

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренко В. А. Вопросы безопасности работы реакторов ВВЭР. М., Атомиздат, 1977.
2. Ortega J., Johnson C., Baskin K. «Nucl. Safety», 1970, v. 11, N 2, p. 142.
3. Овчинников Ф. Я. и др. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов М., Атомиздат, 1977.
4. Howard D. Patent USA, N 2. 841.73, 1958.
5. Цыпин С. Г. и др. В кн.: Тезисы докл. Всесоюз. научной конф. по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок М., изд. МИФИ, 1974, с. 103.
6. Рымаренко А. И. Болберов А. А., Лысенко В. В. В кн.: Труды Всесоюз. теплотехн. ин-та. Вып 2. М., «Энергия», 1974, с. 31.
7. Бычков Я. А. и др. В кн.: Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып. 3. М., Атомиздат, 1977, с. 141.

УДК 621.039.526.621.039.55

## Физический пуск импульсного исследовательского реактора ИБР-2

АНАНЬЕВ В. Д., АРХИПОВ В. А., БАБАЕВ А. И., БЛОХИНЦЕВ Д. И., БУЛКИН Ю. М., БУНИН Б. Н., ВОРОБЬЕВ Е. Д., ДОЛЛЕЖАЛЬ Н. А., ЕДУНОВ Л. В., ЛАВРУХИН В. С., ЛОМИДЗЕ В. Л., МЕЛИХОВ В. В., МИЯЕВ Ю. И., ПЕПЕЛЫШЕВ Ю. Н., ПЛАСТИНИН В. П., РОГОВ А. Д., СМИРНОВ В. С., ФРАНК И. М., ХРАСТОВ Н. А., ШАВАЛИН Е. П., ЯЗВИЦКИЙ Ю. С.

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 максимальной плотности потока тепловых нейтронов  $\sim 10^{16}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  [1, 2]. Исследования проводились без теплоносителя при средней мощности реактора до 500 Вт как в стационарном, так и в импульсном режимах работы. Впервые вывод ИБР-2 в критическое состояние на запаздывающих нейтронах осуществлен 30 ноября 1977 г., а импульсная критичность достигнута 13 января 1978 г. В настоящей статье дан обзор основных экспериментов при физическом пуске ИБР-2.

**Критическая сборка.** Перед загрузкой топливных кассет (ТК) все ячейки активной зоны были заполнены кассетами-имитаторами, которые отличались от топливных только тем, что твэлы в них содержали медь вместо двуокиси плутония. В центре активной зоны устанавливался Ро—Ве-источник интенсивностью  $\sim 10^7$  нейтр./с. Для контроля нейтронного потока использовали штатную пусковую аппаратуру с тремя камерами деления на  $^{235}\text{U}$ , которые размещались вне реактора на расстоянии 1150 мм от его центра (рис. 1, 1), а также два дополнительных экспериментальных канала с заменяемыми детекторами, устанавливаемыми как в плексиглавовом блоке имитатора холодного замедлителя (см. рис. 1, 11), так и в активной зоне 8. Скорость счета штатных и экспериментальных детекторов при загрузке зоны имитаторами составляла от 5 до 50 имп./с. Кроме

того, для линейного контроля мощности использовали экспериментальный токовый канал с борной камерой в ИХЗ, аналоговым реактиметром и самопишущими потенциометрами.

Топливо в активную зону загружали 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. Критическое состояние достигалось для двух вариантов загрузки активной зоны (рис. 2): «центрального» (70 ТК) и «периферийного» (74 ТК). Расчетная критическая загрузка этих вариантов составила  $71 \pm 2$  и  $75 \pm 2$  ТК соответственно.

**Эффект реактивности органов СУЗ и других элементов реактора.** Эффекты реактивности измеряли 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 учитывали разную чувствительность детектора к нейtronам источника и нейtronам деления, разную ценность нейтронов источника и нейтронов деления, распад Ро—Ве-источника и вклад спонтанного деления  $^{240}\text{Pu}$ . Последний фактор определялся экспериментально.

Реактивность динамическими методами измеряли аналоговым реактиметром, а также регистрацией сигналов камер на самопишущем потенциометре или шлейфом осциллографе

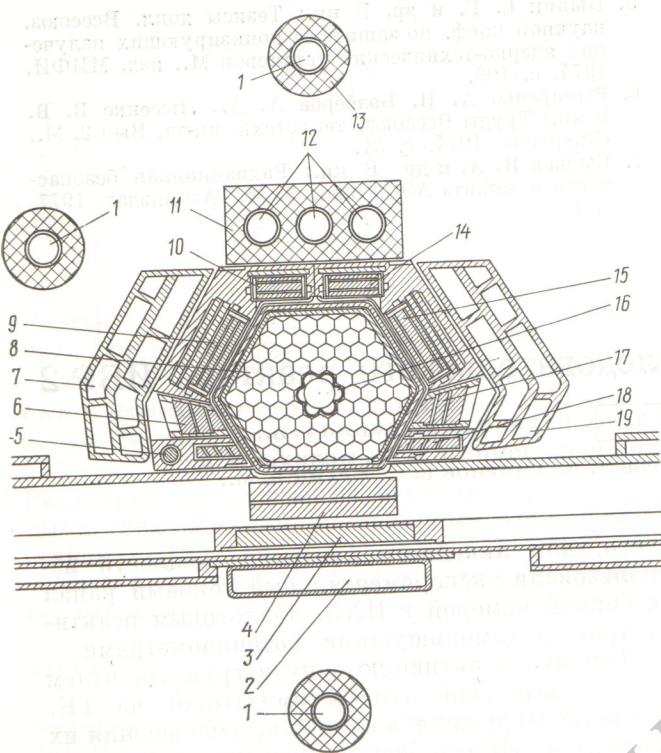


Рис. 1. Поперечное сечение ИБР-2:  
1 — штатные камеры деления; 2 — водяной замедлитель за подвижным отражателем (ПО); 3 — бериллиевый вкладыш дополнительного подвижного отражателя (ДПО); 4 — лопасть основного подвижного отражателя (ОПО); 5 — стержень автоматического регулятора (АР); 6 — быстродействующая аварийная защита (БАЗ-2); 7 — водяной замедлитель за компенсирующим органом реактивности (КО-2); 8 — активная зона; 9 — компенсирующий орган (КО-2); 10 — медленная аварийная защита (МАЗ-2); 11 — имитатор холодного замедлителя (ИХЗ); 12 — экспериментальные камеры; 13 — замедлитель штатных камер; 14 — МАЗ-4; 15 — КО-1; 16 — экспериментальная камера в нале мишени; 17 — БАЗ-1; 18 — промежуточный регулятор (ПР); 19 — водяной замедлитель за КО-1

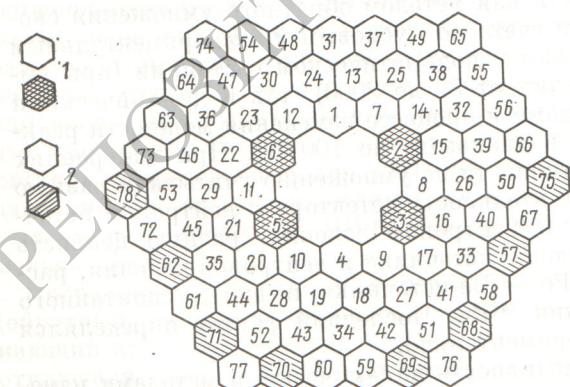


Рис. 2. Картограмма критической загрузки реактора с ячейками с ТК для «центральной» (1) и «периферийной» (2) загрузок

с последующей обработкой данных на ЭВМ. В некоторых случаях реактивность определяли по установленному периоду разгона. Дифференциальную эффективность органов СУЗ изменили методом перекомпенсации.

Из анализа данных по измерению эффективности одних и тех же участков компенсирующих органов (КО) разными методами следует, что относительное расхождение результатов не превышает 5 %, т. е. меньше погрешности динамических методов ( $\pm 5\%$ ) и погрешности метода обратного умножения ( $\pm 15\%$ ). Необходимо отметить, что результат измерения эффекта реактивности зависит от положения детектора. Так, полная эффективность МАЗ (см. рис. 1, 14), измеренная с помощью камеры в ИХЗ, оказалась в 1,5 раза выше эффективности, измеренной камерой, находившейся в центре активной зоны. Эффективность КО и подвижного отражателя (ПО) (см. рис. 1, 9, 15, 4) по штатным камерам, находившимся за этими органами, была ниже эффективности, изме-

Эффективность органов СУЗ

Таблица 1

Орган СУЗ	Полная, $10^{-2} k_{\text{eff}}$	Дифференциальная, $10^{-4} k_{\text{eff}}/\text{мм}$
КО-1	$1,50 \pm 0,12$	$0,50 \pm 0,03$
КО-2	$1,55 \pm 0,12$	$0,52 \pm 0,03$
ПР	$0,26 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,01$
АР	$0,032 \pm 0,002$	$0,011 \pm 0,001$
БАЗ *	$0,14 \pm 0,01$	—
МАЗ *	$0,60 \pm 0,06$	—

\* Один блок.

