

P13-2013-7

Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

МЕДЛЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ МОЩНОЙ
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ РЕАКТОРА **ИБР-2М**

Медленные эффекты мощностной обратной связи реактора ИБР-2М

Приводятся основные результаты исследования медленных эффектов реактивности мощностной обратной связи модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Работа выполнена по программе энергетического пуска реактора в 2011 г. при энерговыработке до 140 МВт·сут. Показано, что медленная мощностная обратная связь ИБР-2М содержит две компоненты: отрицательную ($-27 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$) и положительную ($+35 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$) с константами экспоненциального изменения, равными -110 и $+1,8$ ч соответственно. По сравнению с ИБР-2, положительная компонента обратной связи уменьшилась на 40 %, отрицательная — на 10 %. Временные константы изменились незначительно ($\sim 10\%$). Основные компоненты медленной связи в реакторе могут быть обусловлены изменениями, происходящими в различных элементах, окружающих активную зону, например в стационарных отражателях, биологической защите и т.д. Система автоматического регулирования мощности ИБР-2М при существующих параметрах медленной обратной связи надежно обеспечивает стабилизацию мощности при заданном уровне.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Slow Power Reactivity Feedback Parameters of the IBR-2M Reactor

The paper presents the results of study on the slow power coefficients of feedback reactivity of the modernized IBR-2 (IBR-2M) reactor. The study was conducted based on the 2011 energy reactor startup program at up to 140 MW·day power production. It is shown that slow power feedback of IBR-2M contains two components, negative ($-27 \cdot 10^{-2} \beta_{eff}$) and positive ($+35 \cdot 10^{-2} \beta_{eff}$), with constants of exponential change equal to -110 and $+1.8$ h, respectively. In comparison with IBR-2, the positive component of feedback decreased by 40 %, and negative one by 10 %. The time constants changed slightly ($\sim 10\%$). The main components of slow feedback in the reactor can be caused by the changes occurring in various elements surrounding the active zone, for example, in stationary reflectors, biological protection, etc. The system of automatic power control of the IBR-2M reactor by existing parameters of slow power feedback reliably provides power stabilization at the set level.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Мощностной эффект реактивности в общем случае есть изменение коэффициента размножения при изменении мощности. Этот эффект реализуется по различным каналам мощностной обратной связи, которые по времени действия для ИБР-2М можно разделить на быстрые (менее 3 мин) и медленные (с временными константами от 3 мин до нескольких суток). Знание параметров медленных эффектов реактивности необходимо для понимания и прогнозирования состояния реактора при длительной его работе, а также оценки динамики развития аварийных ситуаций. Здесь представлены основные результаты экспериментального исследования медленных эффектов мощностной обратной связи, полученные в рамках выполнения программы энергетического пуска реактора ИБР-2М в 2011 г. и на основе данных по работе реактора в 2012 г. при малой энерговыработке: до 140 МВт · сут.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕДЛЕННОЙ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИБР-2М

Под мощностным эффектом реактивности (МЭР) понимается изменение коэффициента размножения (ΔK) при изменении мощности (ΔW) при постоянной температуре (T) и расходе натрия на входе в активную зону (G). Изменение мощности может действовать на реактивность различными способами: может стабилизировать мощность, а может привести к ее колебательной неустойчивости. Если быстрые эффекты реактивности (например изотермический, расходный или быстрый мощностной) могут быть измерены прямым способом, то медленные эффекты реактивности прямым способом измерить невозможно. Основная причина состоит в том, что в процессе длительных измерений (часы–сутки) на исследуемые эффекты накладываются посторонние, например, вызванные изменением расхода и температуры натрия на входе в активную зону, а также множеством других процессов, создающих фоновый шум. Изменение коэффициента размножения в течение длительного интервала времени (часы–сутки) после быстрого возмущения мощности

можно представить в виде

$$\Delta K = \frac{\delta K}{\delta W} \Delta W + \frac{\delta K}{\delta G} \Delta G + \frac{\delta K}{\delta T} \Delta T + \frac{\delta K}{\delta B} \Delta B + \dots \Delta K_x, \quad (1)$$

