

P13-2005-184

Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ
ПОДВИЖНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ
РЕАКТОРА **ИБР-2** В ДИНАМИКЕ

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.

P13-2005-184

Исследование эффектов реактивности подвижных отражателей реактора ИБР-2 в динамике

В импульсном режиме работы реактора ИБР-2 на мощности определены эффекты реактивности двух типов подвижных отражателей (ПО). Для этого с хорошей статистической точностью были измерены форма импульса мощности по быстрым нейтронам и мощность, выделяющаяся между импульсами, как функция времени.

Особенность приведенной динамической оценки нейтронно-физических параметров состоит в том, что она получена на основании анализа штатного режима работы реактора. До этого для оценки параметров ПО реактор переводился в стационарный (не импульсный) подкритический режим работы, в котором некоторые быстропотекающие процессы, влияющие на форму импульса мощности, не могли быть определены. Динамический метод позволяет получить детальное описание изменения реактивности при вращении ПО. При этом численные значения эффектов реактивности ПО определяются с высокой точностью.

Необходимо отметить, что успешное использование динамического метода для оценки эффектов реактивности подвижных отражателей возможно только при условии измерения формы импульса мощности в полном динамическом диапазоне изменения нейтронного потока, т. е. от максимума импульса до уровня фона между импульсами. Для реактора ИБР-2 этот диапазон для быстрых нейтронов составляет 10^4 .

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.

P13-2005-184

Investigation of Reactivity Effects of Movable Reflectors of the IBR-2 Reactor in Dynamics

In the designed pulsed mode of operation of the IBR-2 reactor the reactivity effects of two types of movable reflectors (MR) have been evaluated by the dynamic method. For this purpose, the shape of the IBR-2 power pulse for the fast neutrons and the power between pulses (background power) as the time function have been measured (with good statistical accuracy).

The peculiarity of the present dynamic evaluation of neutron-physical parameters is that it is obtained on the basis of the analysis of the designed pulsed mode of the reactor operation. Up to now, the MR parameter evaluations were performed when the pulsed reactor had been put into the stationary (not pulsed) subcritical mode of operation when some fast processes influencing the power pulse shape could not be defined. The dynamic method allows one to obtain a detailed description of the reactivity change at the MR revolving. In this case numerical values of the MR reactivity effects are defined with high accuracy.

It is important to note that successful use of the dynamic method to estimate reactivity effects of the movable reflectors is possible only when the power pulse shape is measured in the total dynamic range of neutron flux change, i.e. from the pulse maximum to the background level between pulses. For the IBR-2 reactor this range for the fast neutrons is equal to 10^4 .

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

ВВЕДЕНИЕ

Главная особенность реактора ИБР-2 — наличие механического модулятора реактивности — подвижного отражателя (ПО), который обеспечивает циклический процесс глубокого изменения реактивности. С периодом 0,2 с реактор ИБР-2 за время менее 1 мс переводится из глубоко подкритического состояния в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам. Подвижный отражатель, выработавший ресурс, заменяется на новый. Нейтронно-физические характеристики ПО, которые определяют длительность нейтронного импульса (импульса мощности) и фон между импульсами, обычно измеряют в стационарном подкритическом режиме работы реактора на постоянной (не импульсной) мощности при медленном вращении ПО. Такие измерения довольно трудоемки и не позволяют получить детальную картину периодического изменения реактивности при вращении ПО. Кроме того, как показывают исследования, изменения реактивности в динамике и в стационарном режиме различаются [1]. Ход реактивности при вращении ПО можно определить довольно быстро с очень высокой точностью, если использовать экспериментальные данные по изменению мощности за период следования нейтронного импульса. При этом форма импульса должна быть измерена с высокой точностью и в полном динамическом диапазоне изменения нейтронного потока, т. е. от максимума импульса до уровня фона между импульсами. Отметим, что для реактора ИБР-2 этот диапазон составляет 10^4 . В работе представлены основные результаты динамических измерений нейтронно-физических параметров двух вариантов подвижных отражателей: ПО-2М, работавшего в период 1996–2003 гг., и ПО-3, установленного в 2004 г.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА МОЩНОСТИ И МЕТОДА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Форма импульса измерялась по быстрым нейтронам с помощью двух независимых взаимодополняющих методов: токового анализа с регистрацией импульса тока от ФЭУ с пластиковым сцинтиллятором по протонам отдачи и счетного анализа по времени пролета с помощью ионизационной камеры деления с ^{232}Th -конвертером. Камера была установлена на нейтронном пучке

