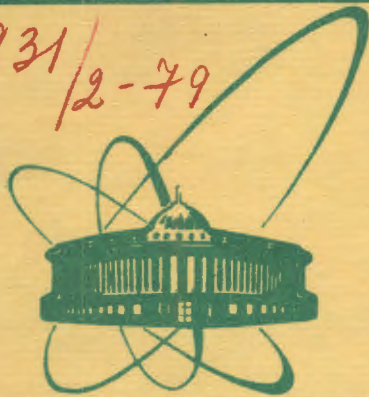


12482

4931/2-79



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

A-64

3/12-79

P13 - 12482

В.Д.Ананьев, В.А.Архипов, А.И.Бабаев, Д.И.Блохинцев,
Ю.М.Булкин, Б.Н.Бунин, Е.Д.Воробьев, Н.А.Доллежалъ,
Л.В.Едунов, В.С.Лаврухин, В.Л.Ломидзе, В.В.Мелихов,
Ю.И.Митяев, Ю.Н.Пепельшев, В.П.Пластинин,
А.Д.Рогов, В.С.Смирнов, И.М.Франк, Н.А.Хрястов,
Е.П.Шабалин, Ю.С.Язвицкий

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК ИМПУЛЬСНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИБР-2

1979

P13 - 12482

В.Д.Ананьев, В.А.Архипов, А.И.Бабаев, Д.И.Блохинцев,
Ю.М.Булкин, Б.Н.Бунин, Е.Д.Воробьев, Н.А.Доллежалъ,
Л.В.Едунов, В.С.Лаврухин, В.Л.Ломидзе, В.В.Мелихов,
Ю.И.Митяев, Ю.Н.Пепельшев, В.П.Пластинин,
А.Д.Рогов, В.С.Смирнов, И.М.Франк, Н.А.Хрястов,
Е.П.Шабалин, Ю.С.Язвицкий

АТОМНЫЙ ПУСК ИМПУЛЬСНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИБР-2

Направлено в АЭ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Ананьев В.Д. и др.

P13 - 12482

Физический пуск импульсного исследовательского реактора ИБР-2

Дается обзор и анализ основных результатов нейтронно-физических исследований при "сухом" /без теплоносителя/ пуске ИБР-2: эффективности блоков системы управления и защиты /СУЗ/ и отдельных элементов реактора, времени жизни и пространственно-энергетического распределения нейтронов, формы и продолжительности импульса, а также флуктуации мощности реактора и особенности вывода его в состояние импульсной критичности.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Ananyev V.D. et al.

P13 - 12482

Fast Pulsed Reactor IBR-2 Physical Start-Up

The main results of experimental investigation of IBR-2 reactor during its physical start-up (without cooling) are reviewed. The aspects taken into consideration are the following: the control rods and other mechanisms reactivity effects, prompt neutron generation time, space- and- energy distribution for the neutron flux, the pulse shape and its duration, power fluctuations and some aspects concerning the pulse criticality achievement. Disagreements between some measured and calculated parameters core are pointed and the ways to their elimination are cleared up, in particular the modification of the moving reflector is supposed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. ВВЕДЕНИЕ

В конце 1977 г. - начале 1978 г. в Дубне состоялся физический пуск импульсного реактора периодического действия ИБР-2, предназначенного для исследований по ядерной физике и физике конденсированных сред на выведенных пучках медленных нейтронов при средней мощности 4 МВт и максимальном потоке тепловых нейтронов не менее 10^{16} нейтр./см²с^{-1,2}. Исследования проводились без теплоносителя при средней мощности реактора не более 500 Вт как в стационарном, так и в импульсном режимах его работы.

Впервые вывод ИБР-2 в критическое состояние на западывающих нейтронах осуществлен 30.11.77 г., а импульсная критичность достигнута 13.01.78 г.

Ниже приводится обзор основных экспериментов, проведенных при физическом пуске ИБР-2.

2. КРИТИЧЕСКАЯ СБОРКА

Перед загрузкой топливных кассет /ТК/ все ячейки активной зоны были заполнены кассетами-имитаторами, отличавшимися от топливных только тем, что сердечники в них изготовлены из меди вместо двуокиси плутония. В центре активной зоны устанавливался полоний-бериллиевый источник интенсивностью $\sim 10^7$ нейтр./с. Для контроля нейтронного потока использовалась штатная пусковая аппаратура с тремя камерами деления на уране-235, которые размещались вне реактора на расстоянии 1150 мм от его центра /1 на рис. 1/, а также два дополнительных экспериментальных канала с заменяемыми детекторами, устанавливаемыми как в ИХЗ /12 на рис. 1/, так

