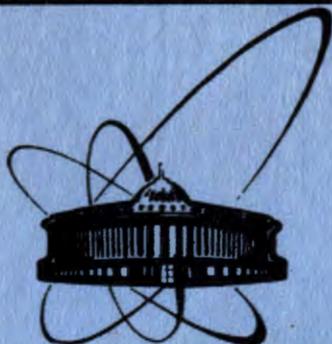


85-339



**Объединенный  
Институт  
Ядерных  
Исследований  
Дубна**

R13-85-339

В.Д.Ананьев, В.С.Смирнов, Хан Пхун Ги,  
Е.П.Шабалин

**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ  
В РЕАКТОРЕ ИБР-2 МЕТОДОМ БАЛАНСА**

Направлено в журнал "Атомная энергия"

**1985**

Метод баланса использовался для изучения медленных эффектов реактивности. В применении к реактору ИБР-2<sup>1,2</sup> этот метод выглядит так. В критическом состоянии реактора измеряют значения тех параметров, степень влияния которых на реактивность известна из предыдущего опыта: положение  $i$ -го блока регулирования ( $z_i$ ), температуру теплоносителя /натрия/ на входе в активную зону ( $T_{вх}$ ), расход натрия ( $G$ ). В этом случае уравнение баланса реактивности есть /для  $G \geq 80 \text{ м}^3/\text{ч}$ /:

$$\sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{i0})] + k_T(T_{вх} - T_{вх0}) + k_G(G^2 - G_0^2) + \rho_{экс} + \rho_x = 0, \quad /1/$$

где  $k_i(z_i)$  - градуировочная кривая эффективности  $i$ -го блока СУЗ,  $k_T < 0$  - изотермический температурный коэффициент реактивности,  $k_G < 0$  - гидродинамический коэффициент реактивности,  $z_{i0}$ ,  $T_0$  и  $G_0$  - опорные значения параметров, соответствующие исходному критическому состоянию реактора в начале его энергетического пуска /декабрь 1981 г./;  $\rho_{экс}$  - реактивность, вносимая при изменении конфигурации экспериментальных устройств на реакторе,  $\rho_x$  - неизвестная реактивность, включающая мощностной эффект реактивности, изменение реактивности с выгоранием топлива и другое. В ряде случаев в уравнение /1/ добавляли член "быстрого" мощностного эффекта реактивности /МЭР/  $P \cdot k_P$  ( $P$  - средняя мощность реактора), который обусловлен изменением температуры активной зоны на мощности и определен ранее с помощью динамических методов<sup>3,4</sup>.

Из уравнения /1/ вычисляют значения величины  $\rho_x$ , статистическая погрешность оценки  $\rho_x$  за счет погрешности измерения параметров - не более  $0,01 \beta$   $\beta = 2,165 \cdot 10^{-8} \text{ ДК/К}$ , реальный разброс значений  $\rho_x$  в установившемся режиме работы реактора составляет  $0,02-0,04 \beta$ . Иногда наблюдались медленные отклонения реактивности до  $0,15 \beta$ , которые, по-видимому, обусловлены наличием люфта в закреплении ТВС.

Переменные параметры уравнений /1/ измеряются на ИБР-2 ежедневно, при выводе реактора на мощность - каждые 15 мин. В измерениях, проведенных в период с начала энергетического пуска до 1985 года, установлен сложный характер изменения запаса реактивности ( $\rho_x$ ) при выводе реактора на мощность и работе его на постоянном уровне мощности /см. рис.1 и 2/. Анализ полученных данных показал, что помимо "быстрого" МЭР /с постоянной вре-