Эффект реактивности основного и дополнительного подвижных отражателей при периферийной загрузке ТК \*

Таблица 2

Положение ПО	$\Delta k_{\text{ОПО}}, 10^{-2} k_{\text{eff}}$	$\alpha \cdot 10^4, \text{град}^{-2}$	$\Delta k_{\text{ДПО}}, 10^{-2} k_{\text{eff}}$	$\alpha_{\text{ДПО}} \cdot 10^4, \text{град}^{-2}$	Погрешность, %	
					$\sigma \Delta k$	$\sigma \alpha$
ДПО в ф. ц. **	1,76	1,01	—	—	3	1
ДПО выведен	2,09	1,6	—	0,39	2	20
ОПО в ф. ц. **	—	—	0,39	0,1	2	—
ОПО выведен	—	—	0,72	—	2	—

\* О коэффициенте  $\alpha$  см. формулу (1) и относящийся к ней текст.

\*\* Т. е. в физическом центре, под которым понимается положение ДПО или ОПО, соответствующее их максимальной эффективности.

Эффект реактивности основного и дополнительного подвижных отражателей ИБР-2 при центральной загрузке ТК

Таблица 3

Положение ПО	$\Delta k_{\text{ОПО}} \cdot 10^{-2} k_{\text{эфф}}$	$\alpha \cdot 10^4$ , град $^{-2}$	$\Delta k_{\text{ДПО}} \cdot 10^{-2} k_{\text{эфф}}$	Погрешность, %	
				$\alpha_{\text{ДПО}} \cdot 10^4$ , град $^{-2}$	$\sigma_{\Delta k}$
ДПО в ф. ц.	2,04	1,4	—	—	2 10
ДПО выведен	2,41	—	—	—	—
ОПО в ф. ц.	—	—	0,45	—	—
ОПО выведен	—	—	0,82	0,4	2 12

ренной другими камерами. Причина этого эффекта — локальные возмущения потока и спектра нейтронов.

Наиболее полные измерения проводились при периферийной загрузке ТК (табл. 1 и 2). При центральной загрузке ТК эффективность блоков КО и МАЗ почти на 10% меньше, а эффект реактивности ПО почти на столько же больше, чем при периферийной загрузке (табл. 3). Это объясняется тем, что при центральной загрузке активная зона несколько смешена в сторону подвижного отражателя и дальше отстоит от компенсирующих органов и МАЗ.

Измеренная полная эффективность органов СУЗ в 1,5–2 раза меньше проектных значений, что объясняется неучетом в расчетах некоторых деталей конструкции. Несмотря на это, эффективность регуляторов можно считать удовлетворительной, в то время как эффективность МАЗ недостаточна, поскольку при отказе одного органа МАЗ она не обеспечит компенсацию температурного эффекта реактивности. К энергетическому пуску реактора эффективность органов СУЗ будет увеличена за счет изменения их конструкции.

На рис. 3 показано, как влияет на мощность реактора срабатывание одного органа БАЗ. За 0,02 с после сигнала аварийной защиты одним органом БАЗ выволнится реактивность  $8 \cdot 10^{-4} k_{\text{эфф}}$ , хотя его полная эффективность значительно выше (см. табл. 1). В импульсном режиме работы реактора срабатывание одного органа

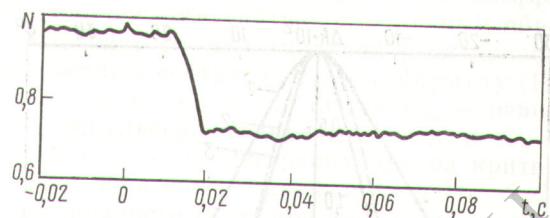


Рис. 3. Осциллограмма мощности ИБР-2 при работе в стационарном режиме и сбросе одного органа БАЗ

БАЗ приведет к уменьшению энергии импульса приблизительно в 50 раз.

Экспериментальная оценка влияния внешних водородсодержащих замедлителей, которые используются для формирования спектра в пучках нейтронов, на эффективность органов СУЗ показала, что наибольшее влияние оказывает ИХЗ (см. рис. 1). При его удалении эффективность МАЗ увеличивается на 20%, а эффективность КО на столько же уменьшается. Другие замедлители (7 и 19 на рис. 1) практически не влияют на эффективность органов СУЗ.

Для периодической модуляции реактивности и создания импульсов мощности с частотой 50 и 5 Гц служат ОПО и ДПО (рис. 1 и 4). Поэтому измерению их эффектов реактивности уделялось особое внимание. При измерении угловой зависимости реактивности ИБР-2 от положения подвижного отражателя его вращение осуществлялось со скоростью 0,03–0,04 град/с, а положение контролировалось с погрешностью не более 0,07° для ОПО и 1° для ДПО.

Помимо зависимости эффектов реактивности ПО от загрузки активной зоны, весьма значи-

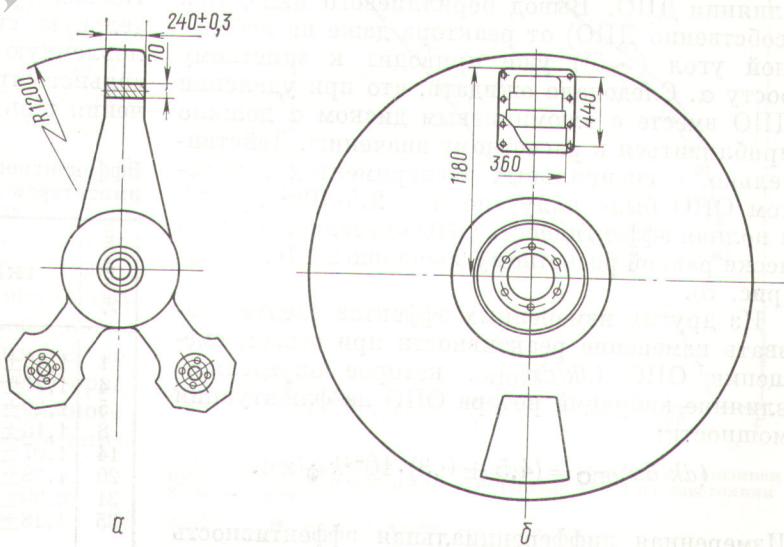


Рис. 4. Основной (а) и дополнительный (б) подвижные отражатели ИБР-2

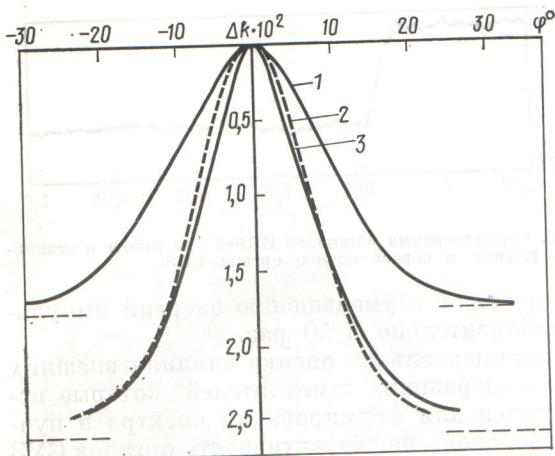


Рис. 5. Зависимость реактивности ИБР-2 от угла поворота ОПО со штатным ДПО (1), без ДПО (2) и в сравнении с измерениями на стенде БФС [2] (3)

тельным оказалось влияние положения одного из отражателей на эффективность другого (см. табл. 2 и 3). Причина этого — в затенении ДПО основным ПО. Особенно сильно теневой эффект оказывается на коэффициенте параболы  $\alpha$ , опи- сывающей ход реактивности при смещении ОПО на малые углы  $\varphi$  ( $\pm 3-4^\circ$ ) относительно физи- ческого центра:

$$\varepsilon(\varphi) = \varepsilon_m - \alpha\varphi^2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_m$  — максимальная реактивность на мгновенных нейтронах.

Значение  $\alpha$  оказалось в 3—4 раза меньше расчетного, которое было получено без учета влияния ДПО. Вывод бериллиевого вкладыша (собственно ДПО) от реактора даже на небольшой угол ( $\sim 5^\circ$ ) уже приводит к заметному росту  $\alpha$ . Следовало ожидать, что при удалении ДПО вместе с алюминиевым диском  $\alpha$  должно приблизиться к расчетному значению. Действительно, в специальных экспериментах с макетом ОПО было получено  $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-4}$  град $^{-2}$ , а полная эффективность ОПО оказалась практически равной расчетному значению  $2,65 \cdot 10^{-2} k_{\text{эфф}}$  (рис. 5).

Из других измеренных эффектов следует назвать изменение реактивности при осевом смещении ОПО ( $dk/dx$ )<sub>ОПО</sub>, которое определяет влияние вибраций ротора ОПО на флюктуации мощности:

$$(dk/dx)_{\text{ОПО}} = (4,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} k_{\text{эфф}}/\text{мм}.$$

Измеренная дифференциальная эффективность при отводе всей машины ПО от активной

зоны

$$(dk/dx)_{\text{MP}} = (9,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} k_{\text{эфф}}/\text{мм},$$

а полный эффект —  $\sim 0,06 k_{\text{эфф}}$ . Заметным оказался эффект реактивности противовеса ОПО (см. рис. 4). Он составил  $0,006 k_{\text{эфф}}$ .

При измерении эффектов реактивности ТК и их имитаторов (табл. 4) неожиданно высокой оказалась эффективность имитаторов на периферии активной зоны. Эксперименты по измерению эффективности металлических образцов в области ПО подтвердили предположение о сравнительно большой эффективности меди в спектре ИБР-2. Эффективности образцов стали, меди, вольфрама и бериллия одинакового объема относятся как  $1,0 : 1,4 : 1,5 : 1,8$  соответственно.

