

P13-2004-156

В. Д. Ананьев, Н. П. Анцупов, А. В. Виноградов,
Л. В. Едунов, В. Г. Ермилов, А. Ф. Зацепин,
В. Л. Ломидзе, Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов,
С. В. Руденко, Е. П. Шабалин

ПУСК И ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ИБР-2
С НОВЫМ МОДУЛЯТОРОМ
РЕАКТИВНОСТИ ГЕТЕРОГЕННОГО ТИПА

Ананьев В. Д. и др.

P13-2004-156

Пуск и исследования основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа

Приводятся результаты пуска и исследований основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа ПО-3. Этот модулятор, созданный с использованием так называемого «теневого» эффекта при отражении быстрых нейтронов, будет иметь значительно более длительный ресурс работы (до 20 лет), практически не ухудшая характеристик реактора по сравнению с прежним подвижным отражателем. По итогам пуска 2004 г. длительность импульса мощности составила 245 мкс, фоновая мощность — 8,8 % от средней мощности, эффективности органов регулирования и защиты реактора, а также флуктуации мощности не изменились.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Ananiev V. D. et al.

P13-2004-156

Startup and Investigation of the Basic Characteristics of the IBR-2 Reactor with a New Reactivity Modulator of Heterogeneous Type

The results of the startup and of the investigation of the basic characteristics of the IBR-2 reactor with the new reactivity modulator (moving reflector) of the heterogeneous type, MR-3, are discussed. The modulator created to employ the principle of the so-called «shadow» effect at fast neutron reflection will have a longer operation resource (up to 20 years) without any practically notable decrease in the parameters of the reactor compared to those of the reactor with the previous reflector. According to the 2004-startup results the power pulse duration is 245 μ s, the background power is 8.8% of the mean power, the effectiveness of the reactor control rods and of the reactor safety system as well as the power fluctuations level remain unchanged.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

1. ПРИНЦИПЫ МОДУЛЯЦИИ РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРЕ ИБР-2

Импульсный исследовательский реактор периодического действия — это реактор на быстрых нейтронах, работающий в режиме периодически и часто повторяющихся импульсов мощности. Его главная отличительная особенность — наличие механического модулятора реактивности — подвижного отражателя (ПО), который обеспечивает циклический процесс глубокого изменения реактивности в течение неограниченного времени. Один раз за цикл длительностью 0,2 с реактор ИБР-2 на короткое время, менее одной миллисекунды, переводится из состояния глубокой подкритики ($K_{эф} \cong 0,97$) в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам. Это создает импульсы мощности длительностью 220 мкс при незначительном фоне между импульсами (около 7 % от средней мощности). Подвижный отражатель определяет длительность импульса мощности ИБР-2 — важнейший параметр, от которого зависит разрешение нейтронного спектрометра на пучках реактора как в дифракционных экспериментах, так и в исследованиях методом неупругого рассеяния нейтронов. Для ИБР-2 принята схема [1, 2], при которой модуляция реактивности осуществляется за счет перемещения основного и дополнительного отражателей нейтронов около активной зоны (рис. 1). Подвижный отражатель — модулятор реактивности — выполняется в виде двух лопастей сложной конфигурации, имеющих диаметр 2,4 м и массу несколько сотен килограммов каждая, вращающихся синхронно с разными, но кратными скоростями в плоскости, параллельной одной из шести граней активной зоны реактора. Импульс мощности возникает при одновременном прохождении обеих лопастей около зоны. Ротор дополнительного отражателя (ДПО) обращается с частотой пульсации реактора 5 Гц, а основной отражатель (ОПО) вращается с большей скоростью, определяющей длительность импульса, которая для параболического закона изменения реактивности определяется соотношением

$$\theta_{1/2} \cong 1,4(\tau/\alpha\omega^2)^{1/3}, \quad (1)$$

где τ — время жизни мгновенных нейтронов; α — параметр параболы, описывающий ход реактивности в ед. $K_{эф}$ (градус ОПО) $^{-2}$ вблизи максимума реактивности, а ω — угловая скорость вращения ОПО.

Дополнительный подвижный отражатель целесообразно размещать за основным отражателем, расположенным ближе к активной зоне; это увеличивает угол обзора реактора экспериментальными устройствами. В то же время такое расположение отражателей приводит к возникновению так называемого теневого эффекта реактивности, причиной которого является экранировка одного блока отражателя другим.