где $\Delta W, \Delta G, \Delta T, \Delta B$ — изменение мощности, расхода, температуры теплоносителя на входе в активную зону и изменение энерговыработки; $\frac{\delta K}{\delta W}, \frac{\delta K}{\delta G}, \frac{\delta K}{\delta T}, \frac{\delta K}{\delta B}$ — соответствующие коэффициенты реактивности; ΔK_x — шумовой компонент реактивности. Отметим, что в (1) все коэффициенты и переменные взаимосвязаны и, кроме того, зависят от времени работы реактора. Эффект мощностной обратной связи $\frac{\delta K}{\delta W} \Delta W$ в выражении (1) можно представить в виде суммы быстрой и медленной компонент:

$$\Delta K|_{\text{МОС}} = \left(\frac{dK}{dW} \right) \Delta W + \Delta K_m(t), \quad (2)$$

где первый член есть быстрый мощностной эффект реактивности, второй — медленный, dK/dW есть коэффициент реактивности быстрой мощностной обратной связи. Напомним, что временные константы быстрой и медленной обратной связи существенно различаются. Можно считать, что для ИБР-2М через 2–3 мин после возмущения мощности изменение реактивности обусловлено только медленной обратной связью.

Для экспериментального определения полной мощностной обратной связи (быстрой и медленной) используем уравнение баланса реактивности относительно состояния импульсной критичности для «холодного» реактора (базового состояния, мощность менее 1 Вт). Реактивность обратной связи $\rho_{\text{МОС}}(t)$ в этом случае можно представить в виде

$$\rho_{\text{МОС}}(t) = - \left\{ \sum_{i=1}^L [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})] - \rho_T - \rho_G - \rho_\beta - \rho_x \right\}, \quad (3)$$

где $k_i(z_i), k_i(z_{0i})$ — текущие и соответственно базовые значения реактивности, вводимой i -м блоком регулирования при изменении его положения из базового состояния z_{0i} в текущее состояние z_i ; L — число блоков регулирования; ρ_T, ρ_G — температурный и расходный эффекты реактивности соответственно; ρ_β — эффект энерговыработки; ρ_x — случайные эффекты от шумов реактивности различного рода. Все параметры, входящие в уравнение (3), зависят от времени. Для получения оценки мощностной обратной связи измерялись следующие параметры реактора:

- положение всех блоков регулирования z_i ,
- температура натрия на входе в активную зону T ,
- расход натрия через активную зону G ,
- энергия импульсов (мощность W).

Частота опроса значений всех параметров, кроме мощности, составляла 10 1/с, для мощности — 5 1/с. Техника эксперимента по измерению медленных компонент мощностной обратной связи состояла в следующем. Реактор выводился на заданный уровень средней мощности. Далее система автоматической стабилизации в течение длительного времени, вплоть до двух суток, поддерживала мощность на этом уровне. Измерялись указанные выше параметры реактора, по которым затем вычислялись отдельные компоненты реактивности обратной связи и определялись константы ее спада. Для определения зависимости $\rho_{\text{МОС}}(t)$ от мощности и расхода натрия через активную зону реактор выводили на мощность 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 МВт при разных значениях расхода натрия 80, 90, 100 м³/ч с последующей работой в течение некоторого времени при каждом уровне мощности. Время вывода реактора на мощность 2 МВт составляло 2 ч. Температурные и расходные эффекты обратной связи оценивались с использованием изотермического $\Delta K/\Delta T = -1,19 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/^\circ\text{C}$ и асимптотического расходного $\Delta K/\Delta G_{\text{ас}} = -0,70 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{м}^3/\text{ч}$ коэффициентов реактивности. Эффект энерговыработки ИБР-2М при малом выгорании не учитывался. Расчетный коэффициент выгорания составляет $-0,5 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{МВт} \cdot \text{сут}$.

КАЧЕСТВЕННОЕ РАССМОТРЕНИЕ МЕДЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ РЕАКТИВНОСТИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ИБР-2М

Реактивность $\rho(t) = \sum_{i=1}^L [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})]$, вводимая блоками регулирования в процессе работы реактора, компенсирует действие различных каналов обратной связи: температурной, мощностной, выгорания и т.д. $\rho(t) = -[\rho_{\text{МОС}}(t) + \rho_T + \rho_G + \rho_s + \rho_x]$. Полная реактивность нулевая — реактор находится в критическом равновесном состоянии. Мощностная обратная связь определяется в виде выражения (3). Типичные зависимости изменения полной реактивности обратной связи $\rho(t)$ и реактивности мощностной связи $\rho_{\text{МОС}}(t)$ в одном из циклов реактора приведены на рис. 1. Здесь и далее в тексте для простоты изложения мощностная обратная связь представлена с обратным знаком, т.е. в виде реактивности, компенсирующей эту связь.

Не вдаваясь в суть процессов, приводящих к появлению обратных связей, поведение медленной мощностной связи в ИБР-2М можно описать следующим образом (см. рис. 1). После ввода реактивности ρ_{max} , необходимой для подъема мощности на заданный уровень, начинается асимптотический спад реактивности на величину $\Delta\rho_{\text{ч}}$ с константой $\tau_{\text{ч}}$ (часы). Время спада реактивности от максимального до минимального значения составляет 5–25 ч. Затем идет асимптотический рост реактивности на величину $\Delta\rho_{\text{с}}$ с константой $\tau_{\text{с}}$ (сутки). В общем случае изменение реактивности по-

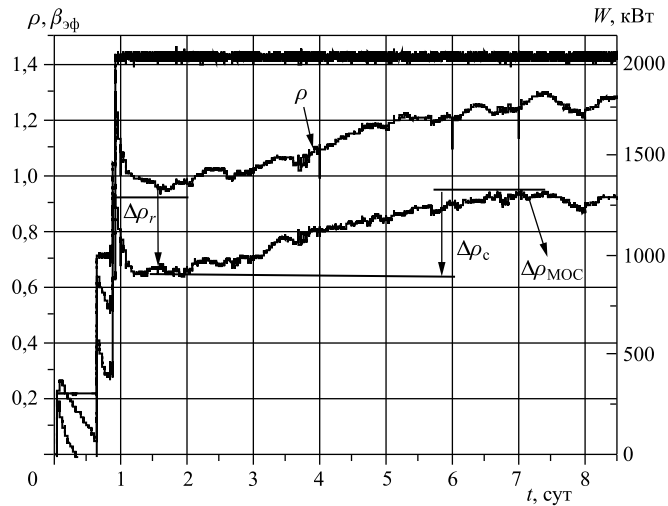


Рис. 1. Типичное изменение полной реактивности $\rho(t)$ и реактивности мощностной обратной связи $\rho_{\text{МОС}}(t)$ в зависимости от времени (t) при выводе реактора на номинальную мощность 2 МВт с расходом теплоносителя через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{ч}$. Пояснения в тексте

сле выхода на постоянный уровень мощности следует согласно зависимости $\rho(t) = -\Delta\rho_r[1 - \exp(-t/\tau_r)] + \Delta\rho_c\{1 - \exp[-(t - T_{\text{min}})/\tau_c]\}$, где T_{min} — время, при котором реактивность минимальна.

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. СРАВНЕНИЕ С ИБР-2

Рассмотрим изменение реактивности после выхода на постоянный уровень мощности более детально, т. е. рассмотрим спад реактивности и ее дальнейший рост. Как видно из рис. 1, мощностная обратная связь повторяет ход полной реактивности. Спад реактивности после выхода на мощность близок к одноэкспоненциальной зависимости. В редких случаях ($\sim 10\%$) наблюдается значимый двухэкспоненциальный спад. Временные константы двухэкспоненциального спада различаются в 2–10 раз, амплитуды составляющих близки друг к другу. Изменение константы спада реактивности в зависимости от уровня мощности представлено на рис. 2, из которого видно, что, несмотря на большой разброс данных, наблюдается тенденция роста τ_c с увеличением мощности. В первом приближении рост τ_c можно представить линейной зависимостью:

$$\tau_c(\text{ч}) = 0,92 W (\text{МВт}).$$

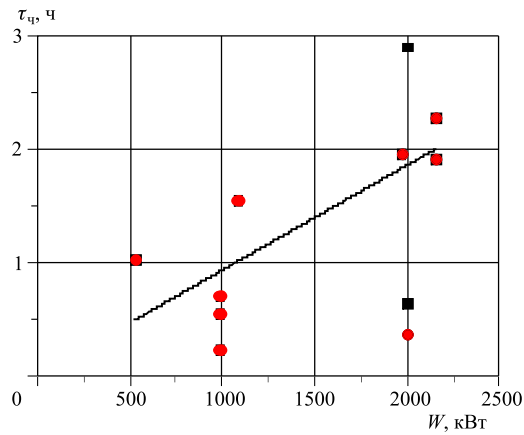


Рис. 2. Изменение константы спада реактивности обратной связи (τ_{χ}) после выхода на постоянную мощность (W) с расходом натрия через активную зону в диапазоне 80–100 м³/ч

Спад реактивности $\Delta\rho_{\chi}$ в зависимости от уровня мощности можно описать параболой с минимумом при мощности 0,91 МВт, равным $8,1 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$ (см. рис.3). При этом длительность цикла непрерывной работы реактора ($T_{ц}$), при которой рост реактивности компенсирует спад, можно определить из $(T_{ц} - T_{min})/\tau_c = \ln(1 - \Delta\rho_{\chi}/\rho_c)$.

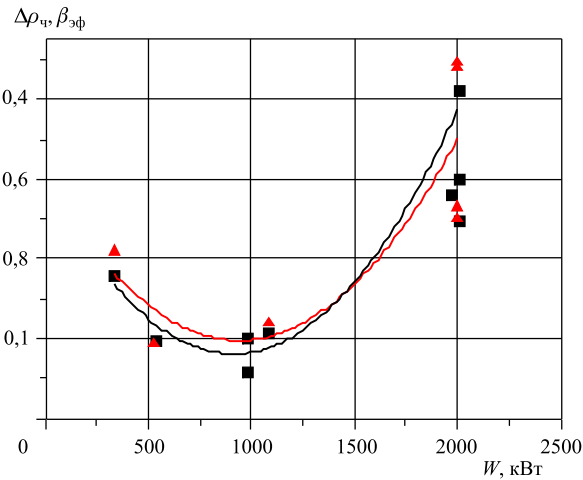


Рис. 3. Изменение глубины асимптотического спада реактивности мощностной обратной связи ($\Delta\rho_{\chi}$) после подъема мощности на уровень (W) с расходом натрия через активную зону в диапазоне 80–100 м³/ч. Приведены результаты параболической аппроксимации данных

Как видно из рис. 3, при мощности ~ 1 МВт спад реактивности обратной связи минимальный. Наличие некоторых особенностей в работе реактора в области 1 МВт отмечалось и на ИБР-2. Например, в процессе кампании ИБР-2 в спектре шумов энергии импульсов, начиная с ~ 1 МВт, росла так называемая пороговая компонента шумов, которая не была полностью идентифицирована [2]. Наблюдались и другие особенности поведения реактора вблизи средней мощности 1 МВт. Сводные данные по значениям параметров спада и роста реактивности обратной связи ИБР-2М ($\Delta\rho_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{с}}$, $\tau_{\text{с}}$) приведены в табл. 1. Там же для сравнения представлены данные для ИБР-2, усредненные за весь период работы реактора [3]. На рис. 4 показаны кривые баланса реактивности для одного из циклов ИБР-2М и ИБР-2.

Из рис. 4 видно следующее. Во-первых, быстрая мощностная обратная связь ИБР-2 в 1995 г., т. е. через 11 лет эксплуатации реактора, была существенно меньше быстрой связи ИБР-2М. Различие составило $0,45 \beta_{\text{эф}}/\text{МВт}$, что равно коэффициенту быстрой обратной связи ИБР-2М в 2012 г. Таким образом, реактор ИБР-2М на начальном этапе эксплуатации более устойчив и стабилен, чем ИБР-2 через 11 лет его эксплуатации. Высокая устойчивость реактора обеспечивается путем внутренней саморегуляции за счет жесткой

Таблица 1. Средние значения асимптотического спада реактивности обратной связи $\Delta\rho_{\text{ч}}$ после выхода на мощность W , константа спада $\tau_{\text{ч}}$, амплитуда асимптотического роста реактивности $\Delta\rho_{\text{с}}$, константа роста реактивности $\tau_{\text{с}}$, а также время непрерывной работы реактора $T_{\text{п}}$, при котором $\Delta\rho_{\text{ч}} = \Delta\rho_{\text{с}}$. Расход натрия через активную зону равен $80\text{--}100 \text{ м}^3/\text{ч}$. В скобках приведены данные для ИБР-2 [3]

Характер изменения реактивности	Параметр	Связь параметра с мощностью реактора	Значение параметра при мощности 2 МВт
Спад	Глубина спада $\Delta\rho_{\text{ч}}$, $10^{-2} \beta_{\text{эф}}$	$\Delta\rho_{\text{ч}} = 8,1 + 26(W - 0,91)^2$, W [МВт]	35 ± 10 (55 ± 08)
	Константа спада (одна экспонента) $\tau_{\text{ч}}$, ч	$T_{\text{ч}} = 0,92 W$, W [МВт]	$1,84 \pm 1,2$ ($2,5 \pm 0,8$)
	Константы спада (две экспоненты) $\tau_{\text{ч}}$, ч	—	2,9; 0,38; 0,64; 9,0
Рост	Амплитуда роста реактивности $\Delta\rho_{\text{с}}$, $10^{-2} \beta_{\text{эф}}$	—	27 ± 3 (30 ± 20)
	Константа роста $\tau_{\text{с}}$, ч	—	110 ± 20 (92 ± 5)
	$T_{\text{п}}$, сут ($\Delta\rho_{\text{ч}} = \Delta\rho_{\text{с}}$)	—	10 ± 3 (11 ± 1)

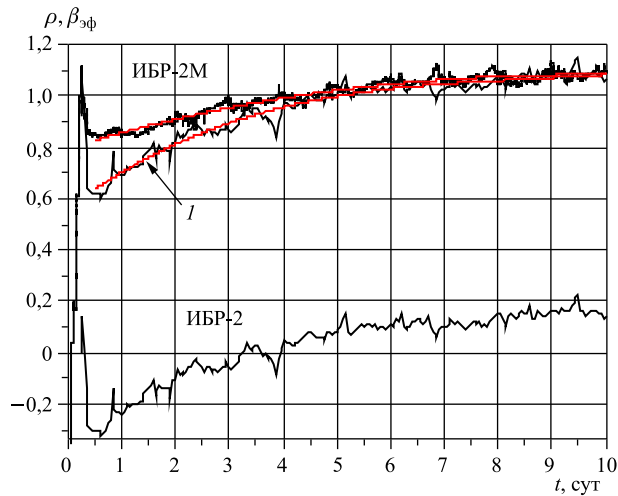


Рис. 4. Изменение реактивности мощной обратной связи после вывода ИБР-2М (2012 г.) и ИБР-2 (1995 г.) на мощность 2 МВт с расходом натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{ч}$. Кривая 1 есть реактивность ИБР-2, совмещенная для сравнения в асимптотике с кривой реактивности для ИБР-2М

быстрой отрицательной обратной связи. Во-вторых, необходимо отметить следующее: глубина спада реактивности обратной связи ИБР-2М на $\sim 40\%$ меньше, чем у ИБР-2. Фактически это означает, что действие медленной положительной обратной связи ИБР-2М по сравнению с ИБР-2 существенно уменьшилось.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ «ЗАПАС» РЕАКТИВНОСТИ