**Время жизни нейtronов в реакторе.** Среднее время жизни поколения мгновенных нейтронов  $\tau$  во многом определяет длительность импульса мощности на половине высоты, которую для ИБР-2 можно вычислить по формуле

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

где  $v$  — скорость вращения ОПО. Измерение  $\tau$  проводили четырьмя независимыми методами. Наименьшую погрешность имели измерения методом Росси —  $\alpha$  [3]:  $83 \pm 2$  нс. Значение  $\tau$ , измеренное по форме импульса мощности, оказалось равным  $90 \pm 9$  нс, а по флюктуациям мощности в импульсном [4] и стационарном [3] режимах  $80 \pm 10$  и  $130 \pm 20$  нс соответственно. Поскольку последний результат имел значительную систематическую погрешность, обусловленную частотной характеристикой измерительного тракта, при вычислении среднего значения  $\tau$  он не учитывался. Среднее значение  $\tau$ ,

Эффективность ТК и кассет-имитаторов ИБР-2,  $10^{-2} k_{\text{эфф}}$

Таблица 4

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

полученное по соотношению

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

где  $\tau_i$  и  $\sigma_i^2$  — среднее значение и дисперсия  $\tau$  в  $i$ -м методе, совпало со значением, полученным методом Росси —  $\alpha$ , и составило  $83 \pm 2$  нс.

Большое отличие измеренного  $\tau$  от рассчитанного методом Монте-Карло (43 нс) [1] объясняется главным образом влиянием диска ДПО, ИХЗ и кожуха ПО, которое не учитывалось в расчетах. Измерения методом Росси —  $\alpha$ , выполненные без этих элементов, дали  $\tau = 47$  нс.

**Спектр и поток нейтронов во внешних пучках и распределение мощности в активной зоне.** Спектр быстрых и резонансных нейтронов измеряли 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. 6).

Плотность потока тепловых нейтронов на внешней поверхности замедлителя определяли методом кадмииевой разности по абсолютной активности медных и золотых индикаторов [5]. Абсолютную активность индикаторов измеряли градуированными датчиками и уточняли на установке  $\beta - \gamma$ -совпадений. Измеренная плотность потока тепловых нейтронов ( $3,0 \pm 0,2 \cdot 10^6$  нейтр./( $\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Вт}$ ) оказалась примерно вдвое выше расчетного значения.

Распределение мощности в активной зоне определяли по  $\gamma$ -активности продуктов деления. Активность кассет измеряли через 2 мес после облучения. Измеренное 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.

**Импульсная критичность реактора.** Вывод 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]

$$y = W/S_0 = (1/\beta) (K_i/1 - K_i), \quad (4)$$

где  $K_i$  — так называемый импульсный коэффициент размножения нейтронов, сложным образом зависящий от максимальной реактивности на мгновенных нейтронах  $\varepsilon_m$  [см. формулу (1)];  $K_i = 1$ , когда  $\varepsilon_m = \varepsilon_{m_0}$  (здесь  $\varepsilon_{m_0}$  — равновесная импульсная надкритичность), и  $K_i \ll 1$ , когда  $\varepsilon_m < 0$ . 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 завышение подкритичности, так как  $y^{-1}(\varepsilon_m)$  имеет отрицательную вторую производную по реактивности  $\varepsilon_m$ .

Средняя мощность реактора  $W$  складывается из мощности  $W_0$ , выделяемой в импульсах, и мощности  $W_\Phi$ , 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  $y^{-1} = S_0/W_0$ . При этом  $W_0$  измеряется по регистрации скорости счета детекторов, периодически включаемых на время основного импульса, причем длительность включения детекторов должна быть равна времени, в течение которого вводимая ОПО реактивность описы-

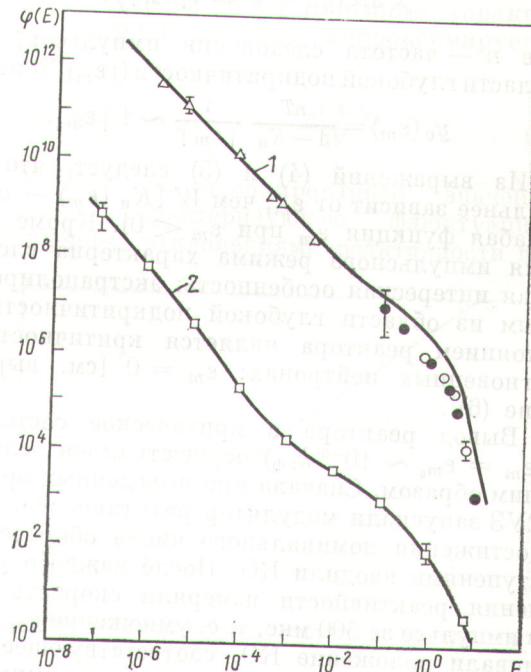


Рис. 6. Спектр нейтронов (нейтр./ $\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ} \cdot \text{Вт}$ ) во внешнем пучке ИБР-2 на поверхности замедлителя (1) и на расстоянии 8 м от нее (2) :  
△, □, ○, ● — эксперимент; — расчет