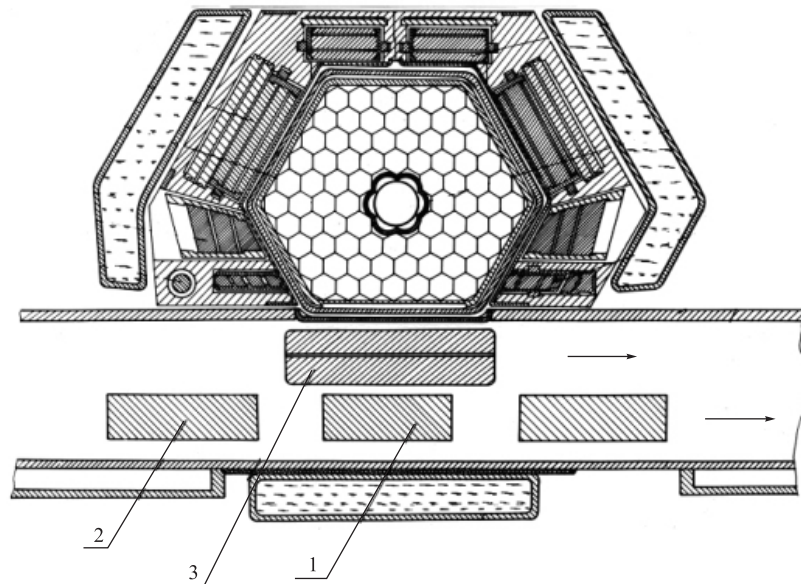


Рис. 1. Сечение реактора ИБР-2 с модулятором реактивности «гомогенного» типа (ДПО-трезубец). 1, 2 — лопасти ДПО, 3 — лопасть ОПО

В частности, если ДПО имеет вид блока с шириной, равной ширине ОПО, то при смещении ОПО из положения максимума реактивности край ДПО «открывается» для нейтронов из активной зоны. Соответственно возрастает отражение нейтронов от ДПО в активную зону, и это добавляет положительный эффект реактивности к основному отрицательному эффекту из-за перемещения ОПО в область меньшего нейтронного потока. Соответственно, коэффициент параболы реактивности α такого модулятора будет меньше, чем при смещении одиночного блока отражателя. Этот эффект приводит к увеличению длительности импульса мощности.

С целью снижения влияния «теневого» эффекта реактивности на ИБР-2 использовались модуляторы реактивности с дополнительными подвижными отражателями в виде «трезубца». Три таких модулятора ПО-1, ПО-2, ПО-2Р работали на ИБР-2 с момента пуска до 2003 г., по 6–7 лет каждый.

Однако вредный теневой эффект реактивности превращается в полезный при «гетерогенной», или «решетчатой», структуре обоих ПО. Идея такого модулятора реактивности была предложена еще в 1971 г. [3]. Суть ее в том, что решетчатую структуру имеют оба ПО — и основной и дополнительный,двигающиеся в противоположных направлениях (рис. 2). Впрочем, разделение на основной и дополнительный теперь уже условно: оба отражателя равноправны в смысле обеспечения модуляции реактивности. Модуляция ре-

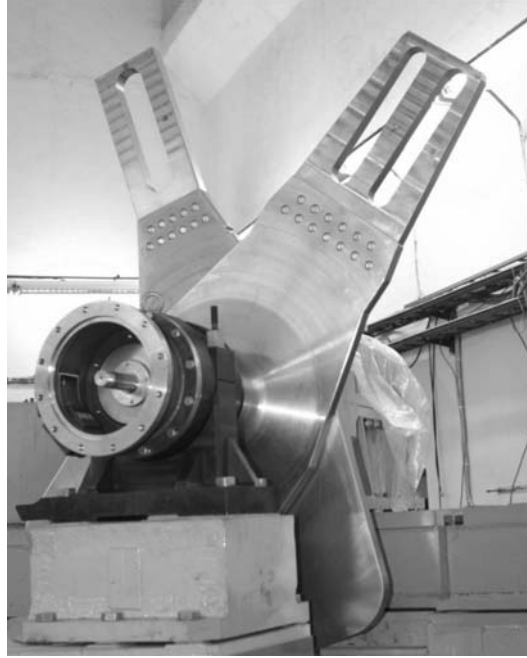


Рис. 2. Новый модулятор реактивности реактора ИБР-2

активности имеет квазигармонический вид с периодом, равным L/v , где L — шаг решетки, а v — взаимная скорость движения отражателей. Кривая реактивности несет несколько максимумов (число которых равно числу зубьев в том отражателе, где их больше). Но амплитуда модуляции ΔK в «боковых» пиках быстро уменьшается относительно центрального, наибольшего пика реактивности ввиду конечного размера ПО и активной зоны. Максимальная скорость модуляции реактивности

$$\gamma = \frac{2\pi \cdot v}{L} \cdot \Delta K,$$

очевидно, определяется размерами элементов ПО и, как показали предварительные оценки и последующие эксперименты, может быть значительно выше, чем у «гомогенного» ПО. В 1983 г. в большой серии опытов на стенде ЭПОС-2 были изучены различные варианты модуляторов из разных материалов [4]. В результате для реактора ИБР-2 был предложен модулятор гетерогенного типа для работы на больших скоростях ОПО и ДПО (1500 и 1200 об/мин).

Значение производной коэффициента размножения по углу смещения ОПО, полученное на стенде ЭПОС-3 в 1987 г. на полномасштабной модели

[5], оказалось равным $3,2 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$, что обеспечило бы полуширину импульса мощности реактора (110 ± 5) мкс вместо 216 мкс для гомогенного ПО с такой же скоростью вращения.

Интересно, что решетчатый модулятор реактивности оказался полезным и в другом отношении — в повышении безопасности реактора. Во второй половине 90-х гг. был спроектирован решетчатый отражатель «никель-никель» на медленную скорость вращения при сохранении длительности импульса мощности. Он был создан к 2004 г. и заменил быстровращающийся ПО-2Р. Отражатель гетерогенного типа ПО-3 модулирует реактивность вследствие перекрытия щелей одного отражателя зубьями другого при их взаимном движении навстречу друг другу. Кривая реактивности при вращении роторов имеет три максимума (рис. 3), средний из которых является основным и на нем развивается импульс мощности.

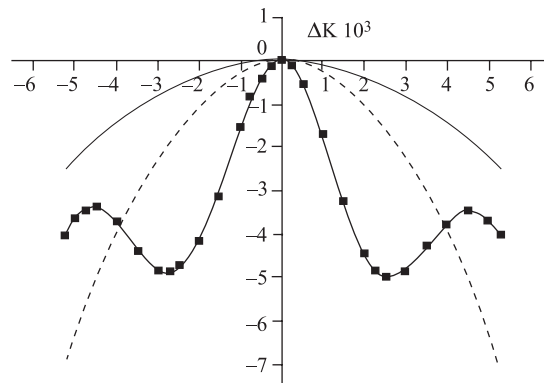


Рис. 3. Ход реактивности для разных модуляторов: тонкая линия — ДПО в виде однородного блока, пунктирная линия — ДПО в виде трезубца, ■ — «гетерогенный» подвижный отражатель

Боковые максимумы — побочные; от величины разности реактивности между двумя максимумами (Δk_1) зависит интенсивность побочного импульса мощности (которая должна быть на несколько порядков ниже, чем основного), поэтому величина Δk_1 — второй важный параметр кривой реактивности наряду с параметром α .

Работы по пуску реактора с новым подвижным отражателем ПО-3 были проведены в период с 16 июня по 23 июля 2004 г., сначала в режиме «крит-сборка» (подкритический режим и режим постоянной мощности до 1 кВт), затем в рабочем, импульсном режиме до номинальной мощности 1,5 МВт. Помимо исследований характеристик реактора была проведена догрузка одной топливной кассеты для обеспечения необходимого запаса реактивности.

2. КОНСТРУКЦИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО МОДУЛЯТОРА ПО-3

ПО-3 содержит два соосно расположенные в вертикальной плоскости ротора — основной подвижный отражатель (ОПО) и дополнительный подвижный отражатель (ДПО) (рис. 2). ОПО представляет собой ротор сложной конфигурации, имеющий на периферии два выступа, один — лопатка лопасти в виде замкнутого трезубца, другой — противовес, обеспечивающий динамическую балансировку ротора. Рабочие части отражателей, изготовленные из никелевого сплава ХН77ТЮРУ-ВД, крепятся к корневой части ступицы с помощью штифтов. Ротор ДПО — консольного типа с валом, имеющим подшипниковые опоры в редукторе — имеет конфигурацию двузубой замкнутой лопатки. Скорость вращения ОПО составляет 600 об/мин, ДПО — 300 об/мин. Направление вращения роторов встречное; при рассмотрении со стороны привода ОПО вращается по часовой стрелке, ДПО — против. Роторы вращаются в замкнутом кожухе, заполненном гелием концентрацией не менее 92 %. Между корпусом активной зоны реактора и лопатками модуляторов расположена мембрана — фасонная пластина с минимальной толщиной 2,5 мм. Она выполнена из цельнометаллического листа нержавеющей стали путем фрезерования и является частью кожуха ПО.

Геометрия лопаток ОПО и ДПО близка к оптимальной в смысле наиболее быстрой модуляции реактивности при формировании импульса мощности, которая была определена на физических стендах ЭПОС-2 и ЭПОС-3 [4, 5].

