

P13-2008-1

Ли Ен Чхан, Ю. Н. Пепельшев

**ИЗМЕНЕНИЕ БЫСТРЫХ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ  
В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ РЕАКТОРА ИБР-2**

Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.

P13-2008-1

Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2

Проведено исследование зависимости основных быстрых эффектов реактивности реактора ИБР-2 (изотермического, расходного и эффекта быстрой мощностной обратной связи) от энерговыработки. Показано, что основные колебания реактивности корреляционно связаны со случайным изменением температуры натрия. Модуль изотермического коэффициента реактивности слабо растет с энерговыработкой (на 20% за всю кампанию реактора). Быстрый мощностной коэффициент реактивности к концу эксплуатации реактора уменьшился практически в шесть раз, от  $-12 \beta_{и}/\text{МВт}$  (1982 г.) до  $-2 \beta_{и}/\text{МВт}$  (2006 г.), и он имеет сложную зависимость от энерговыработки. Показано, что колебания расхода натрия через активную зону малы и слабо влияют на случайное изменение реактивности. Полный натриевый расходный эффект реактивности практически не меняется с энерговыработкой.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Li Yong Chan, Pelyolyshev Yu. N.

P13-2008-1

The Change of Fast Reactivity Effects in the Operation of the IBR-2 Pulsed Reactor

The investigation of the dependence of main fast reactivity effects of the IBR-2 pulsed reactor, i.e. isothermal effect, flow effect and effect of fast power feedback, on the energy production has been carried out. It has been shown that the main fluctuations of reactivity are correlated with the random change of the temperature of sodium. The absolute isothermal coefficient of reactivity weakly increases with the power production (by 20% during the whole operation time of the reactor). The fast power reactivity coefficient has decreased practically by a factor of 6 from  $-12 \beta_p/\text{MW}$  (in 1982, the start-up of the reactor) to  $-2 \beta_p/\text{MW}$  (in 2006, the stop of operation) and has a complicated dependence on the energy production. It has been shown that the flow fluctuation of coolant sodium through the core is small and influences weakly the random change of reactivity. The total sodium flow effect does not practically change with the power production.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

## **ВВЕДЕНИЕ**

В процессе нормальной работы ИБР-2 на реактор воздействуют различные эффекты реактивности, которые вызывают соответствующие возмущения мощности. Мощность в среднем поддерживается с помощью системы автоматического регулирования. В идеальном варианте система регулирования должна автоматически обрабатывать воздействие всех эффектов реактивности и удерживать реактор в равновесном критическом состоянии. На практике реализовать полную автоматическую компенсацию изменений реактивности невозможно. Оператор должен периодически вмешиваться в работу системы управления реактора, регулируя реактивность (мощность) с помощью органов регулирования. Физическая природа, временные константы и амплитуда эффектов существенно различаются. Некоторые эффекты не зависят друг от друга и аддитивны, а некоторые имеют более сложные связи между собой. Все это создает чрезвычайно сложную картину изменения реактивности и, соответственно, возмущений мощности. Задача осложняется тем, что основные и постоянно действующие эффекты реактивности, такие, например, как изотермический, расходный, мощностный и эффекты реактивности, связанные с выгоранием топлива, меняются при эксплуатации реактора. Поэтому для обеспечения безопасной и надежной работы реактора необходимо знание характера изменения этих эффектов с энерговыработкой. Если известно изменение быстрых эффектов, то можно определить и тенденции в изменении медленных эффектов. Соответственно, появляется возможность более точного диагностирования текущего состояния реактора и прогнозирования его работы на несколько циклов вперед. Кроме того, знание изменения параметров основных эффектов реактивности позволяет яснее понять природу физических процессов в активной зоне.

В работе рассмотрен характер изменения основных постоянно действующих быстрых эффектов реактивности: изотермического, расходного и эффекта быстрой мощностной обратной связи в период с 1982 и по 2006 г.

## 1. БЫСТРЫЕ ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ИБР-2. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Поскольку понятия «быстрые» или «медленные» эффекты реактивности в реакторе ИБР-2 достаточно условны, рассмотрим это обстоятельство более подробно. Все многообразие эффектов реактивности вне зависимости от их физической природы можно разделить на три группы по степени их отработки системой автоматического регулирования.

- К первой группе можно отнести эффекты, спектральный состав которых превышает граничную частоту пропускания системы автоматического регулирования  $f > 1$  Гц. Для эффектов этой группы система автоматического регулирования полностью «прозрачна».
- Вторую группу составляют быстрые эффекты реактивности, временные константы которых находятся как в зоне действия системы автоматического регулирования, так и вне ее. Система автоматического регулирования частично обрабатывает эти эффекты, частично нет.
- Третья группа — медленные эффекты, частотный диапазон которых находится в зоне действия системы автоматического регулирования ( $f < 0,1$  Гц). Временные константы медленных эффектов составляют часы–сутки. Система автоматического регулирования надежно обрабатывает эти эффекты.

