

P13-2013-6

Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2М.  
ПАРАМЕТРЫ РАСХОДНОГО ЭФФЕКТА  
РЕАКТИВНОСТИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.

P13-2013-6

Энергетический пуск реактора ИБР-2М.

Параметры расходного эффекта реактивности обратной связи

Приводятся результаты исследования расходных эффектов реактивности реактора ИБР-2М, выполненного по программе энергетического пуска реактора в 2011 г., при мощности вплоть до номинальной 2 МВт. Все быстрые и асимптотические расходные эффекты отрицательны при всех уровнях мощности и расхода натрия через активную зону. Указанные параметры реактора позволяют обеспечить его безопасную и эффективную работу при мощности до 2 МВт и частоте повторения импульсов  $5 \text{ с}^{-1}$ .

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Pepelyshev Yu. N., Rogov A. D.

P13-2013-6

Power Startup of the IBR-2M Reactor.

Sodium Flow Rate Reactivity Feedback Parameters

The paper presents the study results on the sodium flow rate of feedback reactivity of the IBR-2M reactor. The study was conducted based on the 2011 energetic reactor startup program at up to nominal of 2 MW. All fast and asymptotic feedback effects are negative at all power levels and flow rates of sodium through the active zone. The specified parameters of the reactor allow its safe and effective functioning at a power up to 2 MW with a frequency of repetition of impulses  $5 \text{ s}^{-1}$ .

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

Охлаждение активной зоны реактора ИБР-2М осуществляется с помощью жидкого натрия, циркулирующего в двух независимых петлях первого и второго контуров системы охлаждения реактора. В процессе нормальной работы реактора расход натрия через активную зону меняется. Это, например, флуктуации расхода, обусловленные работой электромагнитных насосов, изменение расхода за счет изменения плотности натрия при изменении его температуры, принудительное изменение расхода при изменении режима эксплуатации реактора или при исследовании реактора, сбросы расхода при аварийном расхолаживании при сбросе мощности и т. д. При этом любое изменение расхода ( $\Delta G$ ) вызывает соответствующее изменение в состоянии активной зоны (коэффициента размножения  $\Delta K$ ) и, соответственно, мощности. Знание параметров расходного эффекта ( $\Delta K/\Delta G$ ), так же как и эффекта, связанного с изменением мощности реактора, необходимо для обеспечения условий надежной и безопасной работы реактора, для прогнозирования поведения реактора в различных переходных процессах и аварийных ситуациях, а также для прогнозирования изменения расходного эффекта в процессе выгорания топлива. В работе представлены основные результаты исследований расходного эффекта, полученные в рамках выполнения программы энергетического пуска реактора ИБР-2 после его модернизации в 2011 г.

### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСХОДНОГО ЭФФЕКТА РЕАКТИВНОСТИ

Под расходным эффектом реактивности (РЭР) понимается изменение реактивности при изменении расхода натрия через активную зону. При резком уменьшении расхода натрия в активной зоне ИБР-2М происходит следующее:

1) быстрый, во время изменения расхода, гидродинамический толчок на топливные кассеты. В данной ситуации при уменьшении расхода это «схлопывание» топливных кассет к центру активной зоны. Характерные времена — 1–6 с;

2) далее, аналогично резкому росту мощности, происходит быстрый неоднородный подогрев топлива и натрия, находящегося в активной зоне, искривление твэлов и топливных кассет, смещение разогретого натрия по оси

активной зоны, разогрев корпуса активной зоны и его смещение относительно стационарных отражателей. Характерные времена — 20–60 с;

3) далее происходит подогрев активной зоны натрием, поступающим после круга циркуляции по первому контуру системы охлаждения в активную зону. После чего температурные изменения в активной зоне и в системе ее охлаждения начинают стабилизироваться. Характерные времена — 300 с и более.

Для безопасности реактора важно знать наиболее быстрые первые два эффекта. Первый эффект имеет чисто гидродинамическую природу и проявляется при любой мощности — от нулевой до номинальной 2 МВт. Асимптотически выделяются последующие два из вышеуказанных эффектов. Численным выражением каждой из трех компонент расходного эффекта является расходный коэффициент реактивности, определяемый как значение РЭР при скачкообразном изменении расхода при постоянной мощности реактора и температуре натрия на входе в активную зону, отнесенное к изменению расхода, т. е.

$$\frac{dK}{dG} = \left( \frac{dK}{dG} \right) |_{W, T = \text{const}},$$

и расходный коэффициент мощности

$$\frac{dW}{dG} = \left( \frac{dW}{dG} \right) |_{T = \text{const}},$$

определяемый как изменение мощности реактора при скачкообразном изменении расхода при постоянной температуре натрия на входе в активную зону, отнесенное к изменению расхода. Указанные выше коэффициенты определяют знак и глубину расходной обратной связи и характеризуют способность реактора к саморегулированию.

РЭР определяется в двух режимах работы реактора, с включенной системой автоматического регулирования (АР+) и выключенной (АР-):

- в случае (АР+) коэффициент  $dK/dG$  измеряется непосредственно. Расход натрия изменяется небольшими скачками (не выше 5 м<sup>3</sup>/ч через активную зону) в диапазоне 40–100 м<sup>3</sup>/ч при постоянном уровне мощности 500, 100, 1500, 2000 кВт;

- в случае (АР-) непосредственно измеряется расходный коэффициент мощности  $dW/dG$ , т. е. изменение мощности при быстром изменении расхода при постоянной температуре натрия на входе в активную зону.

При резком изменении расхода в соответствии с вышеуказанными процессами, происходящими в активной зоне, экспериментально можно выделить три следующих компонента расходного эффекта:

- гидродинамический РЭР и соответствующий ему быстрый расходный коэффициент реактивности РКР<sub>б</sub>. Этот эффект действует только во время изменения расхода;

- собственно РЭР и коэффициент реактивности. Проявляется в течение 30–60 с после изменения расхода в диапазоне времени, меньшем времени циркуляции натрия по первому контуру;

- асимптотический РЭР и соответствующий ему асимптотический коэффициент  $R_{KR_{ac}}$ . Устанавливается в течение 15 мин после изменения расхода.

Для измерения расходного эффекта использовалась система накопления данных реакторных параметров. 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 в активную зону;
- положения блоков регулирования.

Частота опроса всех параметров, за исключением энергии импульсов, составляла  $10 \text{ с}^{-1}$ , для энергии импульсов частота опроса равнялась частоте следования импульсов  $5 \text{ с}^{-1}$ . Исходное состояние реактора перед измерением стабилизировалось по параметрам средней мощности, расхода натрия через активную зону ( $W, G$ ) и температуры натрия на входе в активную зону. Уровни мощности и расхода натрия при проведении измерений приведены в табл. 1. Результаты измерения обрабатывались с получением детального хода мощности и реактивности, обусловленных изменением расхода. (В дальнейшем для простоты изложения под термином «расход натрия через активную зону» в тексте используется сокращение «расход» или «расход натрия».)

**Таблица 1. Значения уровней мощности ( $W$ ) и расхода натрия через активную зону ( $G$ ) при измерении РЭР**

$W$ , кВт	$G$ , м <sup>3</sup> /ч				
500	40	60	80	—	100
1000	—	60	80	90	100
1500	—	—	80	—	100
2000	—	—	80	90	100

Скачки расхода задавались от 3 до 7 м<sup>3</sup>/ч. В каждом состоянии реактора ( $W, G$ ), указанном в табл. 1, проводилась серия скачков расхода вверх-вниз. В качестве оценки расходного эффекта использовалось значение, усредненное по нескольким симметричным (вверх-вниз) скачкам расхода. Изменение мощности, обусловленное скачком расхода, выделялось из общего реакторного шума с помощью оптимального FFT-фильтра. Для примера на рис. 1 приведено изменение реактивности при скачках расхода с включенной систе-

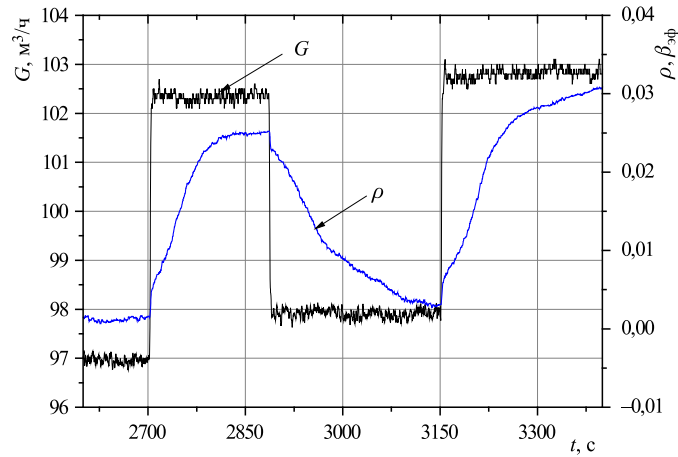


Рис. 1. Изменение реактивности ( $\rho$ ) в зависимости от времени ( $t$ ) при скачках расхода ( $G$ ) при мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону  $\sim 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Автоматический регулятор включен