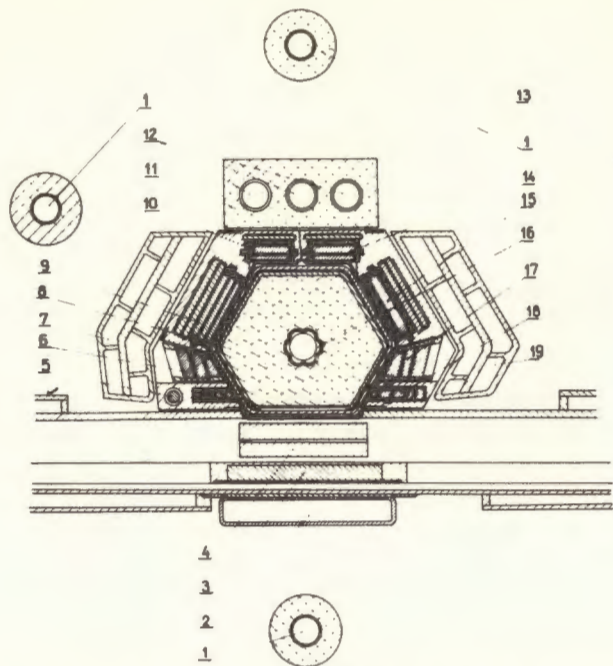


Рис. 1. Поперечное сечение ИБР-2. 1 - штатные камеры деления, 2 - водяной замедлитель за подвижным отражателем /ПО/, 3 - бериллиевый вкладыш дополнительного подвижного отражателя /ДПО/, 4 - лопасть основного подвижного отражателя /ОПО/, 5 - стержень автоматического регулятора /АР/, 6 - блок быстродействующей аварийной защиты /БАЗИ/, 7 - водяной замедлитель за компенсирующим органом реактивности /КОИ/, 8 - активная зона, 9 - блок КОИ, 10 - блок медленной аварийной защиты /МАЗИ/, 11 - блок-имитатор холодного замедлителя /ИХЗ/, 12 - экспериментальные камеры, 13 - замедлитель штатных камер, 14 - блок МАЗ, 15 - блок КО, 16 - экспериментальная камера в канале мишени, 17 - блок БАЗ, 18 - блок промежуточного регулятора /ПР/, 19 - водяной замедлитель за КО.

и в активной зоне /16/. Скорость счета штатных и экспериментальных детекторов при загрузке в зону имитаторов составляла от 5 до 50 имп/с. Кроме того, для линейного контроля мощности использовался экспериментальный токовый канал с борной камерой в ИХЗ, аналоговым реактиметром и самопишущими потенциометрами.

Загрузка топлива в активную зону проводилась путем последовательной замены имитаторов на ТК, которые загружались в порядке уменьшения их расчетной эффективности. Поэтому экстраполяция кривой обратного счета всегда указывала на величину критической массы, меньшую фактической, что обеспечивало дополнительную безопасность пусковых работ /рис. 2/. Критическое состояние достигалось для двух вариантов загрузки активной зоны /рис. 3/: центрального /70 ТК/ и "периферийного" /74 ТК/. Расчетная критическая загрузка этих вариантов 71 ± 2 и 75 ± 2 ТК соответственно.

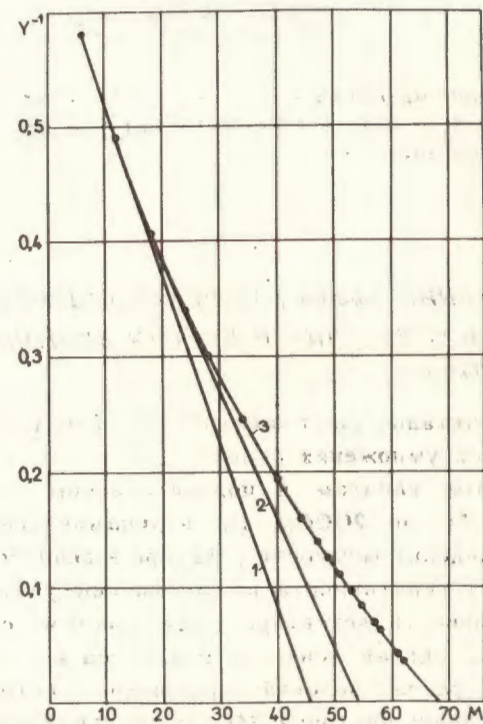


Рис. 2. Зависимость обратного умножения (Y^{-1}) от числа загруженных ТК (M): 1 и 2 - экстраполяция на начальных этапах загрузки.

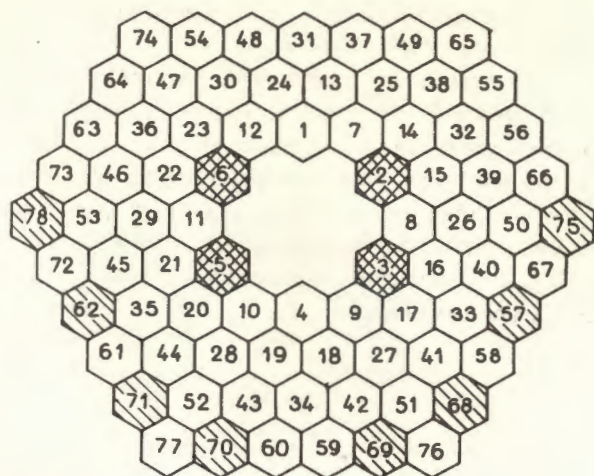


Рис. 3. Картограмма критической загрузки реактора. \circ и \bullet - ячейки с ТК для центральной загрузки, \square и \blacksquare - ячейки с ТК для периферийной загрузки.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ БЛОКОВ "СУЗ", "ПО" И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРА

Эффекты реактивности элементов ИБР-2 измерялись как методом обратного умножения скорости счета по пусковым и экспериментальным каналам в подкритическом состоянии /при умножении от 50 до 2000/, так и динамическими методами в процессе изменения мощности реактора в диапазоне до 100 Вт. При измерениях реактивности по умножению учитывалась разная чувствительность детектора к нейтронам источника и нейтронам деления, разная ценность нейтронов источника и нейтронов деления, распад полоний-бериллиевого источника и вклад спонтанного деления плутония-240. Последний фактор определялся экспериментально.

Измерение реактивности динамическими методами осуществлялось аналоговым реактиметром, а также путем регистрации сигналов камер на самопишущем потенциометре или шлейфовом

осциллографе с последующей обработкой данных на ЭВМ. В некоторых случаях реактивность определялась по установившемуся периоду разгона. Дифференциальная эффективность блоков СУЗ измерялась методом перекомпенсации.