Эффекты первой группы вызваны случайными шумами реактивности от вибраций подвижных отражателей и топливных кассет, флуктуаций температуры и расхода натрия и т. д. Эта группа шумов характеризуется большой частотой их появления (от 1 Гц до  $\sim 2$  кГц) и достаточно высокой амплитудой. Шумы реактивности в этом частотном диапазоне вызывают случайные колебания энергии импульсов мощности, контролируемые только системой защиты реактора.

Эффекты второй группы (быстрые эффекты реактивности) имеют две или более компоненты, одна из которых практически мгновенная (действует в интервалах времени, сравнимых с периодом повторения импульсов мощности), другие компоненты имеют временные константы менее 1–2 мин. С точки зрения эксплуатации реактора это наиболее сложные эффекты, во многом определяющие условия стабильной и безопасной работы реактора. Для компенсации таких эффектов оператору приходится часто вмешиваться в процесс регулирования.

Третья группа эффектов реактивности (медленные эффекты реактивности) надежно и полностью обрабатывается системой автоматического регулирования мощности. Оператор может прогнозировать свое участие в процессе регулирования.

В работе рассматриваются основные и постоянно действующие быстрые эффекты второй группы, такие как изотермический, мощный и эффект расхода натрия. Ниже даны определения соответствующих быстрых эффектов реактивности.

*Изотермический коэффициент* реактивности определяется как изменение реактивности при равномерном увеличении температуры реактора на один градус при постоянной мощности и расходе  $\frac{d\rho}{dT} = \left. \frac{d\rho}{dT} \right|_{G,W=\text{const}}$ . На практике этот коэффициент отражает влияние температуры натрия на реактивность. В динамическом смысле изотермический коэффициент реактивности состоит из двух компонент. Основная компонента мгновенная (постоянная времени около 0,1 с) отрицательная, вторая — положительная меньшей амплитуды с постоянной времени несколько минут [1]. Асимптотическое изменение реактивности за время 1–2 мин и есть изотермический коэффициент реактивности.

*Мощностный коэффициент* реактивности определяется как установившееся изменение реактивности при единичном изменении мощности реактора при неизменных значениях входной температуры и расхода натрия  $\frac{d\rho}{dW} = \left. \frac{d\rho}{dW} \right|_{G,T=\text{const}}$ . Импульсная характеристика быстрой части мощностного эффекта реактивности ИБР-2 обычно представляется в виде трехэкспоненциальной зависимости с периодами от 0,2 до 12 с. Сумма трех мощностных коэффициентов обратной связи дает быстрый асимптотический коэффициент реактивности.

*Расходный эффект* реактивности определяется как асимптотическое значение реактивности при быстром изменении расхода натрия. Расходный эффект имеет две отрицательные компоненты, одна из которых (гидродинамической природы) определяется как изменение реактивности при изменении расхода при неизменных значениях мощности и температуры натрия. Постоянная времени гидродинамического эффекта реактивности менее 1,5 с [2]. Вторая компонента связана с быстрым мощностным коэффициентом реактивности.

## 2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА С РЕАКТИВНОСТЬЮ

В процессе нормальной работы реактора мощность, температура и расход натрия через активную зону флуктуируют относительно среднего значения. Это обстоятельство позволяет с помощью корреляционного анализа установить степень влияния этих параметров на реактивность и определить

регрессионные зависимости. Воспользуемся квазистационарным уравнением баланса реактивности [3]

$$\rho_{\text{СУЗ}} + \rho_T + \rho_G + \rho_B + \rho_p + \rho_m + \rho_x = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{СУЗ}}$  — реактивность, вводимая органами регулирования;  $\rho_T$  — изотермический эффект реактивности;  $\rho_G$  — расходный эффект реактивности;  $\rho_B$  — эффект, связанный с выгоранием топлива;  $\rho_p$  — быстрая мощностная обратная связь;  $\rho_m$  — медленная мощностная обратная связь;  $\rho_x$  — прочие эффекты реактивности. Уравнение (1) показывает, что в критическом состоянии перемещение регулирующих органов компенсирует все эффекты реактивности. Общее изменение реактивности вычисляется следующим образом:

$$\rho_{\text{СУЗ}} = -\rho_T - \rho_G - \rho_B - \rho_p - \rho_m - \rho_x. \quad (2)$$

Все компоненты реактивности в выражениях (1) и (2) вычисляются относительно значений, взятых в состоянии импульсной критичности анализируемого цикла работы реактора. Общий эффект реактивности от перемещения регулирующих органов относительно первоначальных положений можно представить в виде

$$\rho_{\text{СУЗ}} = \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})]. \quad (3)$$

В соотношении (3)  $k_i(z_i)$  — кривая эффективности  $i$ -го блока регулирования.

Для корреляционного анализа были выбраны 57 реакторных циклов с 1987 по 2006 г., имеющих достаточно длительный интервал времени установившейