

P13-2013-4

Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2М.
ПАРАМЕТРЫ БЫСТРОЙ МОЩНОЙ
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.
Энергетический пуск реактора ИБР-2М.
Параметры быстрой мощностной обратной связи

P13-2013-4

Приводятся основные результаты исследования быстрых эффектов реактивности мощностной обратной связи модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Работа выполнена по программе энергетического пуска реактора в 2011 г. при энергоснабжении до 140 МВт·сут.

Показано, что коэффициент реактивности быстрой мощностной обратной связи отрицательный при всех уровнях мощности и расхода натрия через активную зону. При мощности 2 МВт и расходе натрия 80–100 м³/ч мощностной коэффициент реактивности (МКР) равен $-0,043 \pm 0,0066, 10^{-2} \beta_{эф}/кВт$.

При мощности от 500 до 2000 кВт выделены топливные и натриевые компоненты МКР. Показано, что натриевой составляющей МКР при номинальной мощности 2 МВт можно пренебречь. Топливная составляющая МКР постоянна при всех уровнях мощности и равна $-0,047 \pm 0,0066, 10^{-2} \beta_{эф}/кВт$.

Изменение МКР от подогрева натрия в активной зоне имеет пороговый характер. Пороговое значение подогрева, при превышении которого МКР резко уменьшается (в 1,7 раза), составляет 40 °С. МКР достаточен для обеспечения стабильной работы реактора при мощности вплоть до номинальной 2 МВт.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Pepelyshev Yu. N., Rogov A. D.
Power Startup of the IBR-2M Reactor.
Fast Power Reactivity Feedback Parameters

P13-2013-4

The paper presents the study results on the fast power coefficients of feedback reactivity at the modernized IBR-2 (IBR-2M) reactor. The study was conducted based on the 2011 power reactor startup program at up to 140 MW·day power production.

The paper illustrates that the reactivity coefficient of fast power reactivity feedback is negative at all levels of capacity and sodium flow rate throughout the active zone. At 2 MW capacity and sodium flow rate of 80–100 m³/h the power feedback coefficient is $-0.043 \pm 0.0066, 10^{-2} \beta_{eff}/kW$.

At 0.5 to 2 MW capacity the fuel and sodium parts of the power feedback coefficient were separated. It was shown that the sodium part of the power feedback coefficient at nominal capacity of 2 MW is negligible. The fuel part of the power feedback coefficient is constant at all levels of power and equal to $0.047 \pm 0.0066, 10^{-2} \beta_{eff}/kW$.

Changes in power feedback coefficient from sodium heating in the active power zone can be characterized as threshold. Above the threshold temperature level of 40°C, the power feedback coefficient decreases sharply (1.7 times). Power feedback coefficient is sufficient for consistent reactor performance at capacity of up to nominal of 2 MW.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены основные результаты экспериментального исследования мощностного эффекта реактивности, полученные в рамках выполнения программы энергетического пуска реактора ИБР-2 после его модернизации. Некоторые данные по мощностному эффекту реактивности приведены в общей статье по энергетическому пуску реактора [1]. Здесь же результаты исследований представлены более подробно. Мощностной эффект реактивности, или обратная связь реактивности по мощности, есть один из важнейших эффектов, имеющий место при работе реактора при любом уровне мощности. В наибольшей степени этот эффект проявляется при номинальной мощности. Знание параметров мощностного эффекта необходимо для обеспечения условий надежной и безопасной работы реактора, для прогнозирования поведения реактора в различных переходных процессах, а также для оценки динамики развития аварийных ситуаций.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА РЕАКТОРЕ ИБР-2М

Под мощностным эффектом реактивности (МЭР) понимается изменение коэффициента размножения (реактивности) при изменении мощности. Изменение мощности действует на реактивность по различным каналам мощностной обратной связи (МОС), приводящей или к стабилизации мощности, или к ее колебательной неустойчивости. При резком изменении мощности в ИБР-2М происходит следующее:

- 1) быстрый неоднородный подогрев топлива, натрия, находящегося в данный момент в активной зоне, искривление топливных элементов и топливных кассет. Характерные времена — 0,1–3 с;
- 2) смещение разогретого натрия по оси активной зоны. Аксиальное расширение твэлов, разогрев корпуса активной зоны и его смещение относительно стационарных отражателей. Характерные времена — 2–20 с;
- 3) подогрев активной зоны натрием, поступающим после круга циркуляции по первому контуру системы охлаждения в активную зону. Характерные времена — 20–100 с.