Ресурс модулятора определяется как центробежными нагрузками на роторы и валы (вследствие неточности балансировки), так и в значительной мере динамическими нагрузками на мембрану за счет фронта повышенного давления бегущей волны перед лопастью ОПО и пониженного давления за ней, а также за счет газодинамических «хлопков», возникающих при встрече лопастей ОПО и ДПО. За счет более медленного вращения роторов проектный ресурс ПО-3 в отличие от предыдущих отражателей увеличен с 20000 до 55000 ч.

3. ИЗМЕРЕНИЕ КРИВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ПО-3

Параметр параболы реактивности ПО-3 для одновременного перемещения ОПО и ДПО в противоположных направлениях с соотношением скоростей 1:2, измеренный в режиме «критсборка» при подкритичности более $3 \cdot 10^{-3} K_{эф}$, оказался равным

$$\alpha_{ПО-3} = (1,05 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} K_{эф} \text{ град}^{-2}.$$

Это примерно в полтора раза ниже, чем параметр параболы реактивности вблизи основного максимума, измеренный на стенде ЭПОС-3 — 1,5–1,6 ·

$10^{-3} K_{\text{эф}} \text{ град}^{-2}$. И все-таки он почти в 4 раза выше, чем этот же параметр для предыдущих подвижных «гомогенных» отражателей. На рис. 4, а, б даны кривые реактивности при смещении роторов ОПО и ДПО в интервале $\pm 2^\circ$ (градусы всегда отсчитываются по смещению ОПО) и $\pm 10^\circ$.

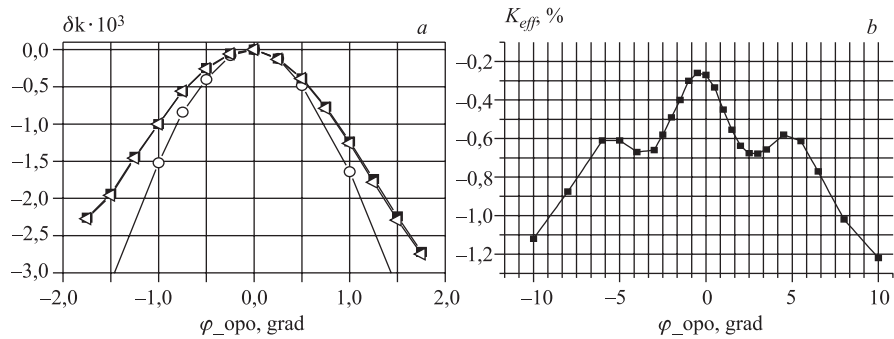


Рис. 4. а) Ход реактивности (доли $K_{\text{эф}}$ при смещении ротора гетерогенного ПО вблизи физического центра (треугольники — ПО-3, соотношение скорости ДПО/ОПО — 1:2; кружки — ЭПОС-3, соотношение скорости ДПО/ОПО — 4:5); б) ПО-3 в интервале $\pm 10^\circ$ ОПО (по оси абсцисс — смещение ОПО в градусах, по оси ординат — отклонение коэффициента размножения от единицы, в сотых долях)

Величина разности реактивности между основным и побочными максимумами была измерена равной

$$\Delta k_1 = (3,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} K_{\text{эф}}.$$

Кривые на рис. 4, а, б получены при фазе совмещения ОПО и ДПО — $0,32^\circ$ от положения физического центра (ф. ц., знак « \leftarrow » означает смещение ОПО против штатного направления по часовой стрелке при взгляде со стороны привода ПО).

При совмещении ОПО и ДПО в фазе $+1^\circ$ от физического центра величины $\alpha_{\text{ПО-3}}$ и Δk_1 были измерены: они равны соответственно $(1,3 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} K_{\text{эф}} \text{ град}^{-2}$ и $(3,65 \pm 0,15) \cdot 10^{-3} K_{\text{эф}}$. Параметр параболы реактивности вблизи основного максимума, измеренный на стенде ЭПОС-3 при сдвиге места встречи на $+1^\circ$, также был в 1,2 раза выше, чем при встрече ОПО и ДПО в ф. ц.

Полная эффективность ОПО + ДПО оказалась меньше, чем измеренная на ЭПОС-3 ($3,4 \% K_{\text{эф}}$) и рассчитанная по программе MCNP ($3,2 \% K_{\text{эф}}$), а именно

$$\Delta k_{\text{ПОЗ}} \approx (2,55 \pm 0,05) \% K_{\text{эф}}.$$

Таким образом, эффекты реактивности модулятора реактивности ПО-3 оказались на $\sim 20\%$ меньше ожидавшихся. Причина расхождения, вероятно, в том, что подвижный отражатель оказался установленным дальше от активной зоны, чем в эксперименте ЭПОС-3.

Параметр параболы реактивности при перемещении ОПО в отсутствие ДПО в результате измерения оказался равным $1,1 \cdot 10^{-4} K_{эф}$ град $^{-2}$, а параметр параболы реактивности ДПО при ОПО в физическом центре — $4,3 \cdot 10^{-4} K_{эф}$ град $^{-2}$ (градусы ДПО; перевод на градусы ОПО дает $9,7 \cdot 10^{-4} K_{эф}$ град $^{-2}$). Эффект реактивности от перемещения ОПО и ДПО в одну сторону с равной скоростью (или эффект смещения места встречи у активной зоны, или эффект рассинхронизации) равен $1,5 \cdot 10^{-4} K_{эф}$ град $^{-2}$.

При измеренном в подкритике ходе реактивности ПО-3 полуширина импульса мощности, рассчитанная по формуле (1), ожидалась равной 230 мкс (при значении времени жизни нейтронов ~ 63 нс). Однако непосредственные измерения формы импульса (см. ниже) дали 245 мкс.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ

Измерение дифференциальной эффективности блоков регулирования осуществлялось методом разгона в стационарном режиме.

Было проведено шесть разгонов реактора с периодами от 47 до 360 с. Блоки перемещались в линейной части их характеристик (за исключением АР, который вводился полностью). В табл. 1 приведены данные по разгонам на запаздывающих нейтронах.

Таблица 1. Сводка данных по разгонам на запаздывающих нейтронах

| № разгона | Перемещаемый орган | Диапазон перемещения, мм | Установившийся период, с | Надкритичность доли $\beta_{эф}$ |
|-----------|--------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1 | КО-1 | 257 – 259 | < 360 *) | $> 0,038$ |
| 2 | КО-1 | 257 – 261 | 138 | 0,0854 |
| 3 | КО-1 | 257 – 264 | 63 | 0,155 |
| 4 | РР | 150 – 170 | 101 | 0,110 |
| 5 | РР | 150 – 190 | 47,3 | 0,188 |
| 6 | АР | 0 – 400 | 60,8 | 0,159 |

Прим.: В первом разгоне не был достигнут асимптотический период.

Получены следующие оценки эффективностей блоков:

| | |
|------|---|
| КО-1 | $(2,25 \pm 0,05) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/мм$ |
| РР | $(0,43 \pm 0,03) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/мм$ |
| АР | $0,16 \beta_{эф}$ |

Полученные значения эффективности блоков в пределах ошибок измерений совпадают с результатами прежних измерений.

Загрузка «свежей» топливной кассеты № 161 в ячейку № 2 вместо имитатора была произведена 24 июня 2004 г. Ее эффективность (эффект замены имитатора на ТВС) составила 1,0 % $K_{эф}$ по «обратному умножению» в глубокой подкритике $-2 \div -3\% K_{эф}$ и 1,06 % $K_{эф}$ — по сравнению положений компенсирующих блоков в критике. Расчетное значение равно 1,12 % $K_{эф}$. С учетом погрешностей эксперимента (0,05% $K_{эф}$) и расчета (0,02 % $K_{эф}$) совпадение значений хорошее. Эффект извлечения имитатора был слабоотрицательный — $(-0,035 \pm 0,02)\% K_{эф}$.

Загрузка свежей топливной кассеты была необходима для создания положительного запаса реактивности на выгорание топлива. До загрузки запас реактивности был равен $+0,25\% K_{эф}$ в состоянии запаздывающей критичности и оценивался в $\sim -0,23\% K_{эф}$ в импульсном режиме на мощности 1,5 МВт. В феврале 2003 г., когда реактор был остановлен для смены отражателя, запас реактивности при мощности 1,5 МВт был равен $(0,4 \pm 0,05)\% K_{эф}$. Потеря $\sim 0,63\% K_{эф}$ произошла из-за непредвиденного уменьшения эффекта реактивности ПО-3 по сравнению с ПО-2Р.

После загрузки кассеты запас реактивности в состоянии запаздывающей критичности на нулевой мощности составил 1,31% $K_{эф}$, а в импульсном режиме на мощности 1,5 МВт $+ (0,83 \pm 0,06)\% K_{эф}$. Этого запаса реактивности достаточно для компенсации выгорания на период $(3,5 \pm 0,3)$ года работы при установленном регламенте работы реактора (8 двухнедельных циклов в год на мощности 1,5 МВт), т. е. до конца 2007 г. как минимум.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА МОЩНОСТИ И МОЩНОСТИ МЕЖДУ ИМПУЛЬСАМИ. ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ ПО В ДИНАМИКЕ

Форма импульса измерялась по быстрым нейтронам с помощью Th-232 ионизационной камеры и сцинтилляционного детектора по протонам отдачи. Измерения проводились на постоянной мощности в диапазоне от 200 до 1350 кВт. На рис. 5 показана форма импульса и ее аппроксимация по Гауссу.