мени 10 с и амплитудой -  $0,65 \beta/\text{МВт}$ /, в реакторе "работают" медленные механизмы МЭР. Внимательное изучение положительной компоненты МЭР, описанной в<sup>3</sup>, показало, что на самом деле она состоит из нескольких составляющих - одной с постоянной времени -  $0,5$  ч, и более медленных - с постоянными времени 3-6 ч. Первая составляющая в процессе вывода реактора на мощность /в интервале 0-3 ч на рис.1 и 2/ проявляется почти одновременно с быстрой отрицательной компонентой МЭР /- $0,65 \beta/\text{МВт}$ /, амплитуда ее -  $0,4 \beta/\text{МВт}$ . Более медленные положительные компоненты МЭР проявляются в течение 10-12 ч после вывода реактора на мощность; их амплитуда сложным образом зависит от мощности реактора - она линейна в диапазоне от 0 до 1-1,5 МВт и постоянна при большей мощности. Как уже объяснялось в работе<sup>3</sup>, положительные компоненты МЭР в основном обусловлены перемещением стационарных отражателей реактора /двух блоков/ при их разогреве. При некоторой мощности, уровень которой зависит от интенсивности охлаждения, блоки стационарных отражателей "утикаются" друг в друга и касаются страховочного кожуха корпуса реактора, вследствие чего увеличение реактивности прекращается. Сумма значений положительных компонент МЭР на мощности 2 МВт равна  $1,3 \pm 0,1 \beta$ , т.е. полностью компенсирует отрицательный МЭР за счет нагрева активной зоны; в итоге асимптотическое значение МЭР, достигаемое через 10-12 ч, близко к нулю.

Кроме того, в течение каждого двухнедельного цикла работы реактора проявляется еще более медленный отрицательный эффект реактивности, связанный, по-видимому, с нагревом защитных и опорных конструкций реактора. Максимальная скорость ввода отрицательной реактивности при этом составляет  $\sim 0,06 \beta/\text{сут}$  на мощности 1 МВт и  $-0,18 \beta/\text{сут}$  на мощности 2 МВт; за один цикл работы реактора выводится реактивность  $0,20-0,25 \beta$  при  $P = 1 \text{ МВт}$  и  $0,7-0,8 \beta$  - при  $P = 2 \text{ МВт}$ . Однако асимптотическое значение этой отрицательной компоненты, по-видимому, не достигается за 2 недели; специально проведенный опыт показал, что релаксация этого эффекта в первые двое суток после снижения мощности практически не наблюдается, а при повторном запуске реактора через 10 дней после сброса мощности с 2 МВт потеря реактивности еще составляет  $0,1-0,2 \beta$ . Примечательно, что этот эффект падения реактивности при работе реактора в установившемся режиме сопровождается увеличением эффективности нейтронных каналов аварийной защиты реактора. Детекторами нейтронов в этих каналах являются ионизационные камеры с бором, установленные в толще бетонной защиты реактора; под "эффективностью" каналов подразумевается отношение амплитуды импульса тока камеры к мощности реактора. Изменение эффективности нейтронных каналов, причиной которого может быть "ужесточение" спектра нейтронов при нагреве бетона, за 2-недельный цикл на мощности 2 МВт составляет 8-11%, асимптотическое значение, достигаемое к концу третьего цикла, равно 17%. Изменение эффективности идет, в общем, не-

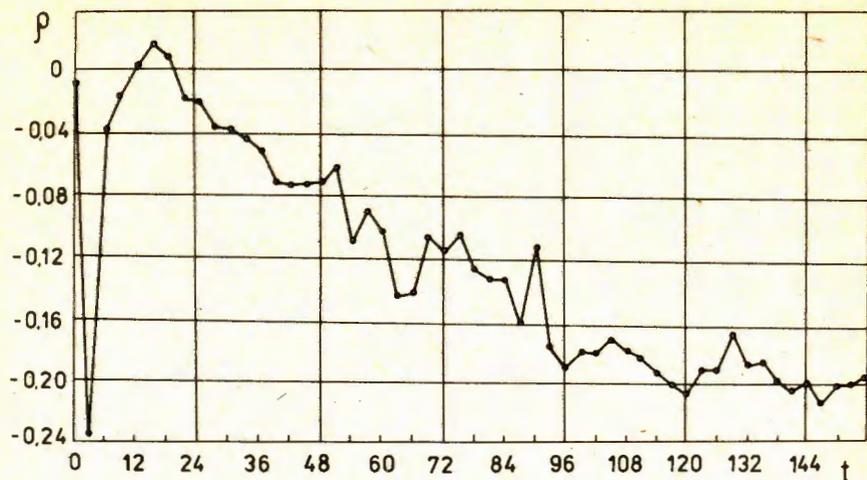


Рис.1. Изменение мощного эффекта реактивности  $\rho$ , доли  $\beta_{эфф}$  / после вывода реактора ИБР-2 на мощность 1 МВт в момент  $t = 3$  ч.