Асимптотически выделяются первые два из вышеуказанных эффектов. Численным выражением асимптотического значения МЭР является мощностной коэффициент реактивности (МКР), который определяется как установившееся изменение реактивности после единичного изменения мощности реактора при постоянных значениях температуры и расхода натрия на входе в активную зону, т. е.

$$\frac{dK}{dW} = \left(\frac{dK}{dW} \right) \Big|_{G, T = \text{const.}}$$

Данный коэффициент определяет знак и глубину МОС, что характеризует способность реактора к саморегулированию (самостабилизации).

По времени действия МОС можно разделить на две компоненты — быструю и медленную. Характеристики и физическая природа этих компонент существенно различаются. Под быстрой обратной связью понимается мощностная связь, действующая в течение 20–60 с после возмущения реактивности, под медленной — все остальное. Быстрая МОС обусловлена процессами, происходящими в активной зоне, медленная — тепловыми процессами в системе охлаждения реактора и термомеханическими изменениями в ближайшем окружении активной зоны после возмущения мощности. Диапазон времени 20–60 с связан с ограничением по времени циркуляции натрия в первом контуре системы охлаждения активной зоны.

В работе рассматривается только быстрая компонента МКР как наиболее ответственная за стабильность и динамическую устойчивость реактора. Использовались следующие методы измерения быстрой компоненты МКР:

- по отношению наперед заданного скачка реактивности dK к установившемуся изменению мощности dW ;
- по наблюдению за положением автоматического и промежуточного блоков регулирования при подъемах и снижении мощности реактора с учетом изотермического коэффициента реактивности;
- по отношению расходного коэффициента реактивности dK/dG при постоянной мощности к расходному коэффициенту мощности dW/dG при постоянной температуре натрия на входе в реактор (см. [1]).

Для измерения МКР использовалась система накопления и анализа реакторных параметров, предназначенная для исследования реактора по программе физического и энергетического пусков. Данные о текущих значениях реакторных параметров передавались в измерительную систему из системы управления и защиты реактора, а также из системы контроля технологических параметров. При исследовании МКР регистрировались последовательности значений следующих параметров:

- энергии импульсов мощности;
- амплитуды импульсов мощности с трех независимых детекторов, окружающих активную зону;

- расхода натрия через активную зону;
- температуры натрия на входе и выходе из активной зоны;
- положения всех блоков регулирования.

Частота опроса всех параметров, за исключением энергии импульсов, составляла 10 с^{-1} , для энергии импульсов частота опроса равнялась частоте следования импульсов 5 с^{-1} . Величина МКР определялась в стабильном состоянии реактора, характеризующемся значением средней мощности и расхода натрия через активную зону (W, G). Уровни мощности и расхода натрия при проведении измерений быстрых мощностных эффектов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения средней мощности (W) и расхода натрия через активную зону (G) при измерении МКР

$W, \text{ кВт}$	$G, \text{ м}^3/\text{ч}$				
	40	60	80	—	100
500	40	60	80	—	100
1000	—	60	80	90	100
1300	—	—	—	—	100
1500	—	—	80	—	100
2000	—	—	80	90	100

2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА БЫСТРОЙ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

2.1. Измерение МКР по отношению наперед заданного скачка реактивности dK к установившемуся изменению мощности dW . Изучение быстрого МКР проводили динамическим методом — быстрым возмущением реактивности. Реактор стабилизировали при определенном уровне мощности, отключали систему автоматического регулирования мощности, т. е. во время

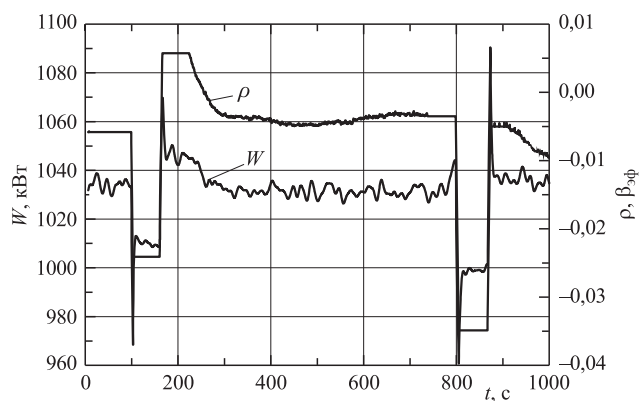


Рис. 1. Изменение мощности (W) при скачках реактивности (ρ) от времени (t) при мощности $\sim 1 \text{ МВт}$ и расходе натрия через активную зону $80 \text{ м}^3/\text{ч}$