На рис. 6, 7 приведена форма импульса мощности в большом динамическом диапазоне изменения нейтронного потока, а также распределение фона между вспышками.

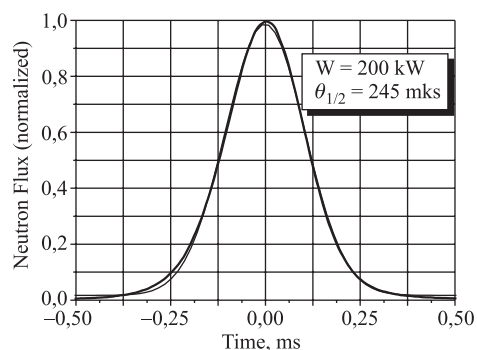


Рис. 5. Форма импульса мощности и ее аппроксимация по Гауссу. Измерения проведены с помощью Th-232-камеры. Импульс нормирован на максимум. Ширина импульса на половине высоты составляет 245 мкс

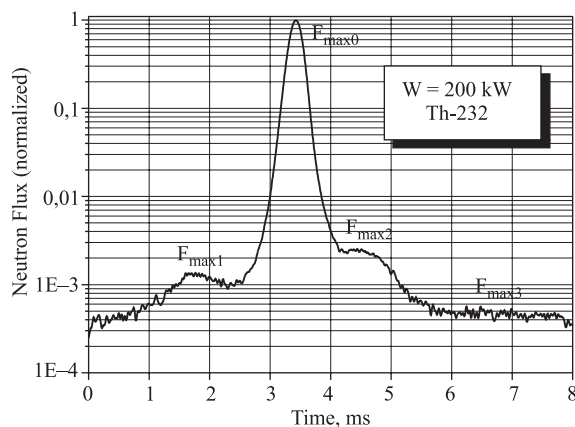


Рис. 6. Форма импульса мощности. Данные нормированы на максимум импульса. Измерения с помощью Th-232-камеры. Положение отдельных максимумов на вспышке использовано в табл. 2 для оценки численных характеристик вспышки

Некоторые численные характеристики импульса мощности представлены в табл. 2.

Помимо измерений эффектов реактивности ПО в статическом подкритическом режиме, результаты которых даны выше в разделе 3, они определялись также по данным измерений формы импульса мощности и фоновой мощности в импульсном режиме. Ход реактивности вычислялся решением обратного уравнения кинетики. Значение времени жизни нейтронов в активной зоне считалось равным 65 нс. На рис. 8 приведен ход реактивности, вычисленный из импульса мощности, измеренного ториевой камерой деления и сцинтилляционным детектором. Как видно, правая от максимума часть

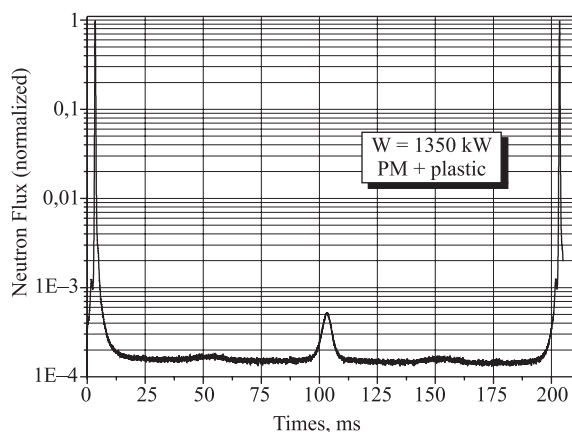


Рис. 7. Распределение мощности между двумя последовательными вспышками. Данные нормированы на максимум вспышки. Измерение с помощью сцинтилляционного детектора

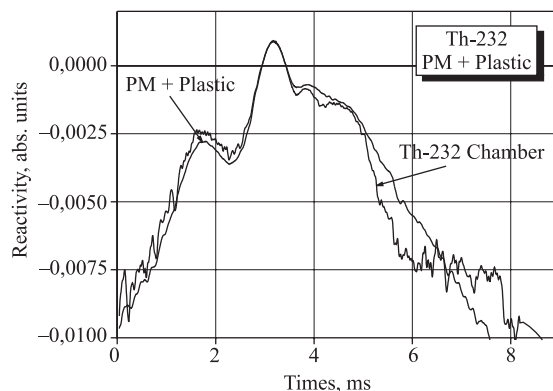


Рис. 8. Ход реактивности вблизи мгновенной критичности. Измерения с помощью ториевой камеры деления (утолщенная линия) и сцинтилляционного детектора

