

P13-2012-42

В. Д. Ананьев, А. В. Виноградов, А. В. Долгих, Л. В. Едунов,  
Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов, А. А. Заикин\*

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПУСК  
МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА ИБР-2 (ИБР-2М)**

---

\*СНИИП-Систематом, Москва

Ананьев В. Д. и др.

P13-2012-42

Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М)

Приводятся основные результаты исследования модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М), выполненного по программе энергетического пуска реактора в 2011 г. на мощности вплоть до номинальной 2 МВт. По итогам энергетического пуска реактор и его технологические системы работали надежно. Новая система управления и защиты соответствует всем проектным требованиям и позволяет снизить мощность до безопасного уровня за время между импульсами. Все быстрые эффекты (мощностные, расходные и изотермический) отрицательны на всех уровнях мощности и расхода натрия через активную зону. Флуктуации энергии импульсов малы (5,9 % среднеквадратические) и значительно меньше, чем у ИБР-2 перед его остановом на модернизацию. Длительность нейтронного импульса на половине высоты равна  $(200 \pm 4)$  мкс, что меньше, чем для ИБР-2 в 2004 г. ( $(245 \pm 4)$  мкс). Импульсная мощность составляет 1830 МВт, мощность фона 8,6 % от средней мощности. Указанные параметры реактора позволяют обеспечить его безопасную и эффективную работу на мощности до 2 МВт при частоте повторения импульсов  $5 \text{ с}^{-1}$ .

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012

Ananiev V. D. et al.

P13-2012-42

First Power of the IBR-2 Modernized Reactor

We present the main results of the investigation of the modernized IBR-2 reactor carried out within the framework of the program of the power start-up of the reactor in 2011 operated at a power of up to rated 2 MW. According to the results of the power start-up the reactor and its technological systems operated without fail. The new safety control system meets all design objectives and makes it possible to decrease the reactor power to a safe level during the period between pulses. All fast feedbacks (power, flow and isothermal effect) are negative at all levels of power and sodium coolant flow rate through the core. Pulse energy fluctuations are small (5.9% mean square) and considerably less than those of IBR-2 before its shutdown for modernization. The full width at half maximum is  $(200 \pm 4) \mu\text{s}$ , which is less than for IBR-2 in 2004 ( $(245 \pm 4) \mu\text{s}$ ). The peak pulse power is 1830 MW, background between pulses 8.6% of mean power. The above-mentioned parameters allow the reactor to maintain its safe and efficient operation at a power of 2 MW at a pulse repetition rate of  $5 \text{ s}^{-1}$ .

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М), совершенно нового реактора, работающего в составе исследовательской ядерной установки ИБР-2, проводился с 5 июля по 28 октября 2011 г. Целью экспериментов на этапе энергетического пуска реактора являлось определение значений параметров реактора при работе на мощности. В работе представлены основные результаты проведенных исследований реактора.

### 1. РАБОТА РЕАКТОРА В ПРОЦЕССЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУСКА

Подъем мощности и выполнение программы энергетического пуска модернизированного реактора ИБР-2 проводились после выполнения программы физического пуска реактора [1] поэтапно с исследованием реактора на уровнях мощности и расхода натрия через активную зону (АЗ), представленных в табл. 1.

**Таблица 1. Значения уровней мощности и расходов натрия через активную зону при исследовании реактора ИБР-2М в процессе энергетического пуска**

$W$ , кВт	$G$ , м <sup>3</sup> /ч				
	40	60	80	—	100
500	40	60	80	—	100
1000	—	60	80	90	100
1300	—	—	—	—	100
1500	—	—	80	—	100
2000	—	—	80	90	100

13 июля 2011 г. ИБР-2М был выведен на мощность 500 кВт, далее мощность реактора постепенно повышалась, и 12 октября 2011 г. была достигнута проектная мощность 2000 кВт. Измерение реакторных параметров проводилось с помощью измерительной системы, созданной специально для проведения физического и энергетического пусков реактора. Некоторые данные по работе реактора в период энергетического пуска приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Некоторые данные по работе ИБР-2М за период энергетического пуска**

Параметр	Мощность реактора, кВт							Всего
	≤ 200	500	700	1000	1250	1500	2000	
Время работы на мощности, ч	52	132	18	240	20	200	342	1004
Выработка энергии, МВт · ч	10	66	12	240	25	300	684	1337
Расход натрия, м <sup>3</sup> /ч								
40	—	40	—	—	—	—	—	40
60	—	12	18	33	—	—	—	63
80	17	68	—	60	—	40	45	230
90	—	—	—	—	—	—	170	170
100	35	12	—	147	20	160	127	501

Оперативный запас реактивности, оцененный в конце энергетического пуска реактора после непрерывного подъема мощности до номинального уровня 2 МВт при расходе и температуре натрия на входе в активную зону 100 м<sup>3</sup>/ч и 282 °С соответственно, составил 2,6 β<sub>эф</sub> или 0,56 %. При расчетном значении коэффициента выгорания 1,08 · 10<sup>-3</sup> %/(МВт · сут) или 0,5 · 10<sup>-2</sup> β<sub>эф</sub>/(МВт · сут) оперативный запас реактивности обеспечивает энерговыработку 520 МВт · сут. При использовании 65 % оперативного запаса реактор может работать на мощности 2 МВт в течение 170 сут (4080 ч) до догрузки одной ТВС.

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ (МОС)

Под измеряемым параметром мощностной обратной связи понимается коэффициент реактивности (МКР), равный установившемуся значению реактивности после единичного изменения мощности реактора при неизменных значениях температуры и расхода натрия на входе в реактор, т. е.

$$\text{МКР} = \frac{\Delta K}{\Delta W} = \left( \frac{\Delta K}{\Delta W} \right) \Big|_{G, T = \text{const}} .$$

Рассматриваются две компоненты мощностной обратной связи — быстрая и медленная. Характеристики и физическая природа этих компонент МОС существенно различаются. Под быстрой обратной связью здесь понимается мощностная связь, действующая в течение 30–60 с после возмущения реактивности, под медленной — все остальное. В данном разделе под МКР

понимается быстрая обратная связь. Использовались следующие методы измерения быстрой компоненты МКР:

- по отношению наперед заданного скачка реактивности  $\Delta K$  к установившемуся изменению мощности  $\Delta W$ ;
- по наблюдению за положением органов регулирования при подъемах и снижении мощности реактора с учетом изотермического коэффициента реактивности;
- по отношению расходного коэффициента реактивности  $\Delta K/\Delta G$  при постоянной мощности к расходному коэффициенту мощности  $\Delta W/\Delta G$  (см. п. 2.4).