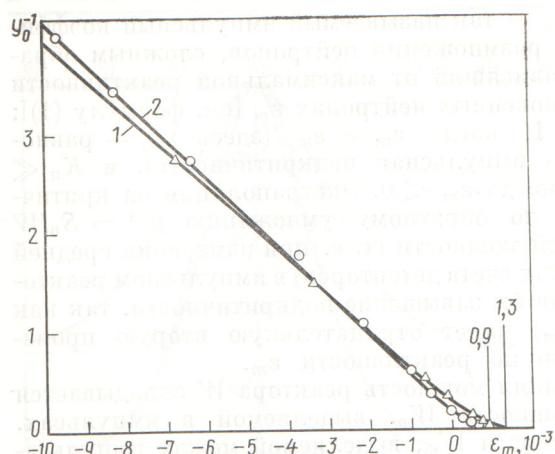


Рис. 7. Зависимость обратного умножения в импульсном режиме от реактивности на мгновенных нейтронах:

— расчет при частоте 5 (1) и 50 Гц (2); О, Δ — эксперимент

вается параболой (1). В области ниже уровня критичности на мгновенных нейтронах (точнее, при  $\varepsilon_m < -10^{-3}$ ) умножение в импульсе

$$y_0(\varepsilon_m) = \frac{1}{1-K_{\text{и}}} \frac{2n}{\sqrt{|\varepsilon_m| \alpha v^2}} \times \arctg \left( \frac{T}{2} \sqrt{\alpha v^2 / |\varepsilon_m|} \right), \quad (5)$$

где  $n$  — частота следования импульсов, а в области глубокой подkritичности ( $|\varepsilon_m| \gg \alpha v^2 T^2$ )

$$y_0(\varepsilon_m) = \frac{nT}{1-K_{\text{и}}} \frac{1}{|\varepsilon_m|} \sim 1/|\varepsilon_m|. \quad (5a)$$

Из выражений (4) и (5) следует, что  $W_0$  сильнее зависит от  $\varepsilon_m$ , чем  $W [K_{\text{и}}(\varepsilon_m)]$  — очень слабая функция  $\varepsilon_m$  при  $\varepsilon_m < 0$ . Кроме того, для импульсного режима характерна следующая интересная особенность: экстраполированный из области глубокой подkritичности состоянием реактора является критичность на мгновенных нейтронах:  $\varepsilon_m = 0$  [см. выражение (6)].

Вывод реактора в критическое состояние ( $\varepsilon_m = \varepsilon_{m_0} \sim 10^{-3} k_{\text{eff}}$ ) осуществлялся следующим образом. Сначала при выведенных органах СУЗ запускали модулятор реактивности. После достижения номинального числа оборотов ПО ступенями вводили КО. После каждого увеличения реактивности измеряли скорость счета в импульсе за 500 мкс, т. е. умножение  $y_0$ , и оценивали положение КО, соответствующее ожидаемой критичности. При частоте импульсов 5 Гц, когда вращаются оба ПО, и малом умножении  $y_0$  проводили грубую синхронизацию роторов путем нахождения такой фазы враще-

ния ДПО в импульсе, которая соответствовала максимуму скорости счета. Окончательно синхронизацию устанавливали в критическом состоянии.

Получено хорошее согласие измеренных и расчетных значений функции  $y_0^{-1}(\varepsilon_m)$  (рис. 7). Расчетные зависимости получены на основании соотношения (5) с использованием измеренного значения  $\alpha$ . Импульсный режим осуществлялся только при периферийной загрузке ТР. При частоте импульсов 50 Гц равновесная импульсная надкритичность составила  $0,9 \cdot 10^{-3} k_{\text{eff}}$ , при частоте 5 Гц  $1,3 \cdot 10^{-3} k_{\text{eff}}$  (см. рис. 7).

**Форма 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.

Форму вспышки быстрых нейтронов измеряли детально в различных состояниях реактора счетным методом с помощью многоканального временного анализатора и токовым методом путем регистрации сигнала детектора от индивидуального импульса мощности на экране запоминающего осциллографа. Детекторами быстрых нейтронов служили камеры деления с  $^{238}\text{U}$  в активной зоне и с торием на выведенном нейтронном пучке, а также располагавшийся там же пластиковый сцинтиллятор с фотоумножителем.