№ 1 на расстоянии 11,5 м от поверхности замедлителя и регистрировала быстрые нейтроны с энергией выше 1,2 МэВ. Полная погрешность измерения во времени с учетом ширины временного канала составляла 4 мкс. Сцинтилляционные детекторы были установлены в наклонном канале ИБР-2 на расстоянии около 2 м от поверхности активной зоны. Для уменьшения фона от тепловых и резонансных нейтронов, а также гамма-квантов детектор был окружен защитой. Сцинтилляционный детектор в основном использовался для анализа хода реактивности между импульсами в фоне, когда деталями изменения мощности в интервале времени менее 10 мкс можно было пренебречь. На рис. 1 приведена принципиальная схема размещения детекторов. В обоих методах форма импульса мощности измерялась в полном динамическом диапазоне изменения нейтронного потока, т. е. 10^4 . Частота повторения импульсов мощности составляла $4,87 \div 4,97 \text{ с}^{-1}$.

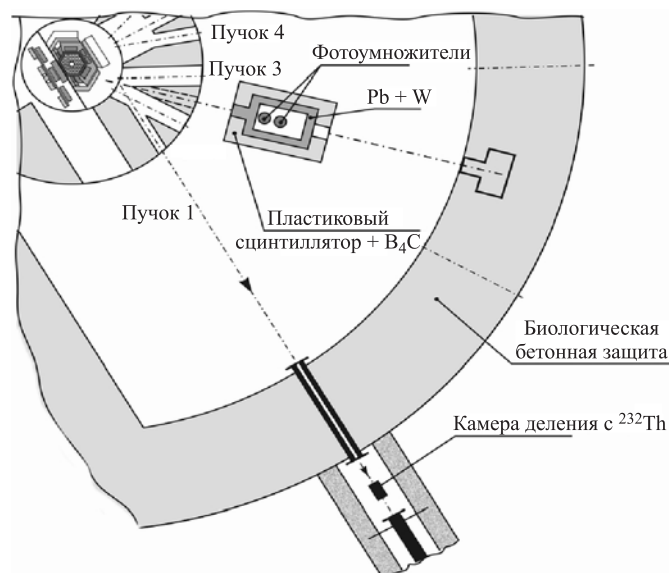


Рис. 1. Принципиальная схема размещения детекторов на реакторе ИБР-2 для измерения формы импульса мощности

Для анализа данных использовались уравнения одноточечной модели реактора, приведенные к следующему виду:

$$\tau \frac{dP}{dt} = P\varepsilon + S, \quad (1)$$

$$S = \sum_i S_i, \quad (2)$$

$$T_i \frac{dS_i}{dt} + S_i = \beta \mu_i P, \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, 6$ — номер группы запаздывающих нейтронов; P — мощность реактора (экспериментальная зависимость изменения нейтронной мощности во времени); t — время; τ — эффективное время жизни мгновенных нейтронов; ε — реактивность на мгновенных нейтронах; $\beta_i, \beta = \sum_i \beta_i$ — соответственно доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная; $S_i, S = \sum_i S_i$ — соответственно нормированная интенсивность источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная; $\mu_i = \beta_i/\beta$, $T_i = 1/\lambda_i$, λ_i — соответственно относительная доля, постоянная времени и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i .

Мощность и интенсивность источников запаздывающих нейтронов выражены в относительных единицах.

Использованы следующие значения параметров: $\mu_i = 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035$; $\lambda_i = 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21 \text{ с}^{-1}$ [2]; $\tau = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$; $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$.