Таблица 2. Средние значения установившихся изменений мощности ($\Delta W/\Delta X$, кВт/мм) и МКР ($\Delta K/\Delta W$, $10^{-2} \beta_{эф}/кВт$) при скачках ПР при разных значениях мощности (W) и расхода натрия через активную зону (G)

W , кВт	G , м ³ /ч														
	40			60			80			90			100		
	$\Delta W/\Delta X$	$\Delta K/\Delta W$	$\Delta W/\Delta X$	$\Delta K/\Delta W$	$\Delta W/\Delta X$	$\Delta K/\Delta W$	$\Delta W/\Delta X$	$\Delta K/\Delta W$	$\Delta W/\Delta X$	$\Delta K/\Delta W$	$\Delta W/\Delta X$	$\Delta K/\Delta W$			
500	4,37±0,44	0,1±0,01	5,38±0,54	0,082±0,008	6,0±0,6	0,073±0,007	—	—	—	—	6,43±0,64	0,0684±0,007			
1000	—	—	4,77±0,48	0,092±0,009	6,3±0,6	0,07±0,008	7,13±0,7	0,062±0,006	7,57±0,76	0,058±0,006	—	—			
1300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,62±0,86	0,051±0,005			
1500	—	—	—	—	9,63±0,96	0,046±0,05	—	—	—	—	9,56±0,94	0,046±0,005			
2000	—	—	—	—	9,56±0,96	0,046±0,005	9,75±0,98	0,045±0,005	10,2±1,1	0,043±0,004	—	—			

измерений реактор работал в режиме саморегулирования, и быстро изменяли уровень реактивности с помощью штатного блока управления промежуточного регулятора (ПР). Из возникающего при этом переходного процесса изменения мощности получали быстрый коэффициент реактивности. Скачки реактивности задавались со скоростью $0,44 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/с$ (1 мм/с ПР) на величину до $\pm 3,1 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$ (± 7 мм ПР). В каждом состоянии реактора (W, G), указанном в табл. 1, проводилась серия скачков реактивности минус–плюс. Изменение мощности, обусловленное скачком реактивности, выделялось из общего реакторного шума с помощью оптимального FFT-фильтра. Для примера на рис. 1 приведено изменение мощности в зависимости от времени при скачках реактивности с помощью промежуточного регулятора при средней мощности ~ 1 МВт. При скачках реактивности вниз эффекты МОС в среднем были на 10–15 % меньше, чем при скачках вверх. Этот факт отражает изменение МОС в сторону уменьшения или увеличения температуры активной зоны при изменении мощности. Поэтому в качестве оценки МКР использовалось значение, усредненное по всем симметричным (минус–плюс) скачкам реактивности. Разброс среднего значения МКР с учетом неопределенности, вносимой шумами мощности, оценивался равным $\pm 10\%$. Средние значения МКР представлены в табл. 2. На рис. 2 приведены средние значения быстрого изменения мощности при резком изменении положения промежуточного регулятора, а на рис. 3 — изменение среднего значения МКР в зависимости от расхода натрия через активную зону.

Вся совокупность данных по динамическим измерениям величины $\Delta W/\Delta X$ (см. рис. 2), за исключением данных, полученных в состоянии ре-

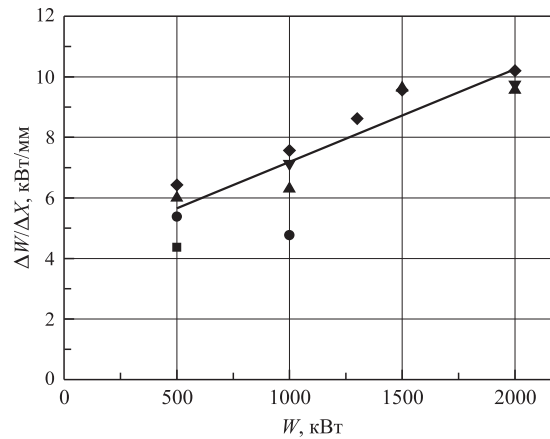


Рис. 2. Средние значения быстрого изменения мощности ($\Delta W/\Delta X$) при резком изменении положения промежуточного регулятора (X) с расходом натрия: ■ — 40, ● — 60, ▲ — 80, ▼ — 90 и ◆ — 100 м³/ч в зависимости от средней мощности реактора (W)