**2.1. Измерение МКР по отношению наперед заданного скачка реактивности  $\Delta K$  к установившемуся изменению мощности  $\Delta W$ .** Изучение быстрого МКР проводили динамическим методом путем ступенчатого возмущения реактивности. Реактор стабилизировали на определенном уровне мощности, отключали систему автоматического регулирования (АР), т.е. реактор во время измерений работал в режиме саморегулирования, и быстро изменяли уровень реактивности с помощью штатного органа управления, промежуточного регулятора (ПР). Возникающий переходный процесс изменения мощности длительностью 30–60 с регистрировался и затем обрабатывался с получением коэффициента реактивности (МКР). Скачок реактивности задавался до  $\pm 3,1 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$  со скоростью  $0,44 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/с$ . В каждом состоянии реактора ( $W, G$ ), указанном в табл. 1, проводилась серия скачков реактивности минус–плюс. Изменение мощности, обусловленное скачком реактив-

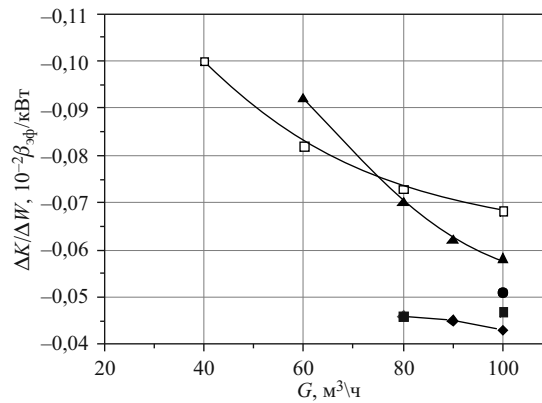


Рис. 1. Средние значения МКР ( $\Delta K/\Delta W$ ) при скачках реактивности на мощности 500, 1000, 1300, 1500 и 2000 кВт в зависимости от расхода натрия через активную зону ( $G$ ). Символами на рисунке указан уровень средней мощности: □ — 500 кВт, ▲ — 1000 кВт, ● — 1300 кВт, ■ — 1500 кВт, ◆ — 2000 кВт

ности, выделялось из общего реакторного шума с помощью оптимального для анализа быстрых переходных процессов FFT-фильтра. При скачках реактивности вниз эффекты МОС в среднем были на 10–15 % меньше, чем при скачках реактивности вверх. Этот факт отражает изменение МОС в сторону уменьшения или увеличения температуры активной зоны при изменении мощности. Поэтому в качестве оценки МКР использовалось усредненное по всем симметричным (минус–плюс) скачкам реактивности значение. Разброс среднего значения МКР с учетом неопределенности, вносимой шумами мощности, оценивался равным  $\pm 10\%$ . Средние значения МКР при разных значениях мощности и расхода натрия через активную зону приведены в сводной табл. 7. На рис. 1 приведены данные по изменению МКР в зависимости от расхода натрия.

**2.2. Измерение МКР по наблюдению за положением АР и ПР при подъемах и снижении мощности реактора с учетом изотермического коэффициента реактивности (ИКР).** Основная цель измерений — получить зависимость асимптотического значения быстрого МКР от мощности. В данном случае постоянные времени быстрой мощностной связи ( $< 1$  мин) значительно меньше скорости штатного изменения мощности (1 МВт/ч), поэтому в процессе подъема (снижения) мощности в любой момент времени реализуются квазистационарные условия по быстрому мощностному эффекту реактивности. На рис. 2 приведены кривые ввода реактивности в процессе первого подъема мощности до 2 МВт с расходом натрия через активную зону  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  и при штатном подъеме и снижении мощности с расходом 80 и  $90 \text{ м}^3/\text{ч}$  соответственно. В табл. 3 приведены данные по асимптотическому быстрому МКР при подъемах и снижении мощности в разных диапазонах ее изменения.

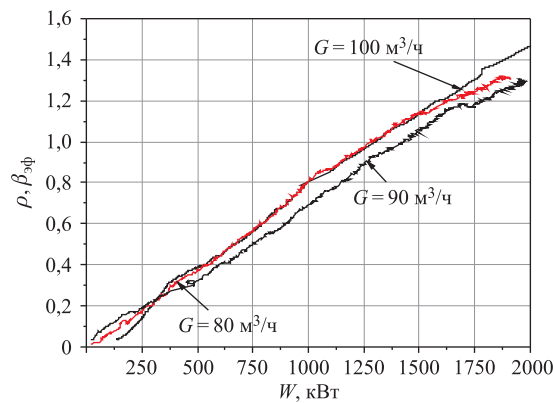


Рис. 2. Ввод реактивности за вычетом температурного эффекта при подъеме мощности до 2000 кВт с расходом натрия через активную зону 100 и  $80 \text{ м}^3/\text{ч}$  и снижении с расходом натрия  $90 \text{ м}^3/\text{ч}$

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

№	$\Delta W$ , кВт	$G$ , м <sup>3</sup> /ч	$-\Delta K/\Delta W$ , $10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$	$-(\Delta K/\Delta W)_{\text{ср}}$ , $10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$
1	140–1000	100	0,064	0,070
2	1000–1500	100	0,082	
3	1500–1750	100	0,076	
4	1750–2000	100	0,061	
5	530–1970	80	0,067	0,067
6*	1960–13	90	0,063	0,063

\* — штатное снижение мощности.

**2.3. Зависимость МКР от расхода натрия. Натриевая и топливная составляющие МКР.** Мощность и расход связаны с подогревом  $\Delta T$  теплоносителя в активной зоне соотношением  $W = \rho c_p G \Delta T$ , где  $\rho$  и  $c_p$  — плотность и удельная теплоемкость натрия соответственно. Отсюда мощный коэффициент реактивности определяется из уравнения

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

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

Анализ всего массива экспериментальных 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 мощности 500 и 1000 кВт и вторая область — 1500 и 2000 кВт. Внутри этих областей явных различий от общей зависимости МКР от расхода не наблюдается. На рис. 3 приведена совокупность значений МКР от обратного расхода натрия через активную зону для указанных выше мощностей.

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

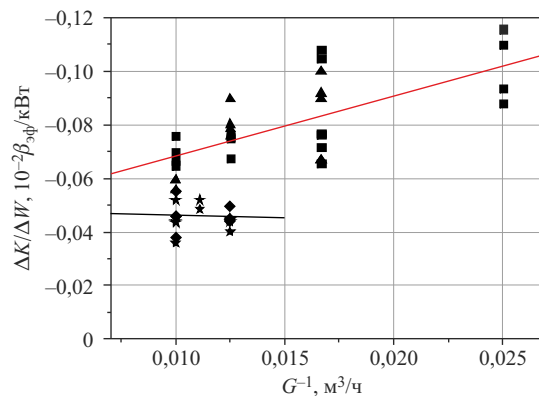


Рис. 3. Значения МКР ( $\Delta K/\Delta W$ ) при скачках реактивности на мощностях 500 (■), 1000 (▲), 1500 (◆) и 2000 кВт (★) в зависимости от обратного расхода натрия через активную зону ( $G^{-1}$ )

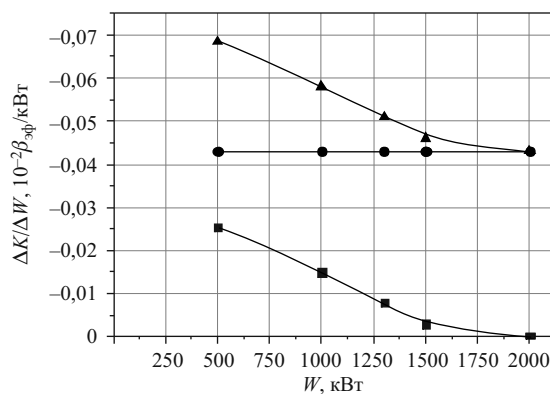


Рис. 4. Зависимость МКР ( $\Delta K/\Delta W$ ) от мощности при расходе натрия через активную зону, равном  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ : ▲ — полное значение; ● — топливная и ■ — натриевая составляющие МКР

На рис. 4 приведена зависимость значений быстрого МКР от мощности при расходе натрия через активную зону  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Из рис. 4 видно, что расходная (натриевая) компонента МКР уменьшается с мощностью линейно и на мощности 2 МВт близка к нулю. Таким образом, на номинальной мощности 2 МВт и при расходе натрия через активную зону  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  быстрая мощностная связь практически полностью определяется обратной связью по топливу.