Из анализа данных по измерению эффективности одних и тех же участков КО в динамических и подкритических экспериментах следует, что относительное расхождение результатов не превышает 5%, что меньше погрешности каждого из этих методов $\pm 5\%$ для динамических методов и $\pm 15\%$ для метода обратного умножения/. Необходимо отметить, что результат измерения эффекта реактивности зависит от положения детектора. Так, полная эффективность блока МАЗ /14 на рис. 1/, измеренная с помощью камеры в ИХЗ /12/, оказалась в 1,5 раза выше эффективности, измеренной камерой, находящейся в центре активной зоны. Напротив, оценка эффективности блоков КО и ПО /4,9,15 на рис. 1/ по штатным камерам, находившимся за этими блоками, была ниже эффективности, измеренной другими камерами. Причина этого эффекта - локальные возмущения потока и спектра нейтронов.

Наиболее полные измерения проводились при периферийной загрузке ТК /см. табл. 1 и 2/.

Таблица 1

Эффективности блоков СУЗ

Блоки СУЗ	Полная, $10^{-2} K_{эфф}$	Дифференциальная, $10^{-4} K_{эфф} / мм$
КО- I	1,50+0,12	0,50+0,03
КО- II	1,55+0,12	0,52+0,03
ПР	0,26+0,02	0,11+0,01
АР	0,032+0,002	0,011+0,001
БАЗ/один блок/	0,14+0,01	
МАЗ/один блок/	0,60+0,06	

При центральной загрузке ТК эффективности блоков КО и МАЗ почти на 10% меньше, а эффекты реактивности ПО почти на столько же больше /табл. 3/. Это объясняется тем, что при

Таблица 2

Эффекты реактивности ПО при периферийной загрузке ТК *

Поло- жение ПО \ Пара- метр	$\Delta K_{\text{опо}} \cdot 10^2$	$\alpha \cdot 10^4$, град ⁻²	$\Delta K_{\text{дпо}} \cdot 10^2$	$\alpha_{\text{дпо}} \cdot 10^4$, град ⁻²	Погрешность, %	
					$\sigma_{\Delta K}$	σ_{α}
ДПО в ф.ц.	1,76	1,01	-	-	3	1
ДПО выведен	2,09	1,6	-	-	2	1
ОПО в ф.ц.	-	-	0,39	0,1	2	20
ОПО выведен	-	-	0,72	-	2	-

* О коэффициенте α см. ниже.

Таблица 3

Эффекты реактивности ПО ИБР-2 при центральной загрузке ТК

Поло- жение ПО \ Пара- метр	$\Delta K_{\text{опо}} \cdot 10^2$	$\alpha \cdot 10^4$, град ⁻²	$\Delta K_{\text{дпо}} \cdot 10^2$	$\alpha_{\text{дпо}} \cdot 10^4$, град ⁻²	Погрешность, %	
					$\sigma_{\Delta K}$	σ_{α}
ДПО в ф.ц.	2,04	1,4	-	-	2	10
ДПО выведен	2,41	-	-	-	1	-
ОПО в ф.ц.	-	-	0,45	-	2	-
ОПО выведен	-	-	0,82	0,4	2	12

центральной загрузке /рис. 3/ физический центр /ФЦ/ активной зоны отстоит дальше от КО и МАЗ и смещен в сторону ПО.

Измеренные полные эффективности блоков в 1,5÷2 раза меньше проектных значений. Расхождение объясняется тем, что в расчетах не были учтены некоторые детали конструкции блоков.

Полученные результаты по эффективности регуляторов удовлетворительны; эффективность же МАЗ недостаточна для работы реактора на номинальной мощности, так как эффективность одного блока МАЗ меньше температурного эффекта реактивности. К энергетическому пуску реактора эффективности блоков СУЗ будут увеличены за счет небольшого изменения их конструкции. Рис. 4 дает представление о скорости срабатывания БАЗ. За время 0,02 с после сигнала на сброс одним блоком БАЗ выводится реактивность $8 \cdot 10^{-4} \Delta K/K$, хотя полная эффективность блока заметно выше /см. табл. 1/. В импульсном режиме работы реактора срабатывание одного блока БАЗ приведет к мгновенному уменьшению энергии импульса приблизительно в 50 раз.

Экспериментальная оценка влияния внешних водородсодержащих замедлителей, которые используются для формирования спектра в пучках нейтронов, на эффективность блоков СУЗ показала, что наибольшее влияние оказывает замедлитель со стороны блока МАЗ /ИХЗ на рис. 1/. При удалении блока ИХЗ эффективность МАЗ увеличивается на 20%, а эффективность КО на столько же уменьшается. Замедлители /7 и 19 на рис. 1/ практически не влияют на эффективности блоков СУЗ.

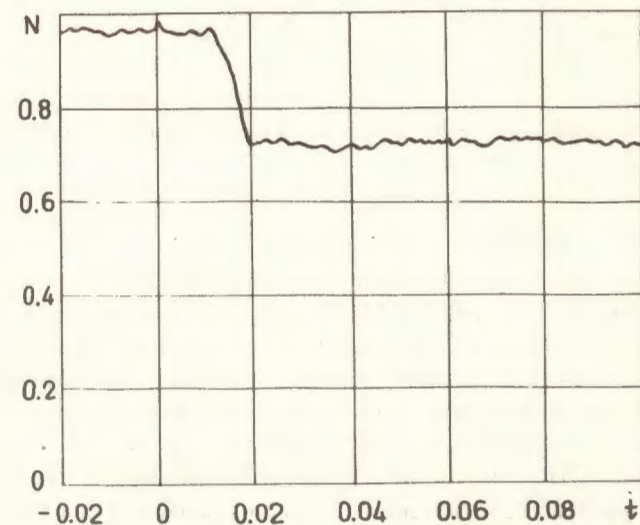


Рис. 4. Оциллограмма мощности ИБР-2 при сбросе одного блока БАЗ. Время t /с/ отсчитывается от сигнала на сброс.