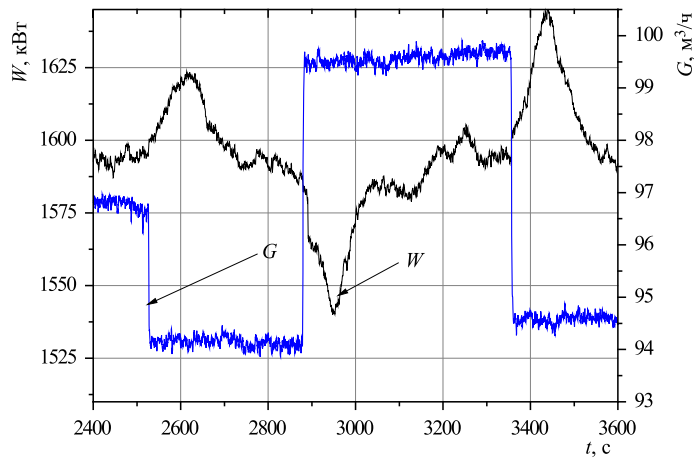


Рис. 2. Изменение мощности ( $W$ ) в зависимости от времени ( $t$ ) при скачках расхода ( $G$ ) при мощности 1,5–1,6 МВт и расходе натрия через активную зону  $\sim 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Автоматический регулятор выключен

мой (АР+), а на рис.2 — изменение мощности при выключенной системе (АР–).

Ниже приведены основные результаты измерений гидродинамического, быстрого и асимптотического РЭР.

## 2. БЫСТРЫЙ РАСХОДНЫЙ (ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ) ЭФФЕКТ РЕАКТИВНОСТИ

Быстрый РЭР и соответствующий ему быстрый коэффициент реактивности ( $\text{РКР}_6$ ) — гидродинамический эффект (ГЭР), измеряемый обычно при «нулевой» мощности (Ватт) в стационарном (не импульсном) режиме работы реактора. При высоком уровне мощности ГЭР на реакторе ИБР-2 ранее не измерялся. Эксперименты по исследованию ГЭР реактора «нулевой» мощ-

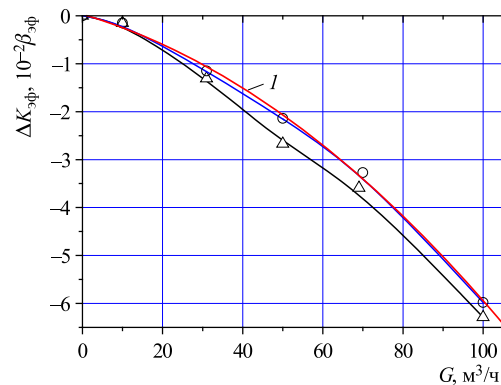


Рис. 3. Изменение ГЭР в зависимости от расхода натрия через активную зону в критическом состоянии в стационарном режиме работы реактора:  $\Delta$  — повышение,  $\circ$  — понижение расхода,  $l$  — кривая параболической аппроксимации результатов

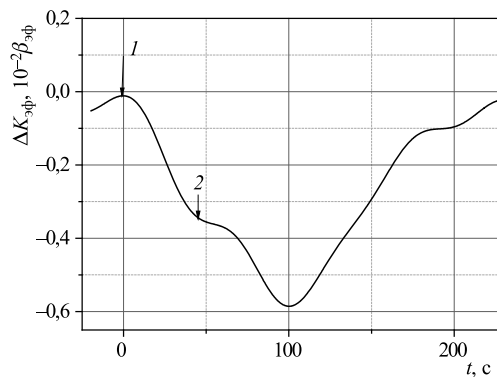


Рис. 4. Изменение реактивности при быстром увеличении расхода натрия через активную зону с  $40$  до  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  в стационарном критическом состоянии реактора «нулевой» мощности:  $l$  — начало изменения расхода,  $2$  — перегиб реактивности при изменении температуры активной зоны