Начальное значение S перед началом развития импульса мощности вычислялось по формуле

$$S^0 = \sum_i S_i^0 = \sum_i \left(\beta E^0 \frac{\mu_i \lambda_i \exp(-\lambda_i T_n)}{1 - \exp(-\lambda_i T_n)} + \beta \mu_i P_\Phi \right), \quad (4)$$

соответствующей работе реактора со стабильными импульсами мощности с энергией E^0 и фоновой мощности P_Φ . Мощность фона вычислялась как средняя мощность между импульсами. В формуле (4) T_n — период следования импульсов мощности. Ход реактивности за период импульса мощности вычислялся по формуле

$$\varepsilon = \left(\tau \frac{dP}{dt} - S \right) / P, \quad (5)$$

вытекающей из уравнения (1).

2. ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ ПОДВИЖНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Если известен ход изменения реактивности за период вращения ПО, то все необходимые численные нейтронно-физические характеристики ПО (эффекты реактивности) могут быть получены из этой зависимости. В разделе представлены данные по изменению реактивности за период вращения ПО, а также значения основных эффектов реактивности.

2.1. Подвижный отражатель ПО-2М (1996–2003 гг.). Подвижный отражатель ПО-2М состоит из двух соосно вращающихся в одном направлении отражателей — основного (ОПО) и дополнительного (ДПО). Скорость вращения ОПО — 1500 об/мин и ДПО — 300 об/мин. ОПО представляет собой удлиненную лопасть, проходящую при вращении мимо активной зоны, и два противовеса (рис. 2). ДПО имеет более сложный вид: лопасть в виде трезубца с одной стороны (трезубец при вращении проходит мимо активной зоны) и противовеса с другой. Трезубец обеспечивает резкое изменение реактивности при переходе реактора из надкритического состояния на мгновенных нейтронах в подкритическое.

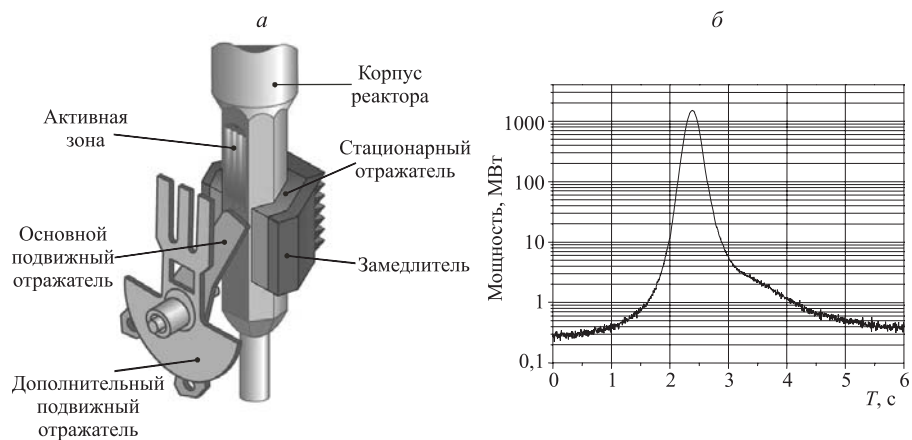


Рис. 2. Схема реактора ИБР-2 с подвижным отражателем ПО-2М (а) и форма импульса мощности (б). Средняя мощность 2 МВт

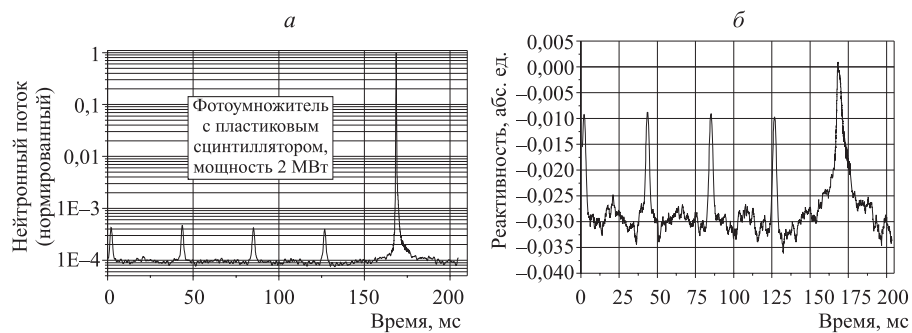


Рис. 3. а) Распределение мощности между двумя последовательными вспышками. Данные нормированы на максимум вспышки. б) Вычисленное изменение реактивности. Средняя мощность 2 МВт

Основные результаты по форме импульса мощности и изменению реактивности за период вращения подвижного отражателя ПО-2М представлены на рис. 2, 3.