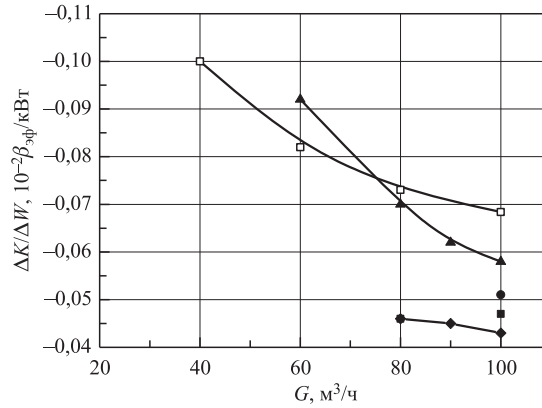


Рис. 3. Средние значения МКР ($\Delta K/\Delta W$) при скачках ПР при мощности: \square — 500, \blacktriangle — 1000, \bullet — 1300, \blacksquare — 1500, \blacklozenge — 2000 кВт в зависимости от расхода натрия через активную зону (G)

актора (W, G) = (1 МВт, 60 м³/ч), может быть описана линейной зависимостью от мощности реактора:

$$\Delta W/\Delta X \text{ [кВт/мм]} = 4,12 + 3,0W \text{ [МВт]}.$$

2.2. Измерение МКР при подъемах и снижении мощности реактора с учетом изотермического коэффициента реактивности. Основная цель измерений — получить зависимость асимптотического значения быстрого МЭР при непрерывном штатном изменении мощности. В данном случае постоянные времена быстрой мощностной связи (< 20 с) значительно меньше скорости штатного изменения мощности (1 МВт/ч), поэтому в процессе подъема/снижения мощности в любой момент времени реализуются квазистационарные условия по быстрому МЭР. На рис. 4 показан ход изменения реактивности МОС в зависимости от уровня средней мощности при штатном подъеме мощности до номинального значения 2 МВт с расходом натрия через активную зону 80, 100 м³/ч и при снижении мощности до нуля с расходом 90 м³/ч.

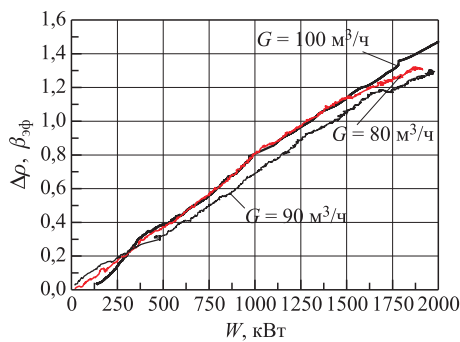


Рис. 4. Ввод реактивности за вычетом температурного эффекта при подъеме мощности до 2000 кВт с расходом натрия через активную зону 80 и 100 м³/ч. При расходе натрия 90 м³/ч — штатное снижение мощности

Таблица 3. Средние значения асимптотического быстрого МКР ($\Delta K/\Delta W$) при подъеме и снижении мощности и значения МКР, средневзвешенные по всему диапазону изменения мощности $(\Delta K/\Delta W)_{\text{ср}}$

ΔW , кВт	G , м ³ /ч	$-\Delta K/\Delta W$, $10^{-2}\beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$	$-(\Delta K/\Delta W)_{\text{ср}}$, $10^{-2}\beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$
140–1000	100	0,064	0,070
1000–1500	100	0,082	
1500–1750	100	0,076	
1750–2000	100	0,061	
530–1970	80	0,067	0,067
1960–13 *	90	0,063	0,063

* Штатное снижение мощности.

В табл. 3 приведены данные по МКР при подъеме и снижении мощности в разных диапазонах ее изменения.

2.3. Оценка МКР по отношению расходного коэффициента реактивности dK/dG при постоянной мощности к расходному коэффициенту мощности dW/dG . МКР ($\Delta K/\Delta W$) может быть получен косвенно как отношение расходного коэффициента реактивности dK/dG при постоянной мощности к расходному коэффициенту мощности dW/dG при постоянной

Таблица 4. Оценка МКР ($\Delta K/\Delta W$) по отношению расходных коэффициентов реактивности при разных значениях средней мощности реактора (W) и расхода натрия через активную зону (G)

W , кВт	$\Delta K/\Delta W$, $10^{-2}\beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$				
	G , м ³ /ч				
	40	60	80	90	100
500	0,10±0,01 (0,1)	0,13±0,01 (0,82)	0,12±0,01 (0,073)	—	0,13 (0,068)
1000	—	0,10±0,01 (0,092)	0,077±0,008 (0,08)	(0,062)	0,06±0,006 (0,058)
1500	—	—	0,056±0,006 (0,046)	—	0,068±0,007 (0,046)
2000	—	—	0,048±0,005 (0,046)	0,050±0,005 (0,045)	0,050±0,005 (0,043)

Примечание: В скобках представлены данные прямых измерений МКР из табл. 2.

температуре теплоносителя на входе в активную зону. Все указанные выше расходные эффекты измерены и представлены в работе [1]. На основе этих данных в табл. 4 дана оценка МКР при разных значениях расхода натрия через активную зону и средней мощности. Из сравнения данных МКР, полученных в прямых измерениях по скачкам ПР (см. табл. 2), с данными табл. 4 видно, что имеются различия, особенно при малой мощности. Наблюдаемые различия выше погрешности измерения расхода и мощности.

3. ЗАВИСИМОСТЬ МКР ОТ РАСХОДА НАТРИЯ ЧЕРЕЗ АКТИВНУЮ ЗОНУ. НАТРИЕВАЯ И ТОПЛИВНАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ МКР

Поскольку мощность и расход натрия связаны с подогревом ΔT теплоносителя в активной зоне соотношением $W = \rho c_p G \Delta T$, где ρ и c_p — плотность и удельная теплоемкость натрия соответственно, МКР определяется из уравнения

$$\left(\frac{dK}{dW}\right)_G = \left(\frac{dK}{dW}\right)_{G,T} + \frac{1}{\rho c_p G} \left(\frac{dK}{dT}\right)_{G,W} = a + \frac{b}{G},$$

где $\frac{b}{G}$ — натриевая составляющая МКР, обусловленная влиянием на реактивность подогрева натрия в активной зоне при неизменной температуре на входе в реактор; a — топливная составляющая МКР (значения МКР при бесконечном расходе), обусловленная влиянием температуры (и градиентов температур) твэлов на реактивность.

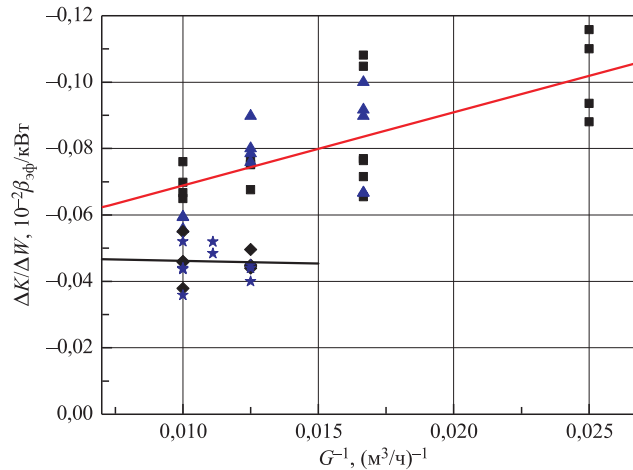


Рис. 5. Значения МКР ($\Delta K/\Delta W$) при скачках реактивности при мощности 500 (■), 1000 (▲), 1500 (◆) и 2000 кВт (★) в зависимости от обратного расхода натрия через активную зону (G^{-1})

Анализ всего массива данных по МКР в области (W, G) , указанной в табл. 1, показал, что можно выделить две характерные зависимости МКР от расхода. Это, во-первых, область средней мощности 500 и 1000 кВт и вторая область — 1500 и 2000 кВт. Внутри этих областей явных различий общей зависимости МКР от расхода натрия не наблюдается. На рис. 5 приведена совокупность экспериментальных значений МКР от обратного расхода натрия через активную зону для указанных выше мощностей.