**2.4. Оценка мощностного коэффициента реактивности по отношению расходного коэффициента реактивности  $\Delta K/\Delta G$  к расходному коэффициенту мощности  $\Delta W/\Delta G$ .** Мощностный коэффициент реактивности ( $\Delta K/\Delta W$ ) может быть получен косвенно как отношение расходного коэффициента реактивности  $\Delta K/\Delta G$  при постоянной мощности к расходному коэффициенту мощности  $\Delta W/\Delta G$ :

$$\Delta K/\Delta W = (\Delta K/\Delta G)/(\Delta W/\Delta G).$$

Все указанные выше расходные эффекты представлены в разд. 3. В табл. 4 приведены данные по мощностному коэффициенту реактивности ( $\Delta K/\Delta W$ ) для разных значений расхода натрия через активную зону и средней мощности реактора. Из сравнения косвенных оценок МКР (см. табл. 4) с данными МКР, полученными в прямых измерениях, видно, что на малой мощности имеются существенные различия. С другой стороны, оценки косвенных измерений МКР в принципе имеют большую погрешность и в данном случае являются качественными.

**Таблица 4. Оценки мощностного коэффициента реактивности ( $\Delta K/\Delta W$ ) по данным расходного эффекта**

$-\Delta K/\Delta W, 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{кВт}$					
$W, \text{кВт}$	$G, \text{м}^3/\text{ч}$				
	40	60	80	90	100
500	$0,10 \pm 0,01$ (0,1)	$0,13 \pm 0,01$ (0,082)	$0,13 \pm 0,01$ (0,073)		$0,13$ (0,068)
1000		$0,10 \pm 0,01$ (0,092)	$0,08 \pm 0,008$ (0,08)	(0,062)	$0,06 \pm 0,006$ (0,058)
1500			$0,056 \pm 0,006$ (0,046)		$0,068 \pm 0,007$ (0,046)
2000			$0,048 \pm 0,005$ (0,046)	$0,050 \pm 0,005$ (0,045)	$0,050 \pm 0,005$ (0,043)

*Примечание.* В скобках представлены данные прямых измерений МКР.

**2.5. Медленные эффекты мощностной обратной связи.** Медленные эффекты реактивности мощностной обратной связи ( $\rho_{\text{МОС}}$ ) в данных исследованиях — это все эффекты длительностью выше 3 мин. Медленные эффекты обусловлены изменением состояния конструктивных элементов, окружающих активную зону, при изменении мощности. Измерить медленные эффекты прямым способом невозможно, поскольку на исследуемые процессы накладывается ряд других переменных, таких как изменение расхода и температуры натрия на входе в активную зону. Для выделения медленной мощностной

обратной связи использовалось уравнение баланса реактивности относительно состояния импульсной критичности (базовое состояние)

$$\rho_{\text{мос}} = - \left( \sum_{i=1}^I [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})] + \rho_T + \rho_G + \rho_{\text{э}} + \rho_x \right),$$

где  $k_i(z_i)$ ,  $k_i(z_{0i})$  — текущие и, соответственно, базовые значения реактивности, вводимой  $i$ -м органом регулирования при изменении его положения из базового состояния  $z_{0i}$  в текущее состояние  $z_i$ ;  $\rho_T$ ,  $\rho_G$  — температурный и расходный эффекты реактивности соответственно;  $\rho_{\text{э}}$  — эффект энерговыработки, который в данном случае мал, и им можно пренебречь;  $\rho_x$  — эффекты от шумов различного рода; температурный коэффициент  $\Delta K/\Delta T = 1,1 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/^\circ\text{C}$ . Типичное изменение реактивности медленной мощностной обратной связи при выходе на номинальную мощность 2 МВт показано на рис. 5.

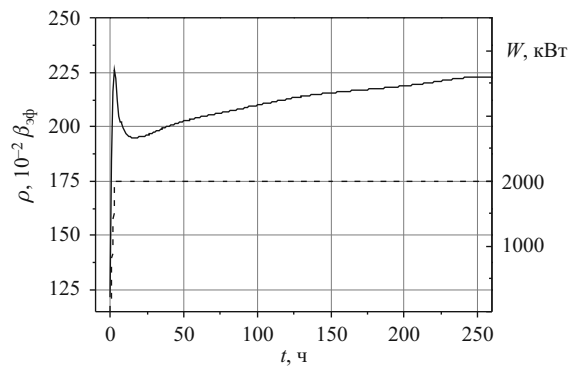


Рис. 5. Изменение реактивности медленной мощностной обратной связи ( $\rho_{\text{мос}}$ ) от времени ( $t$ ) при выходе на мощность 2 МВт в декабрьском цикле 2011 г.  $W$  — мощность

**Таблица 5. Ввод положительной реактивности ( $\rho$ ) после выхода на разные уровни мощности ( $W$ )**

$W$ , кВт	200	500	1000	1500	2000
$\rho$ , $10^{-2} \beta_{\text{эф}}$	8–10	15–20	25–30	27	33

После достижения заданной мощности происходит, как и для реактора ИБР-2, медленный (до 25 ч) ввод положительной реактивности (см. рис. 5). Исследование показало, что ввод реактивности вызван нагревом стационарного отражателя, кожуха подвижного отражателя и, как следствие этого, их

приближением к активной зоне. Величина положительной реактивности зависит от мощности (табл. 5) и от предыстории выхода на мощность, т. е. степени нагрева стационарного отражателя и откатных защит от предыдущих подъемов мощности.

Для оценки величины смещения стационарного отражателя (СО) воспользуемся экспериментальной величиной  $\Delta K/\Delta X = 37 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{мм}$  при отодвигании СО-1 во время физического пуска ИБР-2 в 1977 г. Отсюда следует, что смещение СО-1 и СО-2 на  $\sim 0,5$  мм на мощности 2 МВт может объяснить ввод положительной реактивности, указанной в табл. 6. В дальнейшем, спустя 20–25 ч, начинается медленный вывод реактивности со скоростью, указанной в табл. 6.

**Таблица 6. Скорость вывода реактивности через 25 ч после выхода на номинальную мощность**

$W_{\text{ср}}$ , кВт	Скорость вывода реактивности, $10^{-2} \beta_{эф}/\text{ч}$		Полный эффект, $10^{-2} \beta_{эф}$	Время стабилизации, ч
	В первые 40 ч	В последующие 100 ч		
1000	0,1	0,1	7	70
1500	0,25	0,15	25	140
2000	0,5	0,1	30	140

Ввод отрицательной реактивности частично связан с выгоранием топлива, однако в большей мере с постепенным длительным прогревом опорных железобетонных конструкций в биологической защите (верхняя защита, подставка под передней опорой ПО-3). Однако идентифицировать этот эффект с конкретным узлом реактора не удалось.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСХОДНОГО (РЭР) И ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО (ИЭР) ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ

Определение параметров РЭР необходимо для оценки поведения реактора в переходных нештатных режимах, а также для прогнозирования изменения РЭР в процессе выгорания топлива.

Расходный эффект реактивности есть изменение реактивности после скачкообразного изменения расхода натрия через активную зону. Расходный коэффициент реактивности (РКР) — это значение РЭР, отнесенное к единице изменения расхода натрия при постоянной мощности и температуре натрия на входе в активную зону реактора в течение 30–60 с:

$$\frac{\Delta K}{\Delta G} = \left( \frac{\Delta K}{\Delta G} \right) \Big|_{W, T = \text{const}}$$

Расходный эффект реактивности определялся в двух режимах работы реактора: с включенной системой автоматического регулирования (АР+) и выключенной (АР–).