ности проводились в подкритическом и критическом состояниях реактора ИБР-2М в стационарном режиме его работы. Измерения проводились с помощью реактиметра CVR-10. В качестве детектора использовалась борная камера, установленная вблизи активной зоны. Расход натрия менялся в пределах от 14 до номинального уровня  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  через  $7\text{--}10 \text{ м}^3/\text{ч}$ . На рис. 3 показана зависимость ГЭР от расхода натрия, измеренная при повышении и понижении расхода. Там же приведена кривая параболической аппроксимации результатов 1. Некоторое представление о динамике изменения реактивности при быстром и небольшом (на  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) увеличении расхода на реакторе «нулевой» мощности в стационарном режиме дает рис. 4. Расход от момента времени  $t$  меняется за время  $\sim 1 \text{ с}$ , далее в диапазоне времени между 1 и 2 действует чисто расходный эффект, при этом активная зона и корпус реактора охлаждаются, и после точки перегиба 2 в реактивности начинают доминировать только температурные эффекты. При высокой мощности эти процессы развиваются более сложным образом (см. разд. 3).

Как видно из рис. 3 и 4, ГЭР отрицателен (при повышении расхода реактивность уменьшается) и в зависимости от расхода приблизительно описывается параболой

$$\Delta K_{\text{ГЭР}} = \gamma G^2,$$

где  $\gamma = -(6,24 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$ ,  $10^{-2} \beta_{\text{эф}} / (\text{м}^3/\text{ч})^2$ ,  $G$  (в  $\text{м}^3/\text{ч}$ ). Полное значение ГЭР при изменении расхода, имеющем ступенчатый вид, от режима холостого хода до номинального равно

$$\Delta K_{\text{ГЭР}} = -(6,24 \pm 0,20) \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}.$$

Гидродинамический коэффициент реактивности

$$\frac{dK}{dG} = -1,2 \cdot 10^{-3} G, 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / (\text{м}^3/\text{ч}), G \text{ (в } \text{м}^3/\text{ч}),$$

при номинальном значении расхода равен  $\frac{dK}{dG} = -0,12 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / (\text{м}^3/\text{ч})$ . Из-за отсутствия гистерезиса гидродинамический коэффициент с ростом или уменьшением расхода ведет себя единым образом. Параболический или близкий к этому характер изменения ГЭР позволяет сделать вывод о том, что природа данного эффекта есть смещение тепловыделяющих сборок (ТВС) при их «расталкивании» турбулентным потоком натрия (ТВС внизу закреплены цанговыми захватами, вверху могут свободно перемещаться в потоке натрия в пределах межкассетных зазоров).

Гидродинамический коэффициент реактивности  $dK/dG = \text{РКР}_6$ , измеренный в импульсном режиме при высоком уровне мощности — от 500 кВт до 2 МВт, так же как и при «нулевой» мощности, зависит от расхода натрия через активную зону линейно (см. рис. 5):



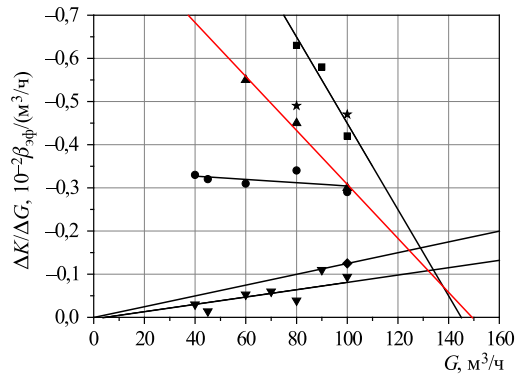


Рис. 5. Расходный коэффициент реактивности ( $\Delta K/\Delta G$ ) в зависимости от расхода натрия через активную зону ( $G$ ) при некоторых уровнях мощности ( $W$ ): ● — 500, ▲ — 1000, ★ — 1500 и ■ — 2000 кВт. Внизу: гидродинамический расходный коэффициент при «нулевой» (◆) и при мощности от 500 до 2000 кВт (▼)

$$dK/dG = \text{РКР}_6 \approx -(8,5 \pm 2,4)G, 10^{-4}(\beta_{\text{эф}}/\text{м}^3/\text{ч}) \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Как видно из представленных результатов, гидродинамический коэффициент  $\text{РКР}_6$  при больших уровнях мощности, в среднем почти на 40 % меньше соответствующего коэффициента для реактора «нулевой» мощности. Вероятнее всего, как уже было отмечено в [1], уменьшение  $\text{РКР}_6$  с ростом мощности связано с тем, что топливные стержни из-за градиента температур по радиусу активной зоны уже имеют предварительный изгиб и, соответственно, большую жесткость. Поэтому расталкивающее действие расхода теплоносителя на топливные кассеты при большой мощности проявляется в меньшей степени, чем при малой.

Отметим также, что при больших изменениях расхода, например, при аварийном отключении циркуляционных насосов 1-го контура охлаждения активной зоны реактора, полный гидродинамический эффект при «нулевой» мощности составляет  $+4,1 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}$  [2], что на ~50 % меньше полного эффекта при изменении расхода, имеющем ступенчатый вид.

### 3. РАСХОДНЫЙ ЭФФЕКТ РЕАКТИВНОСТИ

В данном разделе рассматривается основная компонента быстрого расходного эффекта, которая для простоты изложения представлена как «расходный эффект». Данные по расходному коэффициенту реактивности ( $\Delta K/\Delta G$ ) и расходному коэффициенту мощности ( $\Delta W/\Delta G$ ) приведены в табл. 2 и 3

соответственно. Для иллюстрации на рис. 5, 6 представлены зависимости изменения расходного коэффициента реактивности от расхода натрия и мощности реактора соответственно, а на рис. 7, 8 — расходного коэффициента мощности от мощности и расхода.

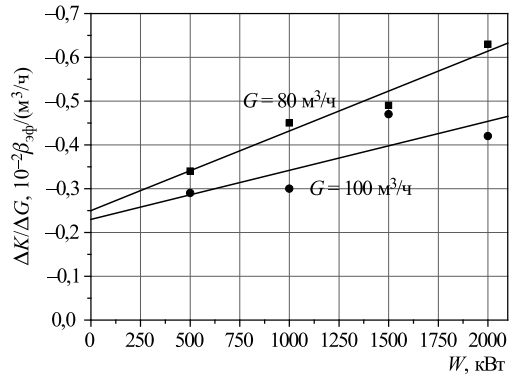


Рис. 6. Расходный коэффициент реактивности ( $\Delta K/\Delta G$ ) в зависимости от мощности реактора ( $W$ ) при расходе натрия через активную зону ( $G$ ): ■ — 80 и ● — 100 м<sup>3</sup>/ч

Таблица 2. Расходный коэффициент реактивности ( $\Delta K/\Delta G$ ) при разных уровнях средней мощности ( $W$ ) и расхода натрия ( $G$ ) через активную зону реактора

$-\Delta K/\Delta G, 10^{-2} \beta_{эф}/(\text{м}^3/\text{ч})$						
$W, \text{кВт}$	$G, \text{м}^3/\text{ч}$					
	40	45	60	80	90	100
500	0,33±0,03	0,32±0,03	0,31±0,03	0,34±0,04	—	0,29±0,03
1000	—	—	0,55±0,06	0,45±0,05	—	0,30±0,03
1500	—	—	—	0,49±0,05	—	0,47±0,05
2000	—	—	—	0,63±0,06	0,52±0,06	0,42±0,04

Таблица 3. Расходный коэффициент мощности ( $\Delta W/\Delta G$ ) при разных уровнях средней мощности реактора ( $W$ ) и расхода натрия ( $G$ ) через активную зону

$-\Delta W/\Delta G, \text{кВт}/(\text{м}^3/\text{ч})$					
$W, \text{кВт}$	$G, \text{м}^3/\text{ч}$				
	40	60	80	90	100
500	3,1±0,3	2,3±0,2	2,7±0,3	—	2,2±0,2
1000	—	5,5±0,5	6,2±0,6	—	5,0±0,5
1500	—	—	8,6±0,9	—	6,9±0,7
2000	—	—	13,0±1,3	10,2±1	8,3±0,8

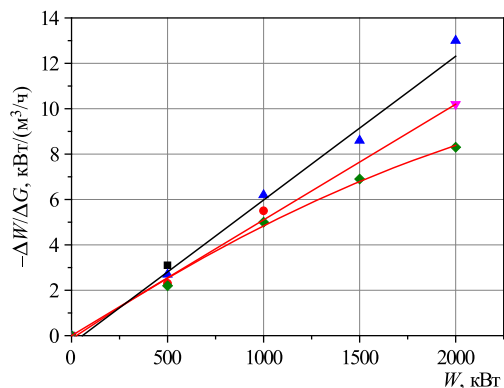


Рис. 7. Расходный коэффициент мощности ( $-\Delta W/\Delta G$ ) в зависимости от мощности реактора ( $W$ ) при некоторых значениях расхода натрия через активную зону: ■ — 40, ● — 60, ▲ — 80, ▼ — 90 и ◆ — 100 м<sup>3</sup>/ч