ОПО и ДПО ИБР-2 /см. рис. 1 и 5/ служат для периодической модуляции реактивности с частотой 50 и 5 Гц и создания тем самым импульсов мощности. Поэтому измерению их эффектов реактивности уделялось особое внимание. При измерении угловой зависимости реактивности ИБР-2 от поло-

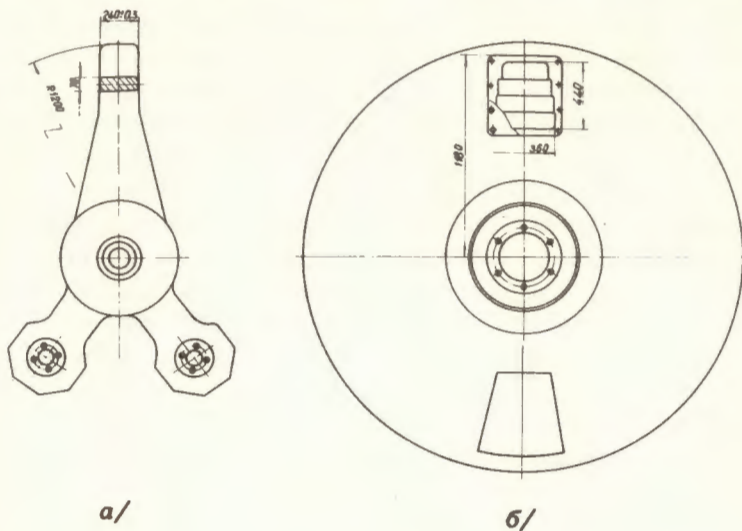


Рис. 5. Основной /а/ и дополнительный /б/ подвижные отражатели ИБР-2.

жения ПО вращение ПО осуществлялось со скоростью 0,03-0,04 град/с, а положение контролировалось с погрешностью не более 0,07 град для ОПО и 1 град для ДПО.

Помимо упомянутой выше зависимости эффектов реактивности ПО от загрузки активной зоны весьма значительным оказалось влияние положения одного из отражателей на эффективность другого /табл. 2 и 3/. Причина этого - в затенении ДПО основным ПО. Особенно сильно теневой эффект сказывается на коэффициенте параболы α , описывающей ход реактивности при смещении ОПО на малые углы $\pm 3^\circ - 4^\circ$ относительно ФЦ:

$$\xi(\phi) = \xi_m - \alpha\phi^2 \quad /1/$$

Величина α оказалась в 3-4 раза меньше расчетного значения, которое было получено без учета влияния ДПО. Вывод бериллиевого вкладыша /собственно ДПО/ от реактора даже на небольшой угол /более 5° / уже приводит к росту α . Следовательно ожидать, что при удалении ДПО вместе с алюминиевым диском α должно приблизиться к расчетному значению. Действительно, в специальных экспериментах с макетом ОПО было получено $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-2}$, а полная эффективность ОПО оказалась практически равной расчетному значению $2,65 \cdot 10^{-2} \Delta K/K$ /см. рис. 6/.

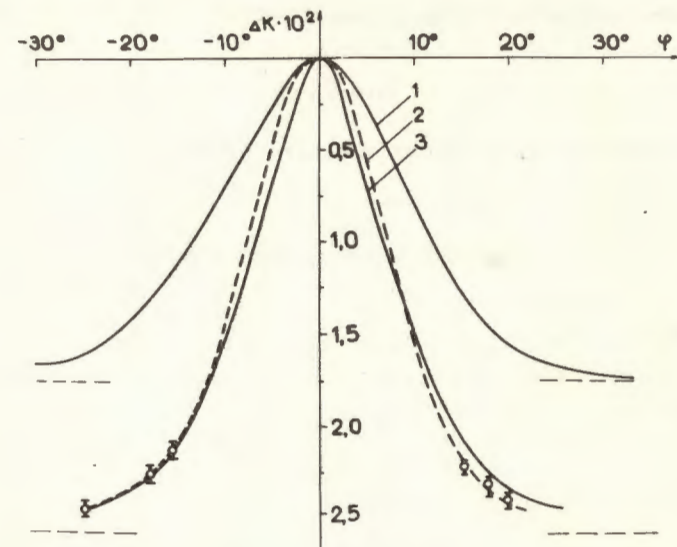


Рис. 6. Зависимость реактивности ИБР-2 от угла поворота ОПО со штатным ДПО /кривая 1/, без ДПО /2/ в сравнении с измерениями на стенде БФС /2/ /кривая 3/.

Из других измеренных эффектов ПО следует назвать величину $(dK/dX)_{\text{ОПО}}$ - изменение реактивности при осевом смещении ОПО, которая определяет влияние вибраций ротора ОПО на флуктуации мощности:

$$(dK/dX)_{\text{ОПО}} = /4,5 \pm 0,3/ \cdot 10^{-4} \text{ 1/мм.}$$

Измеренная дифференциальная эффективность при отодвигании всей машины ПО от активной зоны

$$(dK/dX)_{MP} = /9,0 \pm 0,3/ \cdot 10^{-4} \text{ 1/мм,}$$

а полный эффект - около $0,06 K_{эфф}$. Заметным оказался эффект реактивности противовеса ОПО /см. рис. 5/. Он составил $0,006 K_{эфф}$.

При измерении эффектов реактивности ТК и их имитаторов /см. табл. 4/ неожиданно высокой оказалась эффективность имитаторов на периферии активной зоны. Эксперименты по измерению эффективности металлических образцов в области

Таблица 4

Эффективности ТК и кассет-имитаторов ИБР-2, $10^{-2} K_{эфф}$

№ ячейки	ТК	Кассета-имитатор
1	1,16 \pm 0,04	0,13 \pm 0,02
4	1,21 \pm 0,04	0,10 \pm 0,02
5	1,20 \pm 0,04	0,10 \pm 0,02
8	1,16 \pm 0,03	-
14	1,07 \pm 0,02	0,09 \pm 0,02
20	1,28 \pm 0,05	0,10 \pm 0,02
31	0,99 \pm 0,02	0,28 \pm 0,04
35	1,18 \pm 0,05	0,15 \pm 0,02
58	0,96 \pm 0,03	0,31 \pm 0,04
59	1,02 \pm 0,03	0,30 \pm 0,03
61	1,07 \pm 0,03	0,30 \pm 0,03
63	0,92 \pm 0,03	0,27 \pm 0,03
74	0,78 \pm 0,04	0,26 \pm 0,03
75	0,65 \pm 0,03	0,20 \pm 0,03
77	0,86 \pm 0,03	0,27 \pm 0,03

ПО подтвердили предположение о сравнительно большой эффективности меди в спектре ИБР-2. Эффективности образцов стали, меди, вольфрама и бериллия одинакового объема относятся как 1:1,42:1,5:1,8 соответственно.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ

Среднее время жизни поколения мгновенных нейтронов в реакторе τ во многом определяет длительность импульса мощности на половине высоты, которую для ИБР-2 можно вычислить по формуле:

$$\theta \sim 1,4 (\tau / \alpha v^2)^{1/3}, \quad /2/$$

где v - скорость вращения ОПО.

Измерение τ проводилось четырьмя независимыми методами: методом Росси-а, по флуктуациям мощности в стационарном режиме, по флуктуациям мощности в импульсном режиме и по форме импульса мощности ^{/3,4/}. Наименьшую погрешность имели измерения методом Росси-а: $/83 \pm 2/$ нс. Среднее значение τ , полученное по соотношению:

$$\bar{\tau} = \sum_i \tau_i \sigma_i^{-2} / \sum_i \sigma_i^{-2}, \quad /3/$$

где τ_i и σ_i - среднее значение и дисперсия τ в i -ом методе, с учетом возможной систематической погрешности, составило $/80 \pm 10/$ нс.

Большое отличие экспериментальной величины τ от рассчитанной методом Монте-Карло $/43 \text{ нс}/^{1/}$ объясняется, главным образом, влиянием диска ДПО, ИХЗ и кожуха ПО, которые не учитывались в расчетах. В результате Росси-а измерений, выполненных без этих элементов, получено значение $\tau = 47 \text{ нс}$.

5. СПЕКТР И ПОТОК НЕЙТРОНОВ ВО ВНЕШНИХ ПУЧКАХ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

Спектр быстрых и резонансных нейтронов измерялся по активации пороговых детекторов с последующим восстановлением исходного энергетического распределения нейтронов на ЭВМ^{5/}. В промежуточной части спектра получено удовлетворительное согласие с данными расчета /рис. 7/. Плотность потока тепловых нейтронов, измеренная на внешней поверхности замедлителя по активации медных и золотых индикаторов, оказалась в два раза выше расчетного значения $1,5 \cdot 10^6$ нейтр./см²с Вт.

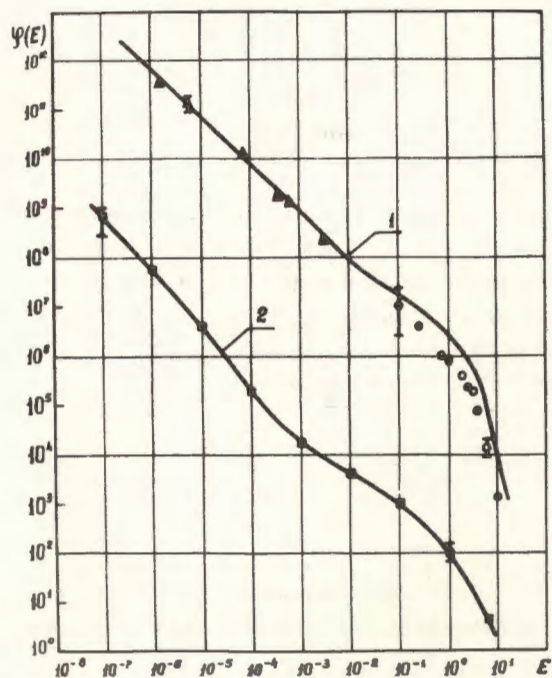


Рис. 7. Спектр нейтронов /нейтр./см²с МэВ Вт/ во внешнем пучке ИБР-2. 1 - на поверхности замедлителя, 2 - на расстоянии 8 м от поверхности замедлителя. Точки - эксперимент, кривые - расчет.

Распределение мощности в активной зоне определялось по гамма-активности продуктов деления. Активность кассет измеряли спустя 2 месяца после облучения. Измеренное в эксперименте распределение в основном соответствует проектным данным; коэффициенты неравномерности распределения мощности по высоте и объему активной зоны составили 1,3 и 1,6 соответственно. Наибольшие локальные отклонения измеренных и рассчитанных распределений находятся в области активной зоны, примыкающей к ПО /до 20%/ , что, по-видимому, обусловлено несимметричным расположением ПО, а также попаданием в активную зону медленных нейтронов из замедлителя.

6. ВЫХОД НА ИМПУЛЬСНУЮ КРИТИЧНОСТЬ

Выход реактора в критическое состояние в импульсном режиме имеет особенности по сравнению с достижением критичности на запаздывающих нейтронах в стационарном режиме. Отношение средней мощности подкритического импульсного реактора к мощности внешнего источника определяется выражением^{4/}:

$$Y = \frac{W}{S_0} = \frac{1}{\beta} \frac{K_{и}}{1 - K_{и}}, \quad /4/$$

где $K_{и}$ - так называемый импульсный коэффициент размножения нейтронов, сложным образом зависящий от максимального значения ϵ_m реактивности на мгновенных нейтронах /см. /1//. Величина $K_{и} = 1$, когда $\epsilon_m = \epsilon_{m_0}$, где ϵ_{m_0} - равновесная импульсная надкритичность, и $K_{и} \ll 1$, когда $\epsilon_m < 0$. Экстраполяция на критичность по обратному умножению $Y^{-1} = S_0/W$ средней мощности /т.е. при измерении средней скорости счета детекторов/ в импульсном реакторе дала бы переоценку подкритичности, так как $Y^{-1}(\epsilon_m)$ имеет отрицательную вторую производную по реактивности ϵ_m .

Средняя мощность реактора W складывается из двух компонентов: W_0 - мощности, выделяемой в импульсах, и W_{ϕ} - мощности, выделяемой между импульсами. Соответственно можно ввести понятия умножения в импульсе $Y_0 = W_0/S_0$ и умножения в фоне $Y_{\phi} = W_{\phi}/S_0$.

Наиболее безопасная и точная экстраполяция на критичность обеспечивается при измерении обратного умножения $Y_0^{-1} = S_0 / W_0$. При этом мощность W_0 измеряется по регистрации скорости счета детекторов, периодически включаемых на время основного импульса, причем длительность включения детекторов T должна быть равна времени, в течение которого вводимая ОПО реактивность описывается параболой /1/. В области ниже уровня критичности на мгновенных нейтронах /точнее, при $\epsilon_m < -10^{-3}$ / умножение в импульсе

$$Y_0(\epsilon_m) = \frac{1}{1 - K_{И}} \frac{2n}{\sqrt{|\epsilon_m|} a v^2} \operatorname{arctg} \left(\frac{T}{2} \sqrt{a v^2 / |\epsilon_m|} \right), \quad /5/$$

где n - частота следования импульсов, а в области глубокой подкритичности ($|\epsilon_m| \gg a v^2 T^2$)

$$Y_0(\epsilon_m) = \frac{nT}{1 - K_{И}} \cdot \frac{1}{|\epsilon_m|} \approx 1 / |\epsilon_m|. \quad /5a/$$

Из /4/ и /5/ следует, что мощность в импульсе W_0 сильнее зависит от ϵ_m , чем средняя мощность $W / K_{И}(\epsilon_m)$ - очень слабая функция ϵ_m при $\epsilon_m < 0$ /. Кроме того, для импульсного режима характерна следующая интересная особенность: экстраполированным из области глубокой подкритичности состоянием реактора является критичность на мгновенных нейтронах: $\epsilon_m = 0$ /см. /5a//.

Вывод реактора в критическое состояние ($\epsilon_m = \epsilon_{m_0} \sim 10^{-8} K_{эфф}$) осуществлялся следующим образом. Сначала, при выведенных блоках СУЗ, запускался модулятор реактивности. После достижения номинального числа оборотов ПО приводилась в готовность АЗ реактора. Затем ступенями вводились КО. После каждого увеличения реактивности измерялась скорость счета в импульсе за время $T = 500$ мкс, т.е. умножение Y_0 , и оценивалось положение КО, соответствующее ожидаемой критичности.

При частоте импульсов 5 Гц, когда вращаются оба ПО, и малом умножении Y_0 проводилась грубая синхронизация роторов путем нахождения такой фазы вращения ДПО в импульсе, которая соответствовала максимуму скорости счета. Окончательно синхронизация устанавливалась в критическом состоянии.

Получено хорошее согласие измеренных и расчетных значений функции $Y_0^{-1}(\epsilon_m)$ /рис. 8/. Расчетные зависимости /сплошные линии на рис. 8/ получены на основании соотношения /5/ с использованием измеренного значения α . Небольшое отклонение экспериментальных точек Y_0^{-1} от расчетных, по-видимому, обусловлено смещением во времени импульса мощности и момента включения детекторов.

Импульсный режим был осуществлен только при периферийной загрузке ТК.

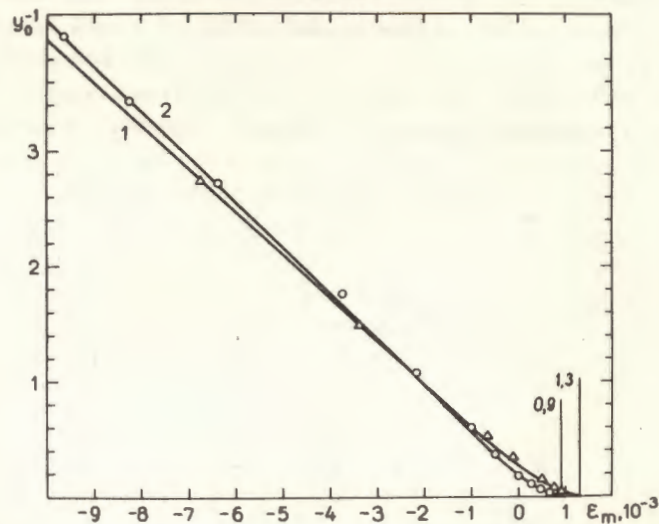


Рис. 8. Зависимость обратного умножения в импульсном режиме от реактивности на мгновенных нейтронах. Сплошные линии - расчет, точки - эксперимент при частоте 5 /кривая 1/ и 50 Гц /2/ соответственно.

7. ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА МОЩНОСТИ

Форма импульса мощности ИБР-2 является одной из его основных характеристик, определяющей, наряду с интенсивностью потока нейтронов, эффективность реактора как источника нейтронов для нейтронной спектроскопии по времени пролета.

Форма вспышки быстрых нейтронов измерялась детально, в различных состояниях реактора двумя методами - счетным с помощью многоканального временного анализатора и токовым путем регистрации сигнала детектора от индивидуального импульса мощности на экране запоминающего осциллографа. Детекторами быстрых нейтронов служили: камера деления с ураном-238 в активной зоне, ториевая камера на выведенном нейтронном пучке и располагавшийся там же пластиковый сцинтиллятор с фотоумножителем.