В случае (АР+) коэффициент  $\Delta K/\Delta G$  измеряется непосредственно. Расход натрия изменялся небольшими скачками (не выше  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  через активную зону) в диапазоне  $40\text{--}100 \text{ м}^3/\text{ч}$  при постоянном уровне мощности 500, 100, 1500, 2000 кВт.

В случае (АР–) непосредственно измеряется расходный коэффициент мощности  $\Delta W/\Delta G$ , т. е. изменение мощности при быстром изменении расхода при постоянной температуре натрия на входе в активную зону. Расход меняется скачкообразно, и вносимая реактивность компенсируется мощностной обратной связью.

При измерении РЭР можно выделить три его компоненты.

- Быстрый расходный эффект реактивности и соответствующий ему быстрый расходный коэффициент реактивности  $\text{РКР}_6$ . Этот эффект действует только во время изменения расхода. Характерное время изменения быстрого эффекта до 6 с.
- Собственно расходный эффект реактивности РКР. Проявляется в течение 30–60 с после изменения расхода в диапазоне времени, меньшем времени циркуляции натрия по первому контуру.
- Асимптотический расходный эффект реактивности и соответствующий ему асимптотический коэффициент  $\text{РКР}_{ас}$ . Устанавливается в течение 15 мин после изменения расхода.

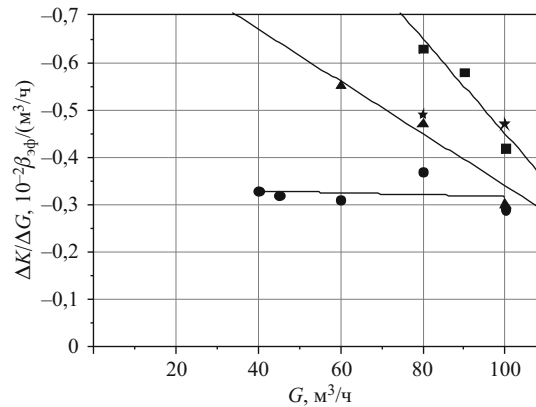


Рис. 6. Расходный коэффициент реактивности ( $\Delta K/\Delta G$ ) в зависимости от расхода натрия через активную зону ( $G$ ) на некоторых уровнях мощности ( $W$ ): ● — 500 кВт, ▲ — 1000 кВт, ★ — 1500 кВт, ■ — 2000 кВт. Приведена линейная аппроксимация данных

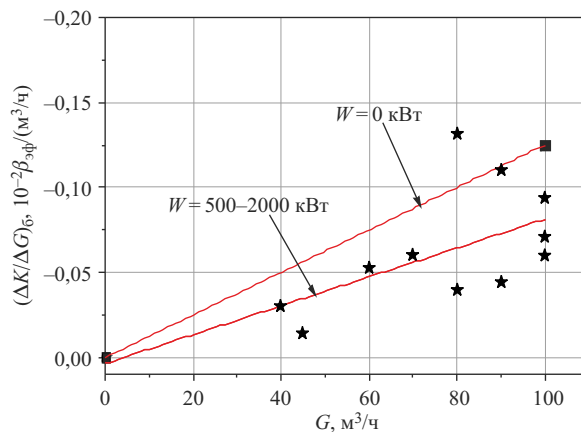


Рис. 7. Быстрый расходный коэффициент реактивности  $(\Delta K/\Delta G)_6$  в зависимости от расхода натрия через активную зону ( $G$ ) на мощности от 500 до 2000 кВт. Приведена линейная аппроксимация данных. При нулевой мощности приведены результаты физического пуска

Многочисленные эксперименты, проведенные на всех уровнях мощности, отмеченных в табл. 1, от 500 до 2000 кВт и расходе натрия через активную зону от 60 до 100 м³/ч показали, что все расходные эффекты отрицательны. На рис. 6 и 7 представлено изменение расходных коэффициентов РКР и быстрого РКР₆ в зависимости от расхода. Природа быстрого расходного эффекта чисто гидродинамическая (расталкивание кассет потоком натрия), поэтому, учитывая данные физического пуска реактора ИБР-2М, РКР₆ в первом приближении имеет линейную связь с расходом. Линейная аппроксимация экспериментальных данных, представленных на рис. 7, имеет вид

$$\text{РКР}_6 = \Delta K/\Delta G = 0,0036 - (8,5 \pm 4,4)G, \quad 10^{-4}(\beta_{3\phi}/\text{м}^3/\text{ч})\text{м}^3/\text{ч}.$$

Как видно из рис. 7, быстрый расходный коэффициент реактивности на мощности в среднем почти на 40% меньше соответствующего коэффициента при нулевой мощности. Вероятнее всего, это связано с тем, что топливные стержни на мощности уже имеют предварительный изгиб и соответственно большую жесткость. Поэтому расталкивающее действие изменения расхода натрия на мощности проявляется в меньшей степени, чем это было зарегистрировано на физическом пуске.

Результаты измерений расходного коэффициента реактивности и расходного коэффициента мощности приведены в сводной табл. 7, а на рис. 8 показано изменение расходного коэффициента мощности в зависимости от расхода натрия через активную зону.

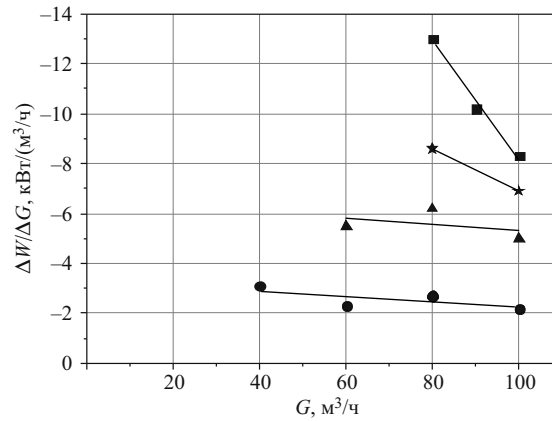


Рис. 8. Расходный коэффициент мощности ( $\Delta W/\Delta G$ ) в зависимости от расхода натрия через активную зону ( $G$ ) на некоторых уровнях мощности ( $W$ ): ● — 500 кВт, ▲ — 1000 кВт, ★ — 1500 кВт, ■ — 2000 кВт

Асимптотический расходный коэффициент ( $\Delta K/\Delta G$ )<sub>ас</sub> определялся при переходе с одного уровня расхода на другой. Система автоматического регулирования мощности в данных измерениях была включена. На рис. 9 для примера показан ход изменения реактивности при ступенчатом снижении расхода от 98 до 77 м<sup>3</sup>/ч на мощности 1500 кВт.