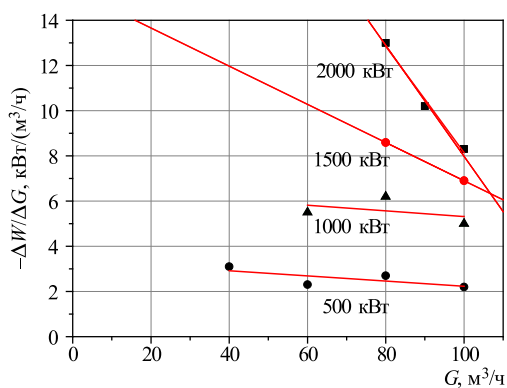


Рис. 8. Расходный коэффициент мощности ( $-\Delta W/\Delta G$ ) в зависимости от расхода натрия через активную зону ( $G$ ) при некоторых уровнях мощности ( $W$ )

Из рис. 7, 8 можно видеть, что расходный коэффициент мощности с ростом расхода уменьшается (по абсолютной величине) и растет с увеличением мощности по зависимости, близкой к линейной. При расходе выше 90 м<sup>3</sup>/ч увеличение расходного коэффициента мощности от мощности реактора начинает асимптотически уменьшаться.

Для последующего анализа зависимости расходных коэффициентов от состояния реактора, описываемого в терминах мощность–расход, т. е. теплового и гидродинамического, отметим следующий факт. Все процессы, про-

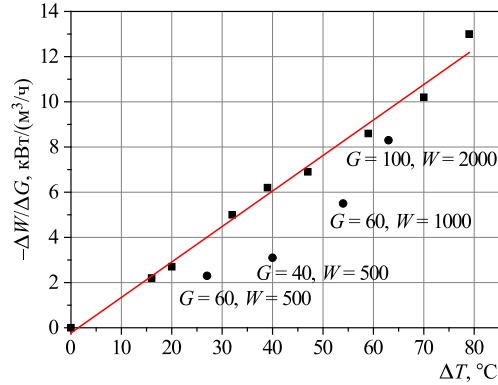


Рис. 9. Расходный коэффициент мощности ( $-\Delta W/\Delta G$ ) в зависимости от подогрева натрия в активной зоне ( $\Delta T$ ) при расходе натрия от 40 до 100 м<sup>3</sup>/ч. ■ — линейная аппроксимация при расходе натрия 80–100 м<sup>3</sup>/ч; ● — вне области аппроксимации

исходящие в реакторе при изменении мощности или расхода натрия, идут с изменением подогрева натрия в активной зоне ( $\Delta T \sim W/G$ ). Зависимость расходного коэффициента мощности от подогрева натрия приведена на рис. 9. Она имеет сложный вид, но основная масса экспериментальных данных, за некоторым исключением при малых расходах, линейно связана с подогревом. Отсюда можно предположить, что в первом приближении расходные (а также и мощностные) коэффициенты реактивности могут быть описаны в терминах  $W/G$ .

Если учитывать вышесказанное, установившийся коэффициент размножения как функция внутреннего теплового и гидродинамического состояния реактора может быть представлен в терминах двух независимых переменных: мощности реактора и расхода теплоносителя. Изменение коэффициента размножения за счет изменения мощности и расхода есть полный дифференциал

$$dK = \left( \frac{dK}{dW} \right)_G dW + \left( \frac{dK}{dG} \right)_W dG. \quad (1)$$

Поскольку мощность и расход связаны с подогревом  $\Delta T$  теплоносителя в активной зоне соотношением  $W = \rho c_p G \Delta T$ , где  $\rho$  и  $c_p$  — соответственно плотность и удельная теплоемкость натрия, мощностной коэффициент реактивности определится из уравнения

$$\left( \frac{dK}{dW} \right)_G = \left( \frac{dK}{dW} \right)_{G,T} + \frac{1}{\rho c_p G} \left( \frac{dK}{dT} \right)_{G,W} = a + \frac{b}{G}, \quad (2)$$

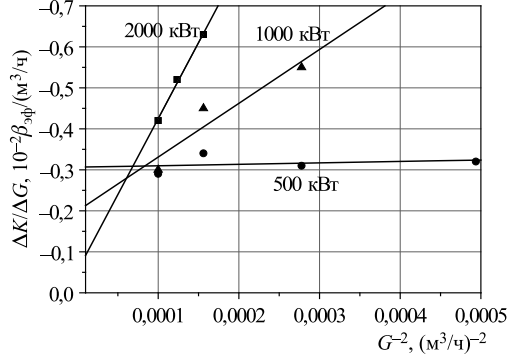


Рис. 10. Расходный коэффициент реактивности ( $\Delta K/\Delta G$ ) в зависимости от обратного квадрата расхода натрия через активную зону ( $G^{-2}$ ) при некоторых уровнях мощности ( $W$ ). Приведены результаты линейной аппроксимации данных