кривой реактивности на рис. 8 не соответствует ходу реактивности, измеренной в статических измерениях и представленной на рис. 4, б. Эта сильная асимметрия хода восстановленной реактивности в побочных максимумах может быть следствием заметной доли делений в зоне на медленных нейтронах. Сопоставление данных статических и динамических измерений, а также сравнение с результатами динамических измерений с ПО-2Р позволяет в принципе рассчитать параметры этого запаздывающего источника.

Эффекты реактивности подвижных отражателей, полученные в динамических измерениях, представлены в табл. 3.

Таблица 2. Некоторые численные характеристики импульса мощности и фона между импульсами. Частота повторения импульсов 4,97 1/с. Временные интервалы определялись от сигнала реакторного старта

| № | Название параметра | Обозначение | Значение | Обратная величина |
|---|---|---------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 1 | Основной импульс | | | |
| | Максимум | F_{max0} | 1,00 | |
| | Полуширина | $\theta_{1/2}$, мкс | 245 | |
| | Ширина по основанию (на уровне 0,01 от максимума) | Δt_0 , мкс | 850 | |
| | Положение максимума | t_{max0} , мс | 3,423 | |
| 2 | 1-й побочный импульс | | | |
| | Максимум | F_{max1} | $1,25-1,40 \cdot 10^{-3}$ | 800-752 |
| | Положение максимума | t_{max1} , мс | 1,70-1,80 | |
| | Ширина по основанию | Δt_1 , мс | 1,00 | |
| 3 | 2-й побочный импульс | | | |
| | Максимум | F_{max2} | $2,50-3,00 \cdot 10^{-3}$ | 400-333 |
| | Положение максимума | t_{max2} , мс | 4,48 | |
| | Ширина по основанию | Δt_2 , мс | 1,0 | |
| 4 | «Горб» («плато») | | | |
| | Амплитуда | F_{max3} | $5,03-6,60 \cdot 10^{-4}$ | 1590-1520 |
| | Ширина по основанию | Δt_3 , мс | 1,80 | |
| | Начало | t_{pl} , мс | 5,90 | |
| 5 | Фон между импульсами | F_{bg} | $(1,40-1,70) \cdot 10^{-4}$ | 7140-5880 |
| 6 | Сателлит | | | |
| | Отношение максимума сателлита к фону | F_{maxSat}/F_{bg} | 3,20-3,40 | |
| | Положение максимума | t_{maxSat} , мс | 103,23 | |
| | Полуширина | $\theta_{1/2Sat}$, мс | 4,25-4,34 | |
| 7 | Ширина по основанию | Δt_{Sat} , мс | 10,0 | |
| | Малые сателлиты от противовеса ОПО | | | |
| | Отношение максимума малого сателлита к фону | $F_{maxSatSmal}/F_{bg}$ | 1,08-1,12 | |
| | Положение максимума | $t_{maxSatSmal}$, мс | 51,73; 152,06 | |
| | Полуширина | $\theta_{1/2мс}$ | 15,0-15,6 | |
| | Ширина по основанию | $\Delta t_{SatSmal}$, мс | 30,0 | |

Прим.: Разброс значений амплитуды, указанных в таблице параметров, есть результат отдельных измерений, проведенных на разных уровнях мощности.

Таблица 3. Эффекты реактивности подвижного отражателя, полученные в динамических измерениях

| № | Название параметра | Обозначение, ед. измерения | Значение |
|---|--|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 | Равновесная импульсная надкритичность | ε_{max} , доли $K_{эф}$ | $8,85-9,00 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | Полная эффективность подвижного отражателя (лопасти ОПО+ДПО выведены за пределы активной зоны) | $\Delta K_{MR}, 10^{-2} K_{эф}$ | 2,54–2,56 |
| 3 | Эффективность основного подвижного отражателя (ОПО) | $\Delta K_{MMR}, 10^{-2} K_{эф}$ | 1,77–1,78 |
| 4 | Эффективность дополнительного подвижного отражателя (ДПО) | $\Delta K_{AMR}, 10^{-2} K_{эф}$ | 0,77–0,78 |
| 5 | Подкритичность в фоне | $\Delta_{bg}, 10^{-2} K_{эф}$ | 2,45–2,47 |
| 6 | Эффективность противовеса основного подвижного отражателя (ОПО) | $\Delta_1(MMR), 10^{-2} K_{эф}$ | 0,18–0,20 |
| 7 | Разность реактивности основного и 1-го побочного импульса | $\Delta_1, 10^{-2} K_{эф}$ | 0,34–0,37 |