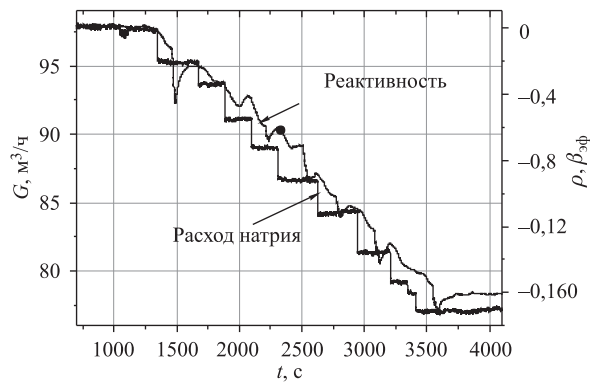


Рис. 9. Изменение реактивности ( $\rho, \beta_{эф}$ ) при ступенчатом снижении расхода натрия через активную зону ( $G$ ) от 98 до 77 м<sup>3</sup>/ч на мощности 1500 кВт

Температурные эффекты при изменении расхода натрия учитывались через изотермический коэффициент реактивности. Как видно из табл. 7, вели-

чина  $(\Delta K/\Delta G)_{ac}$  в пределах разброса данных от измерения к измерению и в пределах ошибки (10 %) не имеет явной зависимости от расхода натрия и уровня мощности. Усредненное значение асимптотического расходного коэффициента реактивности на мощности 1500 и 2000 кВт и расходе натрия 80–100 м<sup>3</sup>/ч равно

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

Под *температурным (изотермическим) коэффициентом реактивности (ИКР)* подразумевается установившееся изменение реактивности при измене-

**Таблица 7. Сводные данные значений мощностного, расходного и изотермического коэффициентов реактивности на разных уровнях мощности и расходах натрия через активную зону реактора**

$W$ , кВт	$G$ , м <sup>3</sup> /ч	$-(\Delta K/\Delta G)$ , $10^{-2} \beta_{эф}/(\text{м}^3/\text{ч})$	$-(\Delta K/\Delta G)_{ac}$ , $10^{-2} \beta_{эф}/(\text{м}^3/\text{ч})$	$-\Delta W/\Delta G$ , кВт/(м <sup>3</sup> /ч)	$\Delta K/\Delta W$ , $10^{-2} \beta_{эф}/\text{кВт}$	-ИКР, $10^{-2} \beta/^\circ\text{C}$
500	40	0,33±0,03		3,1±0,3	0,10±0,01 (0,1)	
	60	0,31±0,03		2,3±0,2	0,13±0,01 (0,82)	
	80	0,37±0,04		2,7±0,3	0,13±0,01 (0,073)	1,20±0,10
	100	0,29±0,03		2,2±0,2	0,13 (0,068)	
1000	60	0,55±0,06		5,5±0,5	0,10±0,01 (0,092)	
	80	0,47±0,05		6,2±0,6	0,08±0,008 (0,08)	1,24±0,10
	90				(0,062)	
	100	0,30±0,03 (0,3)		5,0±0,5	0,06±0,006 (0,058)	
1500	80	0,49±0,05 (0,25)		8,6±0,9	0,056±0,006 (0,046)	
	100	0,47±0,05 (0,27)	0,61	6,9±0,7	0,068±0,007 (0,046)	
2000	80	0,63±0,06 (0,33)	0,70	13,0±1,3	0,048±0,005 (0,046)	
	90	0,52±0,06 (0,35)	0,6	10,2±1	0,050±0,005 (0,045)	1,13±0,10
	100	0,42±0,04 (0,3)	0,41	8,3±0,8	0,050±0,005 (0,043)	

нии температуры натрия на входе в реактор на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  при постоянных мощности и расходе теплоносителя

$$\frac{\Delta K}{\Delta T} = \frac{\Delta K}{\Delta T_{\text{Na вх}}} \Big|_{G, W = \text{const}}$$

Измерение ИКР проводили на мощности 500, 1000 и 2000 кВт с расходом натрия через активную зону 80 и 90 м<sup>3</sup>/ч. Температура натрия на входе в активную зону менялась в диапазоне 270–280 °С. Сводные данные по всем измерениям ИКР представлены в табл. 8. В среднем по всем уровням мощности и расхода натрия значение ИКР равно  $\frac{\Delta K}{\Delta T} = -(1,19 \pm 0,10) \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / ^{\circ}\text{C}$  и в пределах ошибки не зависит от температуры натрия на входе в активную зону реактора и уровня мощности.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА МОЩНОСТИ И ФОНА МЕЖДУ ИМПУЛЬСАМИ. ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ МОДУЛЯТОРА ПО-3 В ДИНАМИКЕ

Форма импульса измерялась по быстрым нейтронам с помощью Th-232 камеры деления в счетном режиме по времени пролета. Измерения проводились на постоянной мощности в диапазоне от 200 до 2000 кВт. Время дискретизации составляло 4 мкс. Во всех измерениях форма импульса близка к форме распределения усеченного Гаусса. Длительность импульса на половине высоты на мощности 2 МВт составила  $(200 \pm 4)$  мкс. На рис. 10 показана

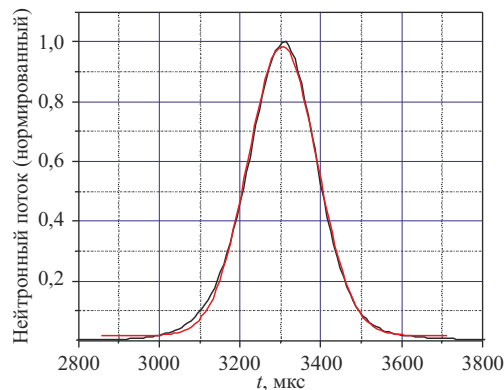


Рис. 10. Форма импульса мощности и ее аппроксимация по Гауссу. Импульс нормирован на максимум. Ширина импульса на половине высоты составляет 200 мкс



форма импульса и ее аппроксимация по Гауссу, на рис. 11 — форма импульса в большом динамическом диапазоне, а на рис. 12 — распределение фона между импульсами. Некоторые численные характеристики импульса мощности представлены в табл. 8.

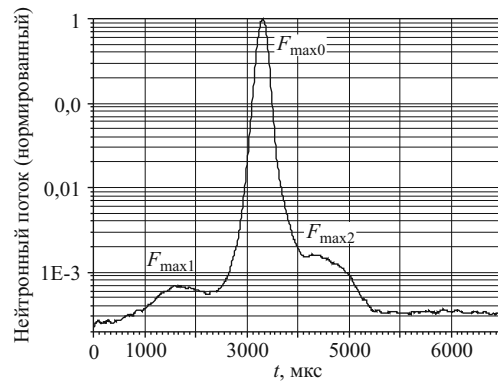


Рис. 11. Форма импульса мощности. Данные нормированы на максимум импульса. Положение отдельных максимумов использовано в табл. 8 для оценки численных характеристик импульса

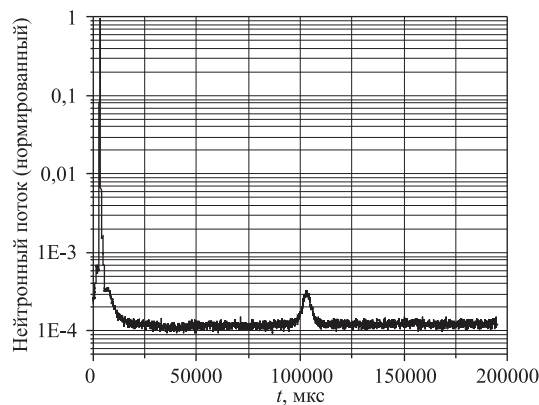


Рис. 12. Распределение мощности между двумя последовательными импульсами. Данные нормированы на максимум импульса

Из анализа измеренной формы импульса и фоновой мощности между импульсами была получена оценка эффективности подвижных отражателей в динамике, т. е. при их вращении на номинальных оборотах. Ход реактивности вычислялся решением обратного уравнения кинетики по измеренной форме мощности за период следования импульсов. Ранее при проведении физиче-

ского пуска реактора ИБР-2М эффекты реактивности ПО-3 были оценены в статическом состоянии подвижных отражателей в подкритическом режиме работы реактора. На рис. 13 приведен ход расчетной реактивности вблизи максимума импульса мощности. Как видно из рисунка, правая от максимума часть кривой реактивности не соответствует ходу реактивности, полученной в статических измерениях. Эта сильная асимметрия хода восстановленной

**Таблица 8. Некоторые численные характеристики импульса мощности и фона между импульсами. Частота повторения импульсов равна  $4,999 \text{ с}^{-1}$ . Временные интервалы определялись от сигнала реакторного старта**

Название параметра	Обозначение	Значение	Обратная величина
Основной импульс			
Максимум	$F_{\max 0}$	1,00	
Полуширина	$\theta_{1/2}$ , мкс	200	
Ширина по основанию (на уровне 0,01 от максимума)	$\Delta t_0$ , мкс	710	
Положение максимума	$t_{\max 0}$ , мс	3,308	
1-й побочный импульс			
Максимум	$F_{\max 1}$	$6,99 \cdot 10^{-4}$	1470
Положение максимума	$t_{\max 1}$ , мс	1,72	
Ширина по основанию	$\Delta t_1$ , мс	1,25	
2-й побочный импульс			
Максимум	$F_{\max 2}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	645
Положение максимума	$t_{\max 2}$ , мс	4,40	
Ширина по основанию	$\Delta t_2$ , мс	1,12	
«Горб» («плато»)			
Амплитуда	$F_{\max 3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	2940
Ширина	$\Delta t_3$ , мс	2,3	
Начало	$t_{pl}$ , мс	5,70	
Фон между импульсами	$F_{bg}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	8547
Сателлит			
Отношение максимума сателлита к фону	$F_{\max \text{ sat}}/F_{bg}$	2,69	
Положение максимума	$t_{\max \text{ sat}}$ , мс	103,30	
Полуширина	$\theta_{1/2 \text{ sat}}$ , мс	3,84	
Ширина по основанию	$\Delta t_{\text{sat}}$ , мс	9,80	

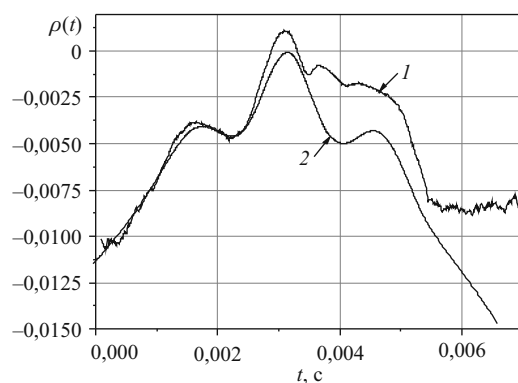


Рис. 13. Ход реактивности  $\rho(t)$  в абсолютных единицах вблизи мгновенной критичности в динамических измерениях на этапе энергетического пуска (1) и в статических измерениях на этапе физического пуска (2)

реактивности в побочных максимумах может быть следствием заметной доли делений в зоне на «запаздывающих» (вероятнее всего, рассеянных от ближайшего окружения активной зоны) нейтронах. Аналогичный ход реактивности наблюдался и на реакторе ИБР-2 с подвижным отражателем ПО-3 [2]. Сопоставление данных статических и динамических измерений позволяет в даль-

**Таблица 9. Эффекты реактивности подвижного отражателя, полученные в динамических измерениях**

Название параметра	Обозначение, ед. измерения	Значение
Равновесная импульсная надкритичность	$\varepsilon_{\max}, 10^{-2} K_{\text{эф}}$	0,11
Полная эффективность подвижного отражателя (лопасти ОПО + ДПО выведены за пределы активной зоны).	$\Delta K_{\text{МР}}, 10^{-2} K_{\text{эф}}$	2,60
Эффективность основного подвижного отражателя (ОПО)	$\Delta K_{\text{ММР}}, 10^{-2} K_{\text{эф}}$	1,57
Эффективность дополнительного подвижного отражателя (ДПО)	$\Delta K_{\text{АМР}}, 10^{-2} K_{\text{эф}}$	1,03
Разность реактивности основного и 1-го побочного импульса	$\Delta K_1, 10^{-2} K_{\text{эф}}$	0,46

нейшем рассчитать параметры этого запаздывающего источника. Эффекты реактивности подвижных отражателей, полученные в динамических измерениях, представлены в табл. 9.

## 5. ФЛУКТУАЦИИ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ

Измерения флуктуации (шумов) энергии импульсов проводились на всех уровнях мощности и расхода натрия через активную зону, указанных в табл. 1. Мощность, расход и температура натрия на входе в реактор во время измерений поддерживались постоянными. Реактор работал в штатном режиме автоматического регулирования мощности. В процессе измерений (за время 28 мин) регистрировались 8192 последовательных значений энергии импульсов мощности. Далее проводился статистический анализ данных с вычислением спектральных характеристик шумов, плотности распределения энергии импульсов и параметров распределения. Плотность распределения энергии импульсов реактора ИБР-2М на номинальной мощности хорошо аппроксимируется гауссовой зависимостью.

Для оценки уровня шумов использовались значения среднеквадратических относительных отклонений и размах (величина, равная разности между максимальным и минимальным значением энергии импульсов) энергии импульсов. На рис. 14 дана зависимость среднеквадратических отклонений, а на рис. 15 — размах колебаний энергии импульсов от уровня мощности

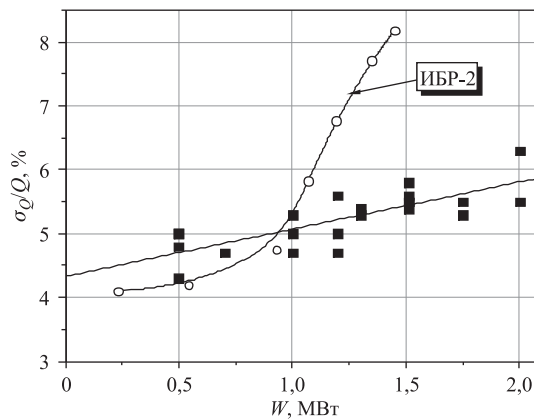


Рис. 14. Изменение величины относительных среднеквадратических флуктуаций энергии импульсов ( $\sigma_Q/Q$ ) от средней мощности ( $W$ ) при значениях расхода натрия через активную зону от 40 до 100 м<sup>3</sup>/ч. Для сравнения приведены данные, полученные при пуске ИБР-2 с ПО-3 в 2004 г.

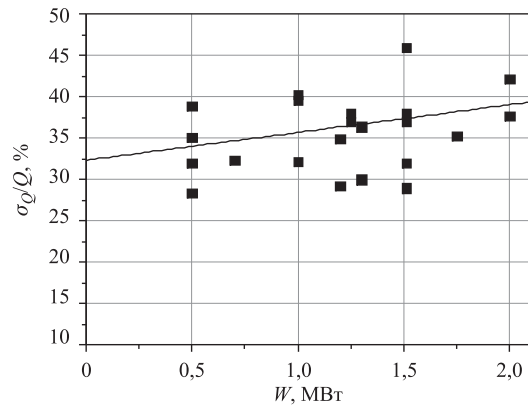


Рис. 15. Изменение величины относительного размаха флуктуации энергии импульсов ( $\Delta_Q/Q$ ) от средней мощности ( $W$ ) при расходе натрия через активную зону от 40 до 100 м<sup>3</sup>/ч

при различных значениях расхода натрия через активную зону. Там же, на рис. 14, приведена кривая изменения колебаний энергии импульсов при пуске ИБР-2 в 2004 г. [3].