2.2. Подвижный отражатель ПО-3 (установлен в 2004 г.). Основной подвижный отражатель ПО-3 (ОПО) представляет собой ротор сложной конфигурации, имеющий на периферии два выступа: один — лопасть в виде замкнутого трезубца, другой — противовес, обеспечивающий динамическую балансировку ротора. Скорость вращения ОПО составляет 600 об/мин. Дополнительный подвижный отражатель имеет подобную конфигурацию, но с

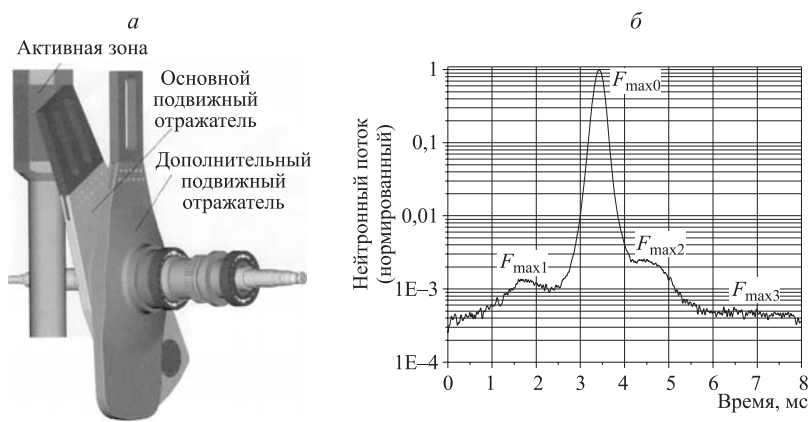


Рис. 4. Схема реактора ИБР-2 с подвижным отражателем ПО-2М (а) и форма импульса мощности (б). Данные нормированы на максимум импульса. Средняя мощность 1,5 МВт

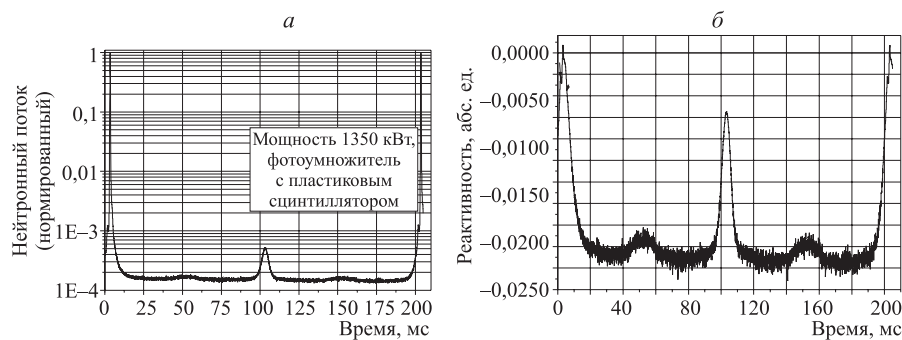


Рис. 5. а) Распределение мощности между двумя последовательными вспышками ИБР-2 с подвижным отражателем ПО-3. Данные нормированы на максимум вспышки. б) Вычисленное изменение реактивности. Средняя мощность 1,35 МВт

двумя зубцами и вращается со скоростью 300 об/мин. Геометрия лопастей ОПО и ДПО близка к оптимальной для наиболее быстрой модуляции реактивности при формировании импульса мощности. Основные результаты по форме импульса мощности и изменению реактивности за период вращения подвижного отражателя ПО-3 представлены на рис. 4, 5.