В процессе выхода на критичность форма импульса измерялась счетным методом. При подкритичности 1 и 2% длительность импульса на половине высоты θ оказалась равной соответственно 720 и 824 мкс. При критичности по мгновенным нейтронам в максимуме реактивности - 240 мкс. Расчетное значение θ ,

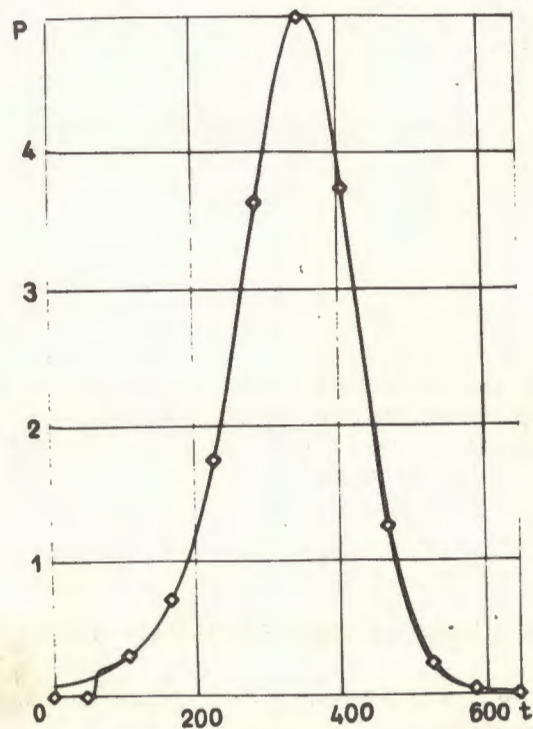


Рис. 9. Измеренная и расчетная формы импульса мощности ИБР-2 при частоте 50 Гц.

полученное с использованием экспериментальных данных по α и τ , равно 244 мкс в состоянии мгновенной критичности.

В состоянии импульсной критичности измерения проводились, главным образом, токовым методом, который в данном случае точнее счетного /погрешность не более 2%/ . При частоте вспышек мощности 50 Гц/ ДПО неподвижен/ θ для быстрых нейтронов составила 220 мкс, а при частоте 5 Гц - 198 мкс. Значительное превышение измеренного значения θ над проектным /92 мкс для 5 Гц/ обусловлено отличием фактических α и τ от расчетных. Численное решение одноточечного уравнения реактора с экспериментальными α и τ , дает форму импульса, практически совпадающую с измеренной /рис. 9/.

Очевидно, что удлинение импульса вызывают те элементы конструкции реактора, которые существенно влияют на α и τ . Установлено, что наибольшее влияние оказывает ДПО. При частоте импульсов 50 Гц измерялась зависимость θ от положения ДПО. На рис. 10 за нуль принято положение ДПО в ф.д., т.е. положение, соответствующее наибольшей реактивности. Вывод ДПО из зоны приводит к сильному сокращению длительности

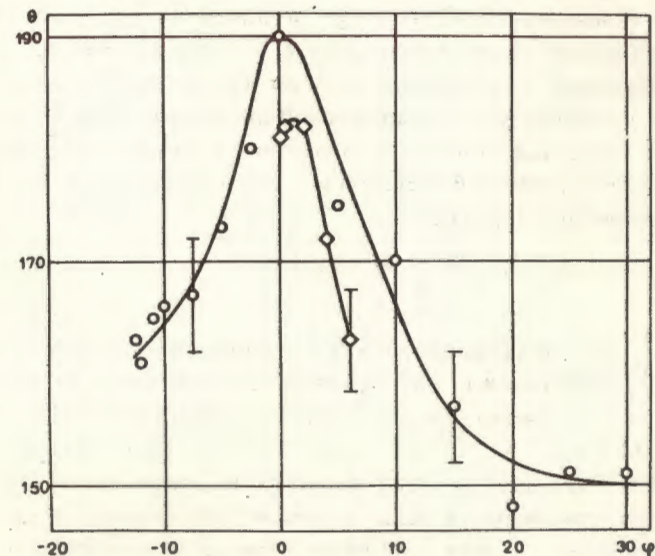


Рис. 10. Зависимость длительности импульса мощности ИБР-2 θ от положения ДПО ϕ при частоте 50 Гц. \circ - замедлитель за ДПО отсутствует, \diamond - отсутствуют все замедлители.

сти вспышки - со 190 до 150 мкс. В специальных экспериментах было установлено, что это происходит главным образом из-за увеличения α ОПО и частично - из-за сокращения τ . Длительность вспышки заметно сокращается также при удалении внешних замедлителей. Замедлитель за ДПО увеличивает θ на 30 ± 4 мкс, а замедлитель за блоками МАЗ - на 8 ± 4 мкс.

8. ФЛУКТУАЦИИ МОЩНОСТИ ИБР-2 В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Вследствие высокой чувствительности импульсного реактора к изменению реактивности во время физического пуска подробно исследовался характер флуктуаций мощности, а также их корреляция с другими случайными процессами, влияющими на реактивность /вибрации ПО и др./. Сбор данных осуществлялся путем записи дискретных сигналов датчиков на магнитную ленту. Записанная информация обрабатывалась на ЭВМ с помощью специальной программы для анализа стационарных случайных процессов в импульсном реакторе периодического действия. При низкой средней мощности реактора /менее 10 Вт/ преобладают стохастические флуктуации энергии импульса^{4/}. Экспериментальная зависимость относительной дисперсии энергии импульса Δ_{qz}^2 от обратной мощности реактора W^{-1} в соответствии с теорией имеет линейный характер /рис. 11/ и при $W > 0,5$ Вт аппроксимируется функцией

$$\Delta_{qz}^2 \left(\frac{1}{W} \right) = \Delta_{qz}^2(0) + \frac{750 \pm 50}{W} \cdot 10^{-4}, \quad /6/$$