Параметры линейной аппроксимации по данным, представленным на рис. 4, следующие:

$W = 500, 1000$ кВт	топливная составляющая: $a = -0,047 \pm 0,0066, 10^{-2} \beta_{эф}/\text{кВт};$ натриевая составляющая: $\frac{b}{G} = -(2,2 \pm 0,40)/G, 10^{-2} \beta_{эф}/\text{кВт}/(\text{м}^3/\text{ч});$
$W = 1500, 2000$ кВт	топливная составляющая: $a = -0,047 \pm 0,017, 10^{-2} \beta_{эф}/\text{кВт};$ натриевая составляющая: $\frac{b}{G} = (0,16 \pm 1,49)/G, 10^{-2} \beta_{эф}/\text{кВт}/(\text{м}^3/\text{ч}).$

На рис. 6 приведена зависимость МКР от мощности при расходе натрия через активную зону 80 и 100 м³/ч. Из рисунка видно, что натриевая компонента МКР при расходе 80 и 100 м³/ч уменьшается с ростом мощности

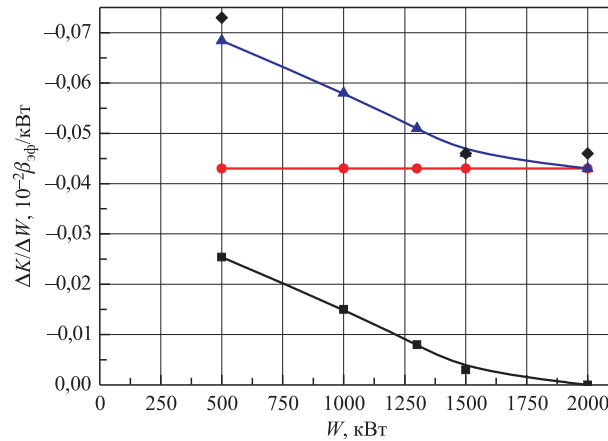


Рис. 6. Зависимость МКР ($\Delta K/\Delta W$) от мощности при расходе натрия через активную зону 100 м³/ч: ▲ — полное значение; ● — топливная и ■ — натриевая составляющие МКР; ◆ — полное значение МКР при расходе 80 м³/ч

линейно и при мощности 2 МВт близка к нулю. Таким образом, при расходе 80–100 м³/ч при номинальной мощности 2 МВт быстрая мощностная связь практически полностью определяется обратной связью по топливу.

4. ЛИНЕЙНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ МКР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА И РАСХОДА НАТРИЯ ЧЕРЕЗ АКТИВНУЮ ЗОНУ

Суть в том, что быстрый МЭР зависит в том числе и от геометрии активной зоны, которая включает в себя различного рода зазоры, меняющиеся при расширении и изгибах твэлов и топливных кассет. Общая картина поведения топливных элементов при высоком уровне мощности получается чрезвычайно сложной. Изменение мощности приводит к изменению градиентов температур внутри активной зоны и, соответственно, к изменению изгибных деформаций твэлов. На эти изменения накладывается дрожание кассет в турбулентном потоке натрия, а также термомеханические ударные деформации кассет под действием импульсов мощности. Для расчетной оценки динамического состояния активной зоны необходим многопараметрический подход, который в отсутствие экспериментальной информации об изменениях, происходящих внутри активной зоны, применить невозможно. В этой ситуации можно только предположить, что при некоторых условиях зазоры исчезают, тогда может возникнуть «пороговое» изменение реактивности обратной связи.

Рассмотрим это обстоятельство подробнее. Линейность изменения МКР в зависимости от мощности и расхода натрия через активную зону можно оценить экспериментально, если в качестве аргумента использовать обобщенный параметр W/G , т. е. число пропорциональное подогреву натрия в активной зоне: $\Delta T \sim W/G$. Экспериментальная зависимость подогрева натрия от W/G для ИБР-2М имеет вид

$$\Delta T [^{\circ}\text{C}] = (0,252 \pm 0,328) + (3,15 \pm 0,023)W/G,$$

где $[W/G] = \text{кВт}/(\text{м}^3/\text{ч})$. Приблизительно при мощности выше 100 кВт можно записать

$$\Delta T [^{\circ}\text{C}] \approx (3,15 \pm 0,023)W/G [\text{кВт}/(\text{м}^3/\text{ч})].$$