Рассмотрим изменения в балансе реактивности ИБР-2М, появляющиеся при изменении режима вывода реактора на мощность. Подъем мощности в ИБР-2М можно реализовать как в штатном непрерывном режиме, так и в режиме с остановками на промежуточных уровнях. На рис.5 показано изменение обратной связи ИБР-2М при некоторых вариантах ступенчатого вывода реактора на мощность. При остановке при любом уровне мощности начинается спад реактивности. Это общая закономерность поведения медленной обратной связи ИБР-2 и ИБР-2М. При дальнейшем увеличении мощности ввод реактивности (с помощью блоков регулирования) начинается уже с меньшего уровня: $\rho_{\max} - \Delta\rho_{\text{ч}} + \Delta\rho_{\text{с}} \{1 - \exp[-(t - T_{\min})/\tau_{\text{с}}]\}$. Таким образом, при выводе реактора на мощность с промежуточной остановкой длительностью $t - T_{\min}$ появляется дополнительный

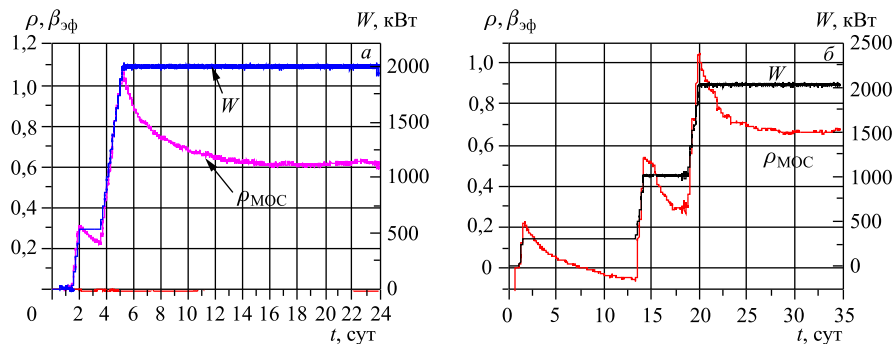


Рис. 5. Примеры медленного изменения реактивности обратной связи $\rho_{\text{МОС}}(t)$ в зависимости от времени (t) при ступенчатом выводе реактора на мощность 2 МВт при расходе теплоносителя через активную зону: a — $80 \text{ м}^3/\text{ч}$; b — $90 \text{ м}^3/\text{ч}$

«запас» реактивности $\Delta\rho_{\text{зап}} = \Delta\rho_{\text{ч}} - \Delta\rho_{\text{с}}\{1 - \exp[-(t - T_{\text{мин}})/\tau_{\text{с}}]\}$. Величина $\Delta\rho_{\text{зап}}$ зависит от мощности реактора (см. ниже), поэтому с увеличением числа промежуточных уровней полный «запас» реактивности при подъеме мощности до номинальной увеличивается не пропорционально числу уровней, а меньше. На рис. 6 приведены значения максимальной пол-

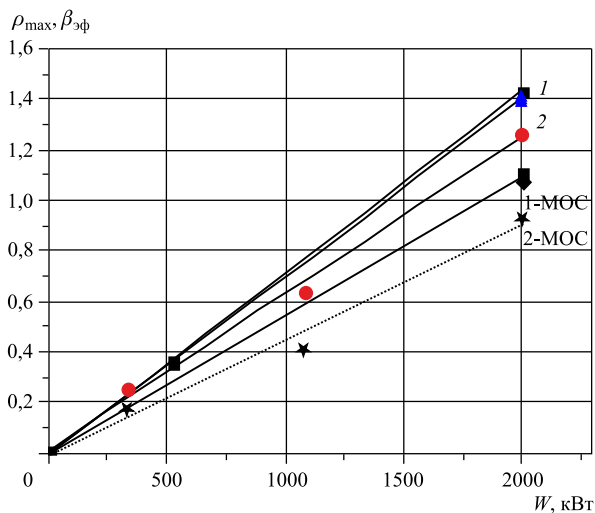


Рис. 6. Изменение максимальной реактивности (ρ_{max}), необходимой для выхода на мощность (W) в штатном режиме (1) и с остановками (2), и максимальной реактивности мощностной обратной связи в штатном режиме (1-МОС) и с остановками (2-МОС) при расходе натрия через активную зону в диапазоне $80\text{--}100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Приведены результаты линейной аппроксимации данных

ной реактивности, необходимой для вывода реактора на заданный уровень мощности, и максимальной реактивности мощностной обратной связи. Из рис. 6 можно видеть, что при ступенчатом характере выхода на номинальную мощность ввод максимальной реактивности на $\sim (18,0 \pm 2,0) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$ меньше, чем в непрерывном режиме. Уменьшение максимальной реактивности наблюдается как для полной реактивности, так и для реактивности мощностной связи. Указанный факт можно интерпретировать как появление «запаса» реактивности, обусловленного ступенчатым характером подъема мощности.