2.3. Сравнительные характеристики эффектов реактивности реактора ИБР-2 с подвижным отражателем ПО-2М и ПО-3. Значения основных эффектов реактивности ПО, полученные из обработки измеренной формы импульса мощности, представлены в таблице. Замена ПО-2М на ПО-3 привела, как следует из анализа результатов динамических измерений, к уменьшению импульсной доли запаздывающих нейтронов (β_n) с $1,6 \cdot 10^{-4}$ до $1,36 \cdot 10^{-4}$ K_{eff} , увеличению параметра параболы реактивности α и увеличению длительности нейтронной вспышки с 215 до 245 мкс (на полувысоте). Упомянутые понятия β_n (оно введено в работе [3]) и α имеют следующий смысл.

Импульсная доля запаздывающих нейтронов β_n . Небольшие изменения реактивности, выраженной в долях β_n , вызывают практически такие же изменения энергии импульса мощности. Так, изменение реактивности (в долях β_n) на 10% приводит к изменению энергии импульса мощности на те же

Эффекты реактивности подвижного отражателя ПО-2М и ПО-3, полученные в динамических измерениях

| Параметры | Обозначение, единицы измерения | ПО-2М | ПО-3 |
|--|---|--|---|
| Равновесная импульсная надкритичность | ε_{max} , доли K_{eff} | $9,8 \cdot 10^{-4}$ | $8,85-9,00 \cdot 10^{-4}$ |
| Полная эффективность подвижного отражателя (лопасти ОПО + ДПО выведены за пределы активной зоны) | ΔK_{MR} , $10^{-2} K_{eff}$ | 3,1 | 2,54–2,56 |
| Эффективность ОПО | ΔK_{MMR} , $10^{-2} K_{eff}$ | 2,1 | 1,77–1,78 |
| Эффективность ДПО | ΔK_{AMR} , $10^{-2} K_{eff}$ | 1,02 | 0,77–0,78 |
| Подкритичность в фоне | ΔK_{bg} , $10^{-2} K_{eff}$ | 3,0 | 2,45–2,47 |
| Эффективность противовеса ОПО | $\Delta K_{1(AMR)}$, $10^{-2} K_{eff}$ | 0,20 | 0,18–0,20 |
| Параметр параболы реактивности | α , доли K_{eff} град $^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ Статические измерения | $1,05 \cdot 10^{-3}$ Статические измерения |

10 % с ошибкой 0,5 %. Изменению реактивности на 5 % соответствует еще меньшая ошибка (0,1 %).

Параметр параболы α . Максимальное значение мощности в импульсе достигается в момент перехода реактора из надкритического состояния на мгновенных нейтронах в подкритическое. В этом районе реактивность, обусловленная ОПО, с хорошей точностью описывается параболой $\varepsilon_{\text{ОПО}} = \varepsilon_{\text{max}} - \alpha \varphi_{\text{ОПО}}^2$, где α — параметр параболы (доли K_{eff} град⁻²); $\varphi_{\text{ОПО}}$ — угол поворота ОПО в градусах; ε_{max} — наибольшее значение реактивности, достигаемое в течение импульса.

Определение параметра параболы реактивности на основе данных о форме импульса мощности, т. е. на основе динамических измерений, невозможно без учета дополнительных быстропротекающих процессов, влияющих на форму импульса мощности. Эта задача требует специального рассмотрения.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Исследование нейтронно-физических характеристик подвижных отражателей (ПО) реактора ИБР-2 динамическими методами в импульсном режиме работы реактора позволяет получить детальное описание хода изменения реактивности при вращении ПО. В этом методе эффекты реактивности ПО определяются с высокой точностью. Необходимо отметить, что успешное использование динамического метода для оценки эффектов реактивности подвижных отражателей возможно только при условии измерения формы импульса мощности с хорошей статистической точностью и в полном динамическом диапазоне изменения нейтронного потока, т. е. от максимума импульса до уровня фона между импульсами. Для реактора ИБР-2 этот диапазон составляет 10^4 .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В. Д. и др.* Пуск и исследования основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа. Сообщение ОИЯИ Р13-2004-156. Дубна, 2004.
2. *Китин Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1967.
3. *Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417.

Получено 21 ноября 2005 г.

Корректор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 24.01.2006.

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

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,69. Тираж 305 экз. Заказ № 55190.

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/