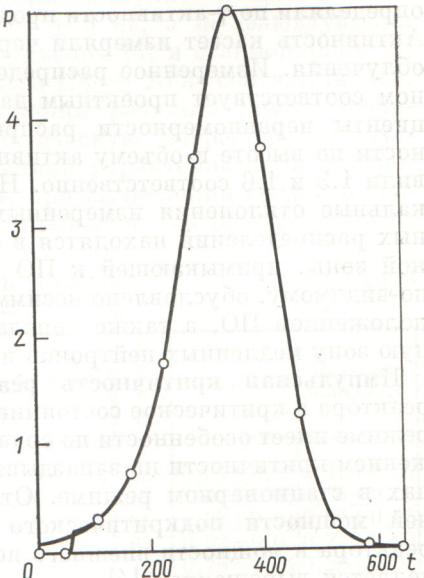


Рис. 8. Измеренная (○) и расчетная (—) форма импульса мощности ИБР-2 при частоте 50 Гц

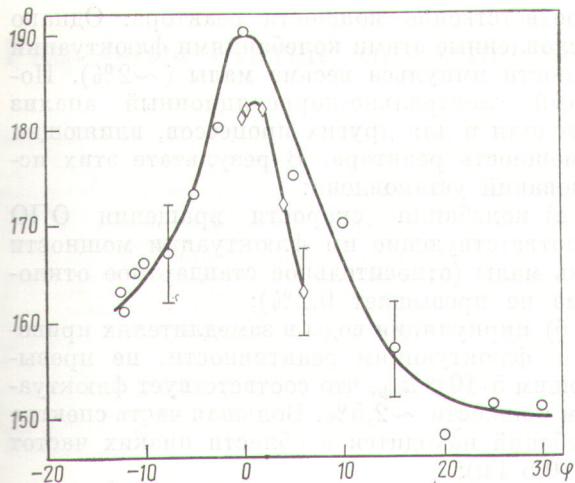


Рис. 9. Зависимость длительности импульса мощности ИБР-2 от положения ДПО  $\varphi$  при частоте 50 Гц:  
○ — замедлитель за ДПО отсутствует;  $\diamond$  — отсутствуют все замедлители

В процессе выхода на критичность форму импульса измеряли счетным методом. При подкритичности  $1 \cdot 10^{-2}$  и  $2 \cdot 10^{-2}$   $k_{\text{эфф}}$  длительность импульса на половине высоты  $\theta$  оказалась равной соответственно 720 и 824 мкс. При критичности на мгновенных нейтронах в максимуме реактивности  $\theta = 240$  мкс, что хорошо соглашается с расчетным значением 244 мкс, полученным с использованием экспериментальных  $\alpha$  и  $\tau$ .

В состоянии импульсной критичности измерения проводили главным образом токовым методом, который в данном случае точнее счетного (погрешность не более 2%). При частоте импульсов 50 Гц (ДПО неподвижен)  $\theta$  для быстрых нейронов составила 220 мкс, а при частоте 5 Гц — 198 мкс. Значительное превышение измеренного значения  $\theta$  над проектным (92 мкс для 5 Гц) обусловлено отличием фактических  $\alpha$  и  $\tau$  от расчетных. Численное решение одноточечного уравнения кинетики реактора с экспериментальными  $\alpha$  и  $\tau$  дает форму импульса, практически совпадающую с измеренной (рис. 8).

Очевидно, что удлинение импульса вызывают элементы конструкции реактора, которые существенно влияют на  $\alpha$  и  $\tau$ . Установлено, что наибольшее влияние оказывает ДПО. На рис. 9 показана измеренная зависимость  $\theta$  от положения ДПО. За нуль принято положение ДПО в физическом центре, т. е. соответствующее наибольшей эффективности. Вывод ДПО из зоны приводит к сильному сокращению длитель-

ности импульса  $\theta$  — с 190 до 150 мкс. В специальных экспериментах было установлено, что это происходит главным образом из-за увеличения  $\alpha_{\text{DPO}}$  и частично из-за сокращения  $\tau$ . Длительность импульса заметно сокращается также при удалении внешних замедлителей. Замедлитель за ДПО увеличивает  $\theta$  на  $30 \pm 4$  мкс, а замедлитель за блоками МАЗ на  $8 \pm 4$  мкс.

**Флюктуации мощности ИБР-2 в импульсном режиме.** Вследствие высокой чувствительности импульсного реактора к изменению реактивности во время физического пуска подробно исследовался характер флюктуаций мощности, а также их корреляция с другими случайными процессами, влияющими на реактивность (вibrationи ПО и др.). Сбор данных осуществляли путем записи дискретных сигналов датчиков на магнитную ленту. Записанную информацию обрабатывали 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 флюктуации энергии импульса [4]. Экспериментальная зависимость относительной дисперсии энергии импульса  $\Delta_{qz}^2$  от  $W$  в соответствии с теорией имеет линейный характер (рис. 10) 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 флюктуации, обусловленные отклонениями реактивности из-