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНЫХ ПРИЧИН МЕДЛЕННОЙ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИБР-2М

Медленное изменение реактивности мощностной обратной связи в процессе работы реактора ИБР-2М в цикле (~ 2 недели) может быть связано с изменением термомеханических и нейтронно-физических характеристик реакторных конструкций, окружающих активную зону. Все другие процессы относятся к категории быстрых (завершаются за время менее 3 мин) или более медленных (месяцы, годы) и здесь не рассматриваются. Некоторые причины медленного изменения реактивности обратной связи в ИБР-2 исследовались в работах [1, 3–6]. С учетом анализа, проведенного в указанных работах, можно сказать, что медленное изменение реактивности ИБР-2М после выхода на мощность вызвано следующими процессами:

- расширением стационарных отражателей;
- сдвигом стационарных отражателей;
- изменением спектра нейтронов в биологической защите при ее прогреве;
- сдвигом откатных защит с водяными замедлителями и опорных конструкций в биологической защите и подвижном отражателе;
- выгоранием топлива.

Спад реактивности (ввод положительной реактивности обратной связи) достаточно полно объясняется приближением стационарных отражателей к активной зоне при их прогреве. Для стационарных отражателей после подъема мощности наблюдаются два конкурирующих эффекта: расширение отражателей по высоте и радиусу активной зоны (отрицательный эффект, он проявляется за счет уменьшения ядерной плотности и уменьшения обратного рассеяния быстрых нейтронов в активной зоне) и сдвиг отражателей как целого в сторону активной зоны (положительный эффект). Эффект смещения одного из двух отражателей $\Delta K/\Delta X = 37 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{мм}$ был измерен во время физического пуска ИБР-2. Изменение реактивности от расширения отражателей оценено в работе [4]: $\sim -0,19 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^\circ\text{C}$. При средней температуре

отражателей 80°C эффект от их расширения может составлять $-10 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}$. Наблюдаемый спад реактивности $35 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}$ с учетом расширения отражателей может быть вызван сдвигом обоих отражателей всего на 0,65 мм в сторону активной зоны. То, что основной компонент в спаде реактивности обусловлен сдвигом стационарных отражателей, косвенно подтверждает и рис. 7, где показано изменение реактивности при подъеме мощности ИБР-2М после ее сброса. Как видно из рис. 7, даже при постоянной мощности спад реактивности имеет ступенчатый вид. Такое может быть, например, при прерывистом смещении стационарного отражателя по направлению к активной зоне после охлаждения отражателя при сбросе мощности и последующего его нагрева при подъеме.

Эффект медленного роста реактивности, равный $27 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}$ (см. табл. 2), может быть вызван несколькими причинами. Во-первых, отрицательный эффект от нагрева биологической защиты, вызванный ее обезвоживанием. Этот эффект достаточно велик: $\sim -5 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}$ и по инерционности сравним с инерционностью роста обратной связи (90–100 ч). Поэтому изменение параметров биологической защиты в процессе работы реактора может быть одной из причин асимптотического роста реактивности, но не единственной, поскольку вызывает лишь 19% от наблюдаемого эффекта. Во-вторых, расчетный эффект от выгорания топлива составляет $-10 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}$ (37%). Оставшиеся $-12 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}$ (44%) могут быть связаны со смещением откатных защит и опорных конструкций подвижных отражателей в сторону от