На рис. 7 приведены значения МКР (данные взяты из табл. 2) в зависимости от подогрева натрия. Из рис. 7 видно, что при $\Delta T > 40$ °С величина МКР довольно резко уменьшается. Если в данном анализе пренебречь тонкой пороговой структурой МКР при подогревах менее 40 °С, что отчетливо наблюдается на рис. 7, и учесть только один основной усредненный порог, то в качестве пороговой зависимости, аппроксимирующей экспериментальные данные, можно использовать функцию типа

$$y = \frac{a}{1 + b \exp(X - X_{\text{пор}})} + c, \quad (1)$$

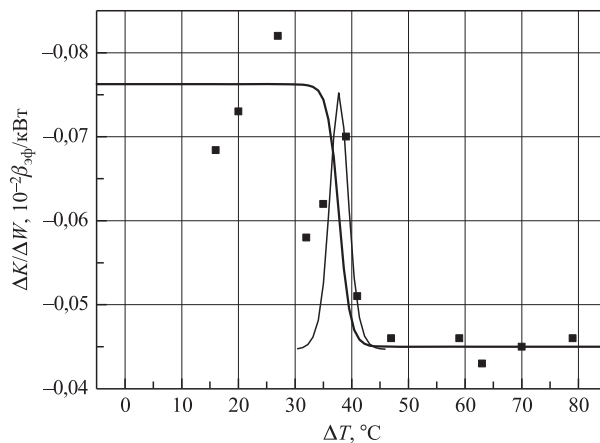


Рис. 7. Зависимость МКР ($\Delta K/\Delta W$) от подогрева натрия в активной зоне (ΔT). Сплошные линии — пороговая аппроксимирующая функция и ее производная, квадраты — экспериментальные точки

где $a = 0,035$; $b = 1,25$; $c = 0,045$; $X_{\text{пор}} = 38$. Как видно из рис. 7, функция (1) разделяет две области МКР со средними значениями $\text{МКР}_1 = a + c = -0,076 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$ и $\text{МКР}_2 = -0,045 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$. Пороговое значение подогрева $\Delta T = X_{\text{пор}} = 38$ °C. Производная от (1) дает исходную функцию плотности распределения изменения МКР по подогреву в активной зоне. Эта функция имеет вид Гаусса с полушириной 6,5 °C, определяющей пороговую область МКР: 30 °C $< \Delta T < 46$ °C. Таким образом, при подогреве выше 45 °C происходит резкое, в 1,7 раза, ослабление МОС. Здесь нужно отметить, что даже при таком уменьшении МКР мощностная связь остается отрицательной и по абсолютной величине достаточной для надежной и безопасной работы реактора.

ВЫВОДЫ

В процессе выполнения программы энергетического пуска ИБР-2М получены данные о быстрой МОС реактора. Основные результаты исследований заключаются в следующем:

- коэффициент реактивности быстрой МОС отрицательный при всех уровнях мощности и расхода натрия через активную зону и по абсолютной величине достаточен для обеспечения стабильной работы реактора вплоть до номинальной мощности 2 МВт. При 2 МВт и расходе натрия 80–100 м³/ч МКР равен $-0,043 \pm 0,0066, 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$;

- абсолютное значение МКР уменьшается как с расходом натрия через активную зону, так и с ростом средней мощности реактора;

- при мощности 500, 1000 кВт и 1500, 2000 кВт выделены топливные и натриевые компоненты МКР. Показано, что натриевая составляющая МКР уменьшается с ростом мощности практически линейно и при 2 МВт ею можно пренебречь. Топливная составляющая МКР постоянна при всех уровнях мощности и равна $-0,047 \pm 0,0066, 10^{-2} \beta_{эф}/кВт$;

- изменение МКР от подогрева натрия в активной зоне имеет пороговый характер. Пороговое значение подогрева, при превышении которого МКР резко уменьшается в 1,7 раза, составляет 40 °С. Переходная область подогрева натрия при пороговом изменении МКР равна 30–46 °С.

Результаты исследований, полученные в процессе энергетического пуска, предполагают проведение дальнейших исследований параметров быстрой МОС, их изменение в процессе выгорания топлива и влияние на динамические свойства реактора и его устойчивость.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В.Д. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщение ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.

Получено 23 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. 1,13. Тираж 245 экз. Заказ № 57970.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/