где $\Delta_{qz}^2(0)$ - экстраполированное значение дисперсии, характеризующее флуктуации, обусловленные отклонениями реактивности из-за колебаний элементов конструкции реактора. При частоте 50 Гц $\Delta_{qz}^2(0) = 3 \pm 2 \cdot 10^{-4}$, а при частоте 5 Гц - $5 \pm 2 \cdot 10^{-4}$. Стохастические флуктуации достигают максимума в области критичности на мгновенных нейтронах $W = 0,02$ Вт; $\Delta_{qz \max}^2 = 0,30$. Все эксперименты по исследованию $\Delta_{qz}^2(0)$ проводились на мощности 300 Вт, что позволяло не учитывать стохастические флуктуации энергии импульса. Оказалось, что доминирующий вклад в $\Delta_{qz}^2(0)$ вносят поперечные смещения

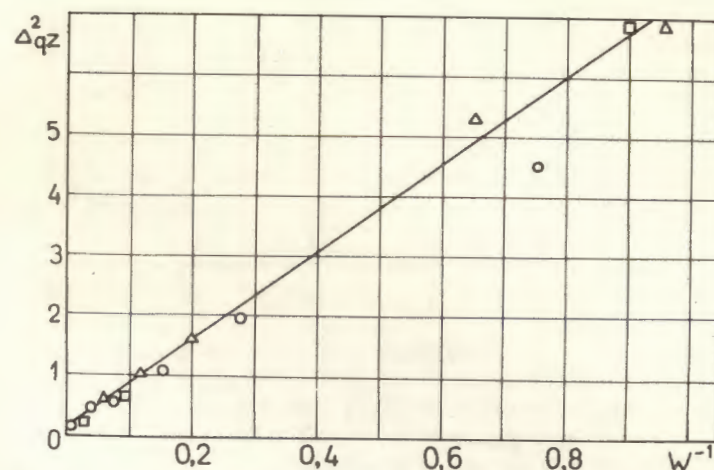


Рис. 11. Зависимость относительной дисперсии энергии импульса Δ_{qz}^2 от обратной средней мощности реактора W^{-1} . Δ - при частоте 50 Гц и наличии водяных замедлителей, \circ - при частоте 50 Гц и отсутствии водяных замедлителей, \square - при частоте 5 Гц. Сплошная линия - аппроксимация по формуле /6/.

ОПО. Из рис. 12, где приведены результаты спектрально-корреляционного анализа, видно, что ответственным за взаимную корреляцию между энергией импульса и смещением ОПО является резонансный пик /в спектре частот колебаний ОПО/ при частоте 16 Гц, составляющей точно 1/3 от частоты вращения ОПО. Именно такое передаточное число имеет редуктор ОПО, который, по-видимому, и является источником колебаний ротора, и, соответственно, мощности реактора. Однако обусловленные этими колебаниями флуктуации мощности импульса весьма малы /~ 2%/. Подобный спектрально-корреляционный анализ проводился и для других процессов, влияющих на мощность реактора. В результате этих исследований установлено:

а/ колебания скорости вращения ОПО и соответствующие им флуктуации мощности очень малы - относительное стандартное отклонение не превышает 0,2%.

б/ Циркуляция воды в замедлителях приводит к флуктуациям реактивности, не превышающим $5 \cdot 10^{-6} \Delta K / K$, что соответствует флуктуациям мощности ~ 2,5%. Большая часть спектра колебаний находится в области низких частот $f < 0,5$ Гц/.

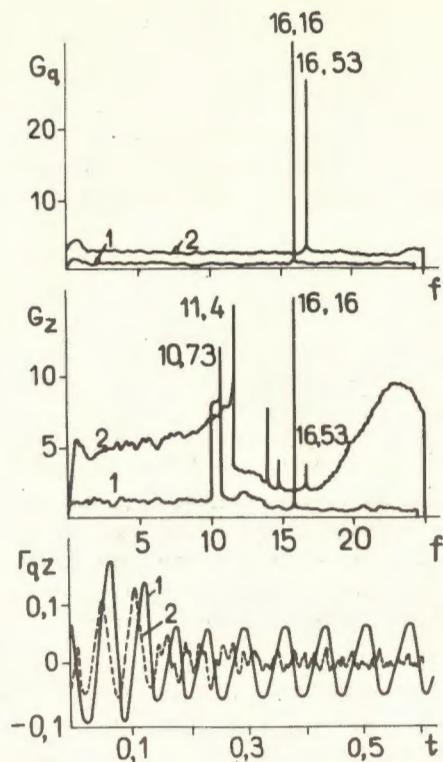


Рис. 12. Спектральные плотности энергии импульса G_q и поперечных смещений ОПО G_z и взаимная корреляционная функция Γ_{qz} процессов q и z . 1 - при частоте 48,5 Гц, 2 - при частоте 49,6 Гц, t - время между импульсами, с.

в/ При работе реактора с частотой импульсов 5 Гц, когда вращается также и ДПО, появляются дополнительные флуктуации мощности из-за крутильных колебаний диска ДПО, которые носят почти периодический характер. Обусловленный ими разброс амплитуд импульсов мощности - не более 0,4%. Характер колебаний ОПО в режиме 5 Гц существенно отличается от режима 50 Гц.

Нейтронно-физические исследования при "сухом" /без теплоносителя/ пуске в целом подтвердили возможность реализации основных проектных характеристик ИБР-2 как источника нейтронов для физических исследований. Отличие некоторых фактических параметров в основном обусловлено неучетом в расчетах

вспомогательных элементов конструкции реактора. По результатам физического пуска намечены и реализуются мероприятия по дальнейшему улучшению характеристик реактора.

В заключение авторы статьи выражают глубокую благодарность всем коллективам и отдельным сотрудникам, участвовавшим в подготовке и проведении физического пуска реактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, №5, с.17.
2. Ананьев В.Д. и др. АЭ, 1971, т.31, вып. 4, с.352.
3. Кипин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. Атомиздат, М., 1967.
4. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Атомиздат, М., 1976.
5. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Материалы I Всесоюзной школы. Рига, 22 ноября - 3 декабря, 1976, т.1,2, М., 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 мая 1979 года.