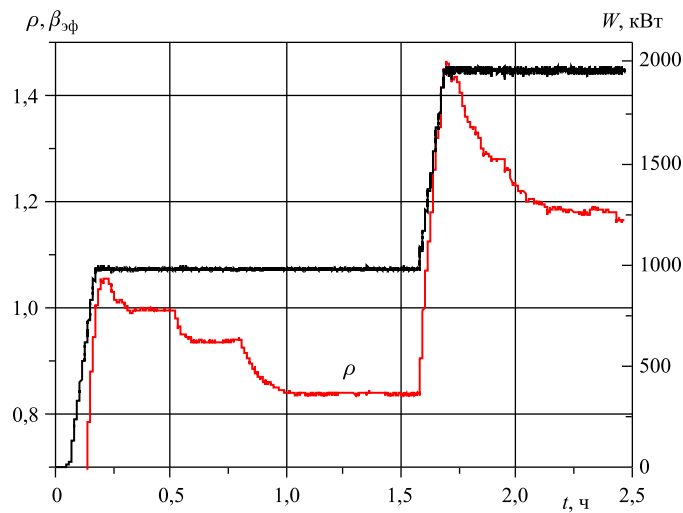


Рис. 7. Изменение реактивности при ступенчатом характере выхода на мощность после ее сброса

Таблица 2. Оценки вклада некоторых процессов в медленное изменение реактивности обратной связи после выхода на мощность 2 МВт. Расход натрия через активную зону равен 80–100 м³/ч

Характер медленного изменения реактивности	Процесс	Эффект реактивности, $10^{-2} \beta_{эф}$	Вклад в полный эффект, %
Спад	Расширение стационарных отражателей с блоками регулирования	–10	–28
	Сдвиг стационарных отражателей в сторону активной зоны	+45	128
Рост	Нагрев и обезвоживание радиационной защиты	–5	19
	Эффект от энерговыработки (выгорание топлива)	–10	37
	Смещение откатных защит и опорных конструкций подвижных отражателей в сторону от активной зоны	–12	44

активной зоны. Точно идентифицировать этот компонент реактивности не удалось. В табл. 2 даны численные оценки вклада того или иного процесса в эффект медленной обратной связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования динамики медленной мощностной обратной связи ИБР-2М показали следующее.

- Медленная мощностная обратная связь реактивности ИБР-2М содержит две компоненты: отрицательную ($-27 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$) и положительную ($+35 \times 10^{-2} \beta_{эф}$) с константами экспоненциального изменения, равными –110 и +1,8 ч соответственно.

- По сравнению с ИБР-2 ввод положительной компоненты обратной связи уменьшился на 40 %, а отрицательной — на 10 %. При этом временные константы изменились незначительно (~ 10 %).

- Основные компоненты медленной связи в реакторе могут быть обусловлены изменениями в различных конструктивных элементах, окружающих активную зону, например в стационарных отражателях, биологической защите и т. д.

- Система автоматического регулирования мощности ИБР-2М при существующих параметрах медленной обратной связи надежно обеспечивает стабилизацию мощности.

Авторы выражают благодарность персоналу установки ИБР-2М за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ли Ен Чжан, Пепельшев Ю. Н., Rogov A. Д.* Изменение эффекта реактивности реактора ИБР-2, связанного с выгоранием топлива, в период 1982–2006 гг. Препринт ОИЯИ Р13-2007-144. Дубна, 2007.
2. *Бондарченко Е. А., Попов А. К., Пепельшев Ю. Н.* Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 928–983.
3. *Ли Ен Чжан, Пепельшев Ю. Н., Чжан Чан Мин.* Случайный характер динамики медленной мощностной обратной связи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-178. Дубна, 2008.
4. *Чжан Чан Мин.* Влияние термомеханических перемещений реакторных конструкций на реактивность ИБР-2М. Сообщение ОИЯИ Р13-2009-166. Дубна, 2009.
5. *Пепельшев Ю. Н., Чжан Чан Мин.* Влияние температуры радиационной защиты на реактивность ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2009-43. Дубна, 2009.
6. *Ананьев В. Д. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщение ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.

Получено 29 января 2013 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 24.04.2013.

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

Усл. печ. л. 0,94. Уч.-изд. л. 1,2. Тираж 245 экз. Заказ № 57972.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/