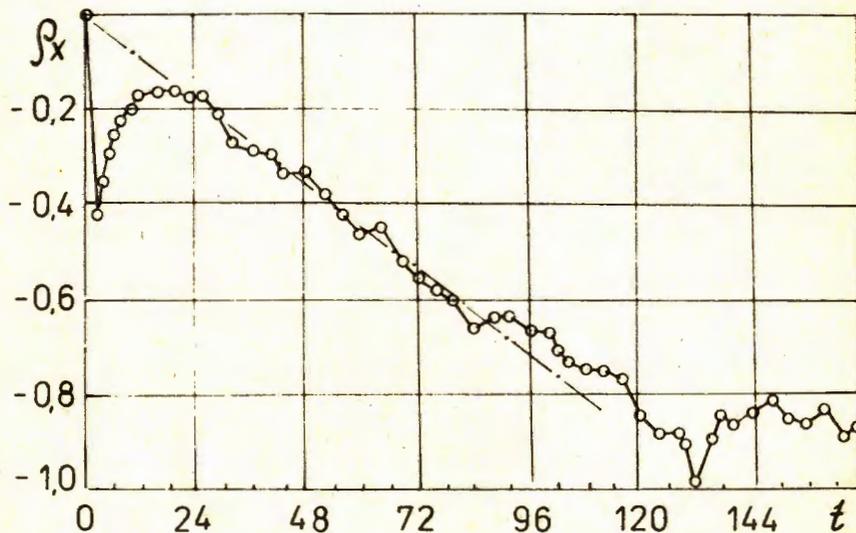


Рис.2. Изменение мощного эффекта реактивности  $\rho_x$ , доли  $\beta_{эфф}$  / после вывода реактора ИБР-2 на мощность 2 МВт в момент  $t = 3$  ч; штрих-пунктирная прямая соответствует скорости изменения реактивности  $-0,18\beta_{эфф} / \text{сут.}$

сколько медленнее, чем изменение реактивности; этот факт отражает характер нагрева защитных конструкций реактора - более глубокие слои, где находятся камеры, прогреваются медленнее, чем ближайшие к реактору конструкции, влияющие на реактивность.

Одной из возможных причин изменения реактивности и эффективности нейтронных каналов в процессе прогрева защитных конструкций может быть также миграция воды внутри бетона от горячих мест к холодным; в этом случае находит объяснение отмеченный выше факт нелинейности с мощностью эффекта падения реактивности.

Метод баланса реактивности позволил также установить, что скорость изменения реактивности в реакторе ИБР-2, связанного с выгоранием топлива /двуокись плутония/, существенно ниже расчетного значения, составляющего  $0,005 \beta / \text{МВт} \cdot \text{сут.}$