6. ФЛУКТУАЦИИ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ МОЩНОСТИ

Шумы энергии нейтронных импульсов измерялись в диапазоне средней мощности от 230 до 1450 кВт. Для анализа уровня колебаний шумов использовались значения среднеквадратических относительных отклонений энергии импульсов в следующих диапазонах частот: 0–0,25 Гц – низкочастотный диапазон для оценки колебаний, связанных с работой автоматического ре-

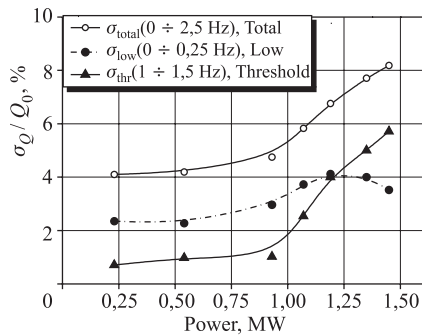


Рис. 9. Изменение величины относительных среднеквадратических флуктуаций энергии импульсов при некоторых значениях установившейся средней мощности от ~ 230 до 1450 кВт в наиболее характерных частотных диапазонах колебаний (указаны на рисунке): \circ — полные флуктуации; \bullet — флуктуации низкочастотной компоненты шумов, связанные с работой автоматического регулятора мощности; \blacktriangle — «пороговая» компонента шумов, ранее появлявшаяся на мощности выше 1,1 МВт

гулятора; 1,0–1,5 Гц – «пороговая» компонента шумов, резко меняющаяся с мощностью. На рис. 9 даны экспериментальные зависимости полных и частичных среднеквадратических отклонений энергии импульсов от среднего установившегося значения. На рис. 10 представлены зависимости полных

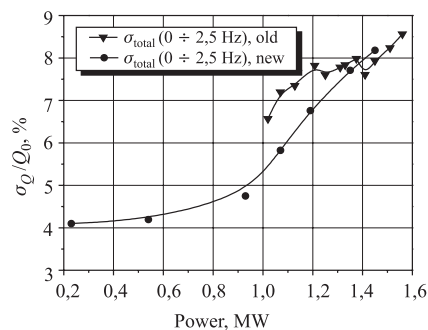


Рис. 10. Изменение величины полных относительных среднеквадратических флуктуаций энергии импульсов при некоторых значениях установившейся средней мощности от ~ 230 до 1450 кВт (диапазон частот указан на рисунке): \blacktriangle — 2002 г.; \bullet — июль 2004 г

колебаний от уровня средней мощности в сравнении с колебаниями, существующими на ИБР-2 до пуска 2004 г. Для сравнения представлены данные от 2002 г. [6].

7. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Полученные свойства реактора ИБР-2 с новым подвижным отражателем ПО-3 гетерогенного типа обеспечивают безопасную и эффективную его работу в импульсном режиме на мощности до 1,5 МВт. Длительность импульса мощности составляет 245 мкс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В. Д., Блохинцев Д. И., Смирнов В. С. и др.* Особенности конструкции и оптимизация модулятора реактивности реактора ИБР-2 Peaceful Uses of Atomic Energy. V. 7. IAEA. Vienna. 1972.
2. *Ананьев В. Д., Блохинцев Д. И., Булкин Ю. М. и др.* ИБР-2 — импульсный реактор периодического действия для нейтронных исследований // ПТЭ. 1977. Вып. 5. С. 17–35.
3. *Шабалин Е. П., Константинов В. И., Rogov A. D.* Модулятор реактивности. Свидетельство на изобретение №. 457402 с приоритетом от 26 ноября 1971.
4. *Ananyev V. D. et al.* An Optimization Study of the Reactivity Modulator for the Periodically Pulsed Fast Reactor. // Atomkernenergie-Kerntechnik. 1983. V. 43, No. 4, P. 253–259.

5. *Ломидзе В. Л. и др.* Экспериментальные и расчетные исследования перспективного модулятора реактивности ИБР-2. // АЭ. 1989. Т. 67. Вып. 5. С. 314–320.
6. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Бондарченко Е. А.* Отчет по экспериментальному исследованию динамических характеристик реактора ИБР-2. ОИЯИ, Дубна, 2002.

Получено 14 октября 2004 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 05.11.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,05. Уч.-изд. л. 1,22. Тираж 325 экз. Заказ № 54650.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/