Явной зависимости уровня флуктуации энергии импульсов от расхода натрия через активную зону не обнаружено. Можно считать, что изменение шумов мощности с изменением расхода значительно меньше разброса шумов от измерения к измерению, составляющего  $\pm 10\%$ .

Изменение среднеквадратических ( $\sigma_Q/Q$ ) и полных ( $\Delta_Q/Q$ ) относительных флуктуаций энергии импульсов от уровня мощности ( $W$ ) в диапазоне 0,5–2 МВт и расходе натрия через активную зону 40–100 м<sup>3</sup>/ч хорошо аппроксимируется следующими линейными зависимостями:

$$\begin{aligned}\sigma_Q/Q &= (4,4 \pm 0,17) + 0,74 W, \%, \\ \Delta_Q/Q &= (32 \pm 3,6) + 3,4 W, \%,\end{aligned}$$

где  $W$  — средняя мощность (МВт).

**Корреляционный анализ флуктуации энергии импульсов и колебаний подвижных отражателей.** Во время физического пуска реактора ИБР-2М было показано, что основным источником флуктуаций энергии импульсов на мощности выше 100 Вт являются осевые (по направлению к активной зоне) колебания лопастей подвижных отражателей. Другие эффекты, например, протекание натрия через активную зону, проявляются в гораздо меньшей степени, и их влиянием на флуктуации мощности можно пренебречь. В процессе энергетического пуска реактора параллельно с энергией импуль-

сов измерялись параметры подвижных отражателей, в наибольшей степени влияющие на флуктуации энергии импульсов:

- $X_{\text{ОПО}}$  — поперечные смещения ОПО;
- $X_{\text{ДПО}}$  — поперечные смещения ДПО;
- $\varphi$  — угол рассинхронизации между ОПО и ДПО во вращении.

Корреляционные характеристики указанных выше параметров исследовались на всех уровнях мощности и расхода, отмеченных в табл. 1. Спектральные плотности флуктуаций энергии импульсов на некоторых уровнях мощности, включая номинальную 2 МВт, и расхода натрия через активную

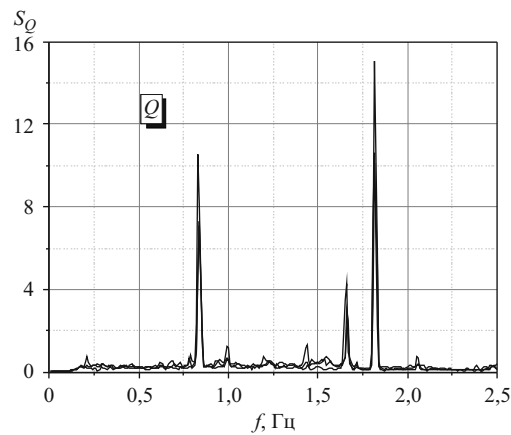


Рис. 16. Спектральные плотности флуктуаций энергии импульсов ( $S_Q$ ) на мощности 1, 1,5 и 2 МВт и расходе натрия через активную зону, равном  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $f$  — частота в Гц

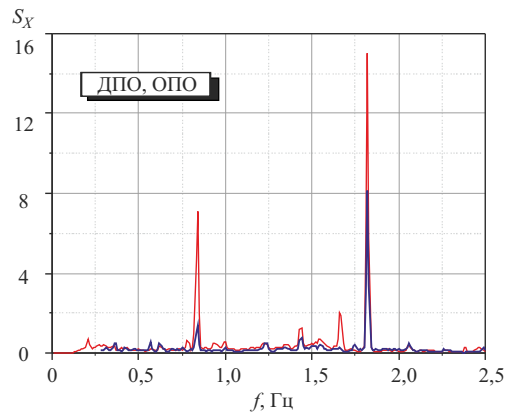


Рис. 17. Типичная форма спектральной плотности осевых колебаний лопастей ДПО (жирная линия) и ОПО

зону реактора приведены на рис. 16, а на рис. 17 — соответствующие спектральные плотности осевых колебаний лопастей ДПО и ОПО.

Отметим некоторые особенности спектральной плотности флуктуации энергии импульсов.

- Основные компоненты шумов представляют собой линейчатый спектр, соответствующий детерминированным (гармонического вида) колебаниям подвижных отражателей.

- Частоты соответствующих линий в спектрах на всех уровнях мощности от 500 до 2000 кВт совпадают.

- Частоты линий в спектрах на малой мощности реактора (физический пуск) и на высокой мощности (энергетический пуск) совпадают.

- Форма спектра не зависит от уровня средней мощности и от расхода натрия через активную зону за некоторыми исключениями, о которых будет сказано ниже.

Непосредственно влияние натрия (через флуктуации его температуры и расхода на входе в активную зону) на спектр колебаний энергии импульсов не сказывается. Влияние натрия проявилось только на мощности 500 кВт (см. рис. 18), где с ростом расхода интенсивность шумов в области 0,76 и 1,0 Гц растет.

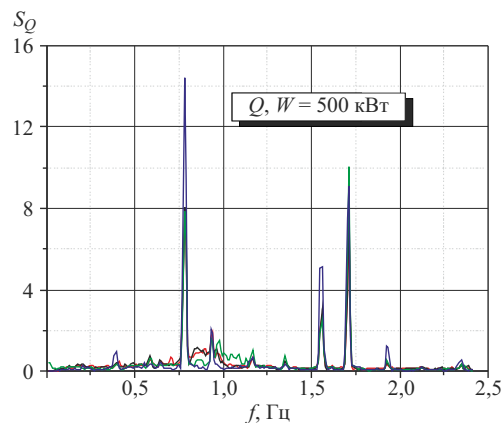


Рис. 18. Спектральные плотности флуктуации энергии импульсов ( $S_Q$ ) на мощности 500 кВт при различных значениях расхода натрия через активную зону: 40, 60, 80 и 100 м<sup>3</sup>/ч

Отметим еще одну особенность реакторных шумов. В некоторых случаях были зарегистрированы отклонения от типичной формы спектра колебаний мощности. Как было получено из корреляционных измерений, источником нетипичных шумов мощности являются осевые колебания ДПО. На рис. 19 для примера представлены спектры колебаний ДПО и энергии импульсов на

мощности 2 МВт в одном из нетипичных случаев. В целом указанные возмущения малы. Оценка реактивности, вызывающей нетипичные возмущения мощности, не превышает  $\sim 6 \cdot 10^{-2} \beta_{и}$  ( $\beta_{и}$  — импульсная доля запаздывающих нейтронов) или  $6 \cdot 10^{-3}$  мм смещений лопасти ДПО в сторону активной зоны.

