программам и методам расчета быстрых реакторов. Димитровград, 1-5 июля 1974 года, НИИАР, Димитровград, 1975.
- Л.П.Абагян и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.

5. В.Ф.Хохлов и др. Комплекс программ АРАМАКО для расчета групповых макро- и блокированных микросечений на основе 26-групповой системы констант в подгрупповом представлении. Ядерные константы, вып.8, ч. 3. М., ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1972.
6. Е.П.Шабалин. "Импульсные реакторы на быстрых нейтронах", М., Атомиздат, 1976.
7. М.Н.Зизин, Л.Н.Ярославцева. Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни для быстрых критических сборок. Труды советско-бельгийского симпозиума, Димитровград, февраль 1970, М., ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1970.
8. Д.Белл, С.Глестон. Теория ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 июля 1976 года.