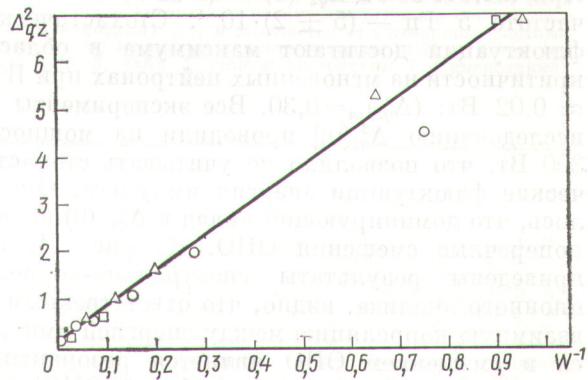


Рис. 10. Зависимость относительной дисперсии энергии импульса  $\Delta_{qz}^2$  от обратной средней мощности реактора  $W^{-1}$  при частоте 50 Гц, наличии ( $\Delta$ ) и отсутствии ( $\circ$ ) водяных замедлителей; при частоте 5 Гц и отсутствии водяных замедлителей ( $\square$ ); — аппроксимация по формуле (6)

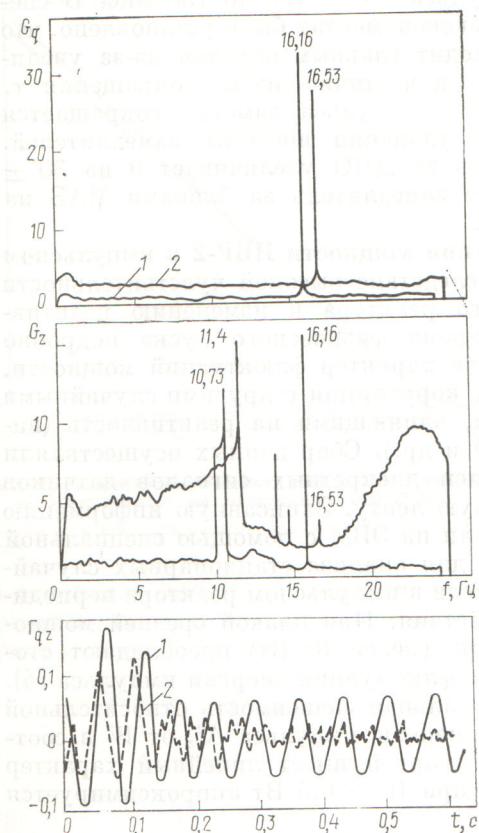


Рис. 11. Спектральные плотности энергии импульса  $G_q$  и попе-  
речных смещений ОПО  $G_z$  и взаимная корреляционная функция  
 $G_{qz}$  процессов  $q$  и  $z$  при частоте 48,5 (1) и 49,6 Гц (2) [t — время  
между импульсами]

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 флюктуации достигают максимума в области критичности на мгновенных нейтронах при  $W \approx 0,02$  Вт;  $(\Delta_{qz}^2)_m = 0,30$ . Все эксперименты по исследованию  $\Delta_{qz}^2(0)$  проводили на мощности 300 Вт, что позволяло не учитывать стохастические флюктуации энергии импульса. Оказалось, что доминирующий вклад в  $\Delta_{qz}^2(0)$  вносят попе-  
речные смещения ОПО. Из рис. 11, 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 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 флюктуации мощности импульса весьма малы ( $\sim 2\%$ ). Подобный спектрально-корреляционный анализ проводили и для других процессов, влияющих на мощность реактора. В результате этих исследований установлено:

а) колебания скорости вращения ОПО и соответствующие им флюктуации мощности очень малы (относительное стандартное отклонение не превышает 0,2%);

б) циркуляция воды в замедлителях приводит к флюктуациям реактивности, не превышающим  $5 \cdot 10^{-6} k_{\text{эфф}}$ , что соответствует флюктуациям мощности  $\sim 2,5\%$ . Большая часть спектра колебаний находится в области низких частот ( $f < 0,5$  Гц);

в) при работе реактора с частотой импульсов 5 Гц, когда вращается также и ДПО, появляются дополнительные флюктуации 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 режимах 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 физических параметров в основном обусловлено неучетом в расчетах вспомогательных элементов конструкции реактора. По результатам физического пуска намечены и реализуются мероприятия для дальнейшего улучшения характеристик реактора.

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

Поступила в Редакцию 4.12.78

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аナンьев В. Д. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1977, № 5, с. 17.
2. Аナンьев В. Д. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 4, с. 352.
3. Ург Р. Статистические методы в физике ядерных реакторов. Пер. с англ. А. И. Ефанова и др. Под ред. И. И. Могильнера. М., Атомиздат, 1974.
4. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1976.
5. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Материалы I Всесоюз. школы. Т. 1, 2. М., 1976.