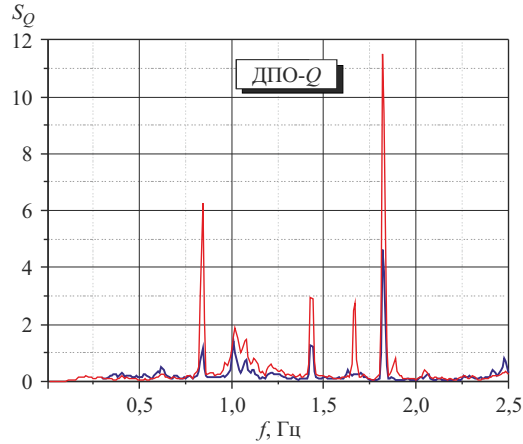


Рис. 19. Корреляция спектральной плотности осевых колебаний лопасти ДПО (жирная линия) и энергии импульсов для одного «нетипичного» спектра на мощности 2 МВт

Как видно из рис. 17–19, в спектрах флуктуации энергии импульсов видны линии 0,61; 0,83; 0,99; 1,19; 1,44; 1,66; 1,83; 2,05 Гц, связанные с осевыми колебаниями лопастей ОПО и ДПО. Данные по уровню флуктуаций энергии импульсов и осевых колебаний подвижных отражателей на номинальной мощности 2 МВт представлены в табл. 10.

Фазовые колебания между лопастями ОПО и ДПО малы и в спектре флуктуации мощности не проявляются. Как видно из табл. 10, среднеквадратические флуктуации энергии импульсов на номинальной мощности не

**Таблица 10.** Среднеквадратические ( $\sigma$ ) и максимальные ( $\Delta$ ) колебания энергии импульсов мощности ( $Q$ ), осевых ( $X_{опо}$ ,  $X_{дпо}$ ) и фазовых ( $\varphi$ ) колебаний лопастей подвижных отражателей на мощности 2000 кВт

Параметр	$\sigma$	$\Delta$
$Q$ , %	$5,9 \pm 0,4$	$39 \pm 5$
$X_{опо}$ , мм	$(4,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$0,02 \pm 0,005$
$X_{дпо}$ , мм	$0,018 \pm 0,0015$	$0,12 \pm 0,006$
$\varphi$ , мкс	$25 \pm 4$	$165 \pm 20$



превышают в среднем 6 %, т. е. достаточно малы. Размах флуктуаций энергии импульсов в среднем равен 39 %. Спектральный состав колебаний отражателей, влияющих на реактивность и определяющих уровень флуктуации мощности, представляет собой гармонические колебания, «замаскированные» в спектрах колебаний исследуемых параметров в диапазоне частот до 2,5 Гц. Таким образом, основными источниками флуктуации энергии импульсов на начальном этапе работы реактора на мощности до 2000 кВт являются осевые колебания отражателей.

## 6. РАБОТА СУЗ

В период проведения энергетического пуска оценивалась работа СУЗ ИБР-2М на всех уровнях мощности вплоть до номинальной 2 МВт в штатном режиме эксплуатации.

Контроль параметров работы технологических систем ИБР-2 велся штатной системой контроля технологических параметров (СКТП). Контроль технологических параметров реактора, введенных в аварийную защиту, нейтронных параметров и состояния модулятора реактивности, вывод реактора на заданный уровень мощности и поддержание ее на заданном уровне, а также автоматическое снижение мощности осуществлялось комплексом АСУЗ-12Р.

В процессе энергетического пуска реактора была изменена логика управления блоками КО при появлении сигнала АЗ: принудительный вывод блоков КО при появлении сигнала аварийной защиты с помощью шаговых двигателей с увеличенной частотой вращения.

В табл. 11 представлены данные по времени перемещения рабочих органов АЗ и КО по сигналу аварийной защиты после изменения логики управления этих блоков.

Практически более 90 % эффективности блока АЗ-1 (АЗ-2) выводится за 0,3 с. Значения параметров быстрой реакции АЗ соответствуют требова-

**Таблица 11. Время перемещения рабочих органов аварийной защиты (АЗ) и органов регулирования (КО, РР и АР) по сигналу аварийной защиты**

Уровень мощности, кВт	Время перемещения рабочего органа, с / скорость перемещения, мм/с					
	АЗ-1	АЗ-2	КО-1	КО-2	РР	АР
1000	0,29	0,29	6,2/40,5	10/40,5	6,3/22	5,3/28
1000	0,29	0,3	6,5/40,5	10/40,5	8,7/22	4,5/28
1500	0,3	0,3	6,5/40,5	10/40,5	8,4/22	4,8/28
2000	0,29	0,29	6,6/40,5	10/40,5	10,4/22	5,7/28

ниям ядерной безопасности и подтверждают значения, полученные на этапе физического пуска реактора.

В процессе энергетического пуска реактора был рассмотрен один из важных элементов безопасности ИБР-2М — это надежный контроль вибрационного состояния модулятора реактивности (ПО-3). Оперативный контроль вибрационного состояния ПО-3 осуществляется в настоящее время с помощью шести акселерометров в частотном диапазоне от 2 Гц до 10 кГц. Для компенсации влияния нейтронной вспышки на показания акселерометров в вертикальные каналы защитного бетонного массива на уровне активной зоны установлены три компенсационных акселерометра, идентичных штатным. Сбор данных ведется с помощью аппаратуры вибромониторинга промышленного оборудования Opero D (Avera, Франция) с контроллером MVX-320-Pre-32 с последующей обработкой с помощью программы XPR-300 с пакетом Vib-Graph. Данный комплекс является автоматизированной системой вибродиагностики ПО-3 с возможностью проведения измерений одновременно по 32 каналам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты энергетического пуска реактора ИБР-2М в режиме 5 Гц на мощности до 2 МВт включительно показали следующее.

- За время энергетического пуска реактор отработал на мощности 0,5–2,0 МВт 1000 ч и выработал энергию 55 МВт·сут. Оперативный запас реактивности на 28.10.2011 г. составил 0,56 %.

- Реактор и его технологические системы работали надежно.

- Новая автоматизированная система управления и защиты надежно выполняет все свои функции. Быстродействие и эффективность аварийной защиты соответствует проектным требованиям и позволяет надежно снизить мощность по сигналу аварийной защиты до безопасного уровня за время между импульсами.

- Быстрый мощный, расходный и изотермический коэффициенты реактивности отрицательны на всех уровнях мощности и расходах натрия через активную зону. На номинальной мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону 100 м<sup>3</sup>/ч мощный —  $-0,45 \beta_{эф}/\text{МВт}$ , расходный —  $-0,4 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/(\text{м}^3/\text{ч})$ , изотермический —  $-(0,012 \pm 0,001) \beta_{эф}/^\circ\text{C}$ .

- Флуктуации энергии импульсов достаточно малы и на мощности 2 МВт составляют: среднеквадратические  $(5,9 \pm 0,4) \%$ , максимальные  $(39 \pm 5) \%$ . Спектры колебаний не зависят от средней мощности и расхода натрия и практически полностью определяются осевыми колебаниями лопастей подвижных отражателей.

• Длительность нейтронного импульса на половине высоты равна  $(200 \pm 4)$  мкс (для ИБР-2 с ПО-3 в 2004 г. этот параметр был равен  $(245 \pm 4)$  мкс). Импульсная мощность равна 1830 МВт, мощность фона — 8,6 % от средней мощности.

Авторы выражают благодарность персоналу установки ИБР-2 за помощь в проведении большого количества экспериментов и признательны А. В. Белушкину за поддержку этой работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В. Д. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012.
2. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Исследование эффектов реактивности подвижных отражателей реактора ИБР-2 в динамике. Сообщение ОИЯИ Р13-2005-184. Дубна, 2005.
3. *Ананьев В. Д. и др.* Пуск и исследование основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа. Сообщение ОИЯИ Р13-2004-156. Дубна, 2004.

Получено 16 апреля 2012 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 28.06.2012.

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

Усл. печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 2,1. Тираж 275 экз. Заказ № 57693.

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/)