а расходный коэффициент можно представить в виде

$$\left(\frac{dK}{dG}\right)_W = \left(\frac{dK}{dG}\right)_{W,T} - \frac{W}{\rho c_p G^2} \left(\frac{dK}{dT}\right)_{W,G} = c - b \frac{W}{G^2}. \quad (3)$$

Для определения параметров  $a$ ,  $b$  и  $c$  добавим уравнение (1) при  $dK = 0$ :

$$\left(a + \frac{b}{G}\right) \frac{dW}{dG} + c - b \frac{W}{G^2} = 0,$$

откуда

$$\frac{dW}{dG} = -\frac{c - bW/G^2}{a + b/G}. \quad (4)$$

На рис. 10 приведены экспериментальные данные по расходному коэффициенту реактивности ( $\Delta K/\Delta G$ ) при некоторых уровнях мощности в зависимости от обратного квадрата расхода натрия через активную зону. Мощность в данном случае используется как параметр. На рис. 11 представлены данные по расходному коэффициенту реактивности в зависимости от обобщенного параметра ( $W/G^2$ ). В пределах разброса данных и погрешностей измерений линейная аппроксимация  $\left(\frac{dK}{dG}\right)_W = c - b \frac{W}{G^2}$ , где  $c = -0,228 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/(\text{m}^3/\text{ч})$ ,  $b = 1,187 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/(\text{m}^3/\text{ч})/(\text{kВт}/(\text{m}^3/\text{ч}))^2$ , достаточно хорошо описывает все экспериментальные результаты за исключением точки ( $W, G$ ) = (500 кВт, 40 м<sup>3</sup>/ч). Здесь нужно отметить, что область малых расходов  $G < 60$  м<sup>3</sup>/ч для ИБР-2М не является рабочей, т. е. исключена для эксплуатации.

Анализ данных по изменению расходного коэффициента реактивности в зависимости от состояния реактора в терминах ( $W, G$ ) позволяет сделать

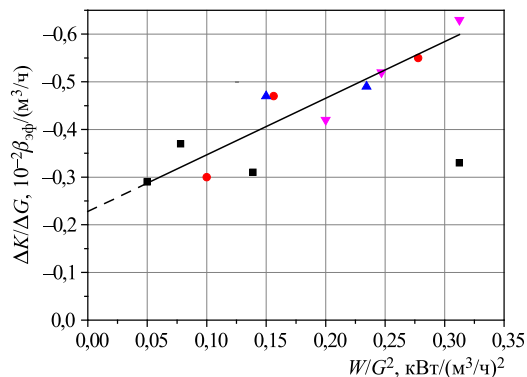


Рис. 11. Расходный коэффициент реактивности ( $\Delta K/\Delta G$ ) в зависимости от мощности реактора и квадрата обратного расхода натрия через активную зону ( $W/G^2$ ): ■ — 500, ● — 1000, ▲ — 1500, ▼ — 2000 кВт

некоторые выводы. Во-первых, экстраполированные в ноль значения расходного коэффициента реактивности при мощности выше 1000 кВт реализуются при расходе 145–150 м³/ч (см. рис. 6). Это означает, что существует некоторое критическое значение расхода, в данном случае  $\sim 145$  м³/ч, выше которого отрицательная обратная связь по расходу осуществляется только за счет гидродинамической расходной компоненты, равной  $-0,12 \cdot 10^{-2} \beta_{эф} / (м³/ч)$ . Во-вторых, расходный коэффициент реактивности при  $(W/G^2) \rightarrow 0$  стремится к  $-0,228 \cdot 10^{-2} \beta_{эф} / (м³/ч)$  (см. рис. 11), а при расходе 115 м³/ч в диапазоне мощности от 500 до 2000 кВт не зависит от нее и равен приблизительно  $-0,3 \cdot 10^{-2} \beta_{эф} / (м³/ч)$  (см. рис. 10).

#### 4. АСИМПТОТИЧЕСКИЙ РАСХОДНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ

Асимптотический расходный коэффициент реактивности  $(\Delta K/\Delta G)_{ас}$  определяется как установившееся изменение реактивности при переходе реактора с одного установившегося уровня расхода теплоносителя на другой установившийся уровень. Этот коэффициент измерялся при переходе реактора на другой уровень расхода при включенной системе автоматического регулирования мощности. На рис. 12 показан типичный характер изменения реактивности при ступенчатом снижении расхода. Температурные эффекты при изменении расхода учитывались через изотермический коэффициент реактивности. Как показали исследования, величина  $(\Delta K/\Delta G)_{ас}$  в пределах разброса данных от измерения к измерению и в пределах ошибки измерений (полная погрешность 10 %) не имеет явной зависимости от расхода натрия

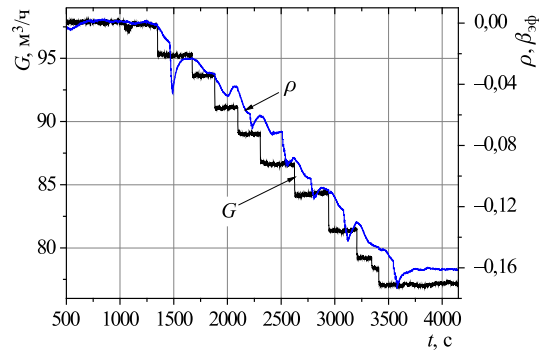


Рис. 12. Изменение реактивности ( $\rho$ ) при ступенчатом снижении расхода натрия через активную зону ( $G$ ) от 98 до 77 м<sup>3</sup>/ч при мощности 1500 кВт с включенной системой автоматического регулирования

и уровня мощности. Усредненное значение асимптотического расходного коэффициента при мощности 1500 и 2000 кВт и расходе натрия 80–100 м<sup>3</sup>/ч равно

$$\Delta K / \Delta G_{\text{ас}} = \text{РКР}_{\text{ас}} = (0,66^{+0,44}_{-0,25}) \cdot 10^{-2} (\beta_{\text{эф}} / \text{м}^3 / \text{ч}).$$

## ВЫВОДЫ

В процессе выполнения программы энергетического пуска реактора ИБР-2М в 2011 г. получены данные о параметрах расходной обратной связи реактора. Основные результаты исследований заключаются в следующем.

- Расходный коэффициент реактивности при всех исследуемых уровнях мощности (500–2000 кВт) и расхода теплоносителя (40–100 м<sup>3</sup>/ч) отрицательный и по абсолютной величине достаточный для обеспечения стабильной работы реактора. При номинальной мощности и расходе натрия через активную зону 80–100 м<sup>3</sup>/ч расходный коэффициент реактивности составляет  $-0,43 \pm 0,0066$ ,  $10^{-2} \beta_{\text{эф}} / (\text{м}^3 / \text{ч})$ ; среднее значение асимптотического расходного коэффициента равно  $0,66 \cdot 10^{-2} (\beta_{\text{эф}} / \text{м}^3 / \text{ч})$ .

- Гидродинамический коэффициент реактивности, обусловленный расталкиванием кассет потоком натрия, линейно растет с расходом натрия и при номинальной мощности на  $\sim 40\%$  меньше, чем при «нулевой». Вероятнее всего, это уменьшение связано с изгибными деформациями топливных кассет из-за градиента температур по радиусу активной зоны.

- Абсолютное значение расходного коэффициента реактивности уменьшается с расходом натрия и растет с увеличением мощности реактора.

- При экстраполяции экспериментальных данных в область больших расходов отмечается значение расхода  $\sim 145 \text{ м}^3/\text{ч}$ , выше которого отрицательная обратная связь по расходу осуществляется только за счет гидродинамической расходной компоненты, равной  $-0,12 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/(\text{м}^3/\text{ч})$ .

- Расходный коэффициент реактивности при  $(W/G^2) \rightarrow 0$  стремится к  $-0,228 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/(\text{м}^3/\text{ч})$ , а при расходе  $115 \text{ м}^3/\text{ч}$  не зависит от мощности и равен  $-0,3 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/(\text{м}^3/\text{ч})$ .

- Расходный коэффициент реактивности связан с подогревом натрия в активной зоне зависимостью, близкой к линейной.

Результаты исследований предполагают проведение дальнейших работ по изучению параметров обратной связи по расходу, их изменение в процессе выгорания и влияние на динамические свойства реактора и его устойчивость.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В.Д. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщение ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.
2. *Ананьев В.Д. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщение ОИЯИ Р13-2012-41. 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. 1,06. Уч.-изд. л. 1,23. Тираж 245 экз. Заказ № 57969.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)