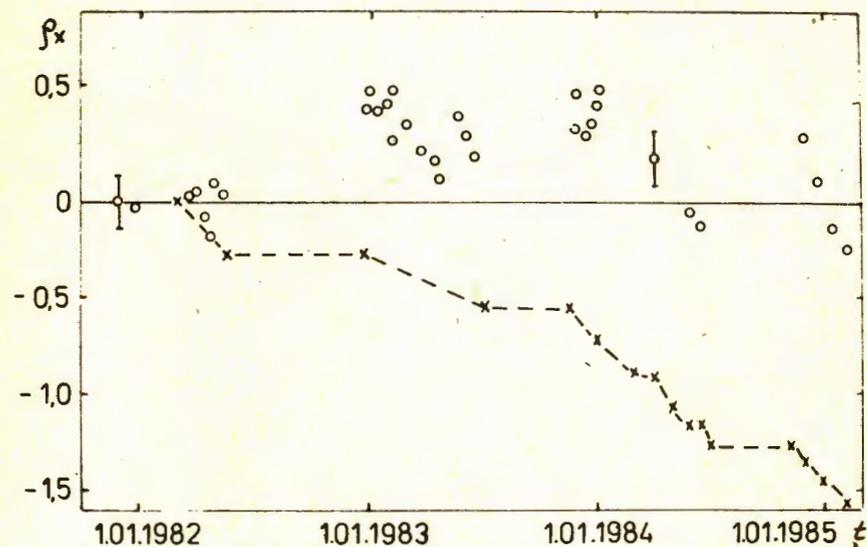


Рис.3. Изменение запаса реактивности  $\rho_x$ , доли  $\beta_{эфф}$  / "холодного" реактора во времени; точки - эксперимент, крестики - расчетный эффект реактивности от выгорания ядерного топлива.

На рис.3 показаны экспериментальные значения изменения реактивности в "холодном" реакторе на нулевой мощности /точки/ и расчетный ход запаса реактивности с выгоранием топлива /крестики/ в течение всего трехлетнего периода энергетического пуска и эксплуатации. Даже к началу 1985 г. при выгорании 0,39% эффект реактивности из-за выгорания ядер плутония практически не проявился. Возможной причиной этого может быть уплотнение столба топливных таблеток в ТВС вследствие тепловых ударов во время импульсов мощности<sup>15/</sup>, что вызывает уве-

лишение реактивности и компенсирует отрицательный эффект выгорания. Если это так, то уплотнение должно составлять ~1% на 1% выгорания. Этот результат позволяет надеяться на то, что в течение всей кампании реактора /до выгорания 5%/ можно будет не производить догрузку ТВС.

Как видно, баланс реактивности, который проводится на ИБР-2 в порядке штатных измерений, позволил выявить ряд неожиданных особенностей поведения реактора. В дальнейшем, с введением системы автоматического контроля, предполагается вести непрерывный баланс реактивности.

Авторы статьи благодарят сменный персонал ИБР-2 за обеспечение регулярных измерений параметров реактора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, №5, с.7.
2. Ананьев В.Д. и др. АЭ, 1979, т.46, вып.6, с.393.
3. Ананьев В.Д. и др. Там же, 1984, т.57, вып.4, с.227.
4. Попов А.К. ОИЯИ, P13-84-338, Дубна, 1984.
5. Ломидзе В.Л. и др. ОИЯИ, 3-11551, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 мая 1985 года.

Ананьев В.Д. и др.  
Изучение эффектов реактивности в реакторе ИБР-2  
методом баланса

P13-85-339

Целью работы было исследование медленных эффектов реактивности в реакторе ИБР-2; задача решалась с помощью регулярного ведения баланса реактивности с учетом смещения блоков регулирования, изменения мощности реактора, а также температуры и расхода теплоносителя. Описываются параметры положительных компонент мощностного эффекта реактивности, в сумме компенсирующих отрицательный эффект реактивности из-за нагрева активной зоны. Обнаружен отрицательный эффект реактивности, связанный с нагревом защитных и опорных конструкций реактора; скорость изменения реактивности в первые 3-4 суток после вывода на мощность 2 МВт составляет  $0,18 \beta_{эф}/сут$ . Установлено, что изменение реактивности в реакторе ИБР-2 за счет выгорания ядерного топлива существенно ниже расчетного значения, и при достигнутом выгорании  $-0,4\%$  почти незаметно.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Ananjev V.D. et al.  
Experimental Investigation of Reactivity Effects  
in the IBR-2 Reactor by the Balance Method

P13-85-339

The work was aimed at studying slow reactivity effects at the IBR-2 reactor; it had been carried out with the help of striking the reactivity balance regularly taking into account the control blocks position, coolant temperature, coolant velocity and reactor power. The measured parameters of the positive components of the power reactivity effect are described; they appeared to compensate asymptotically the fast negative reactivity effect that is of a reactor fuel heating. Another negative reactivity effect was observed; it corresponds to the heating of the reactor shield and supporting constructions. The rate of reactivity changing at first 3-4 days since the reactor starts to operate at 2 MW power is equal to  $-0.18 \beta/day$ . The burning-up reactivity effect occurred to be much less than its calculated value; the effect is nearly undetectable at the burn-up of  $0.4\%$  being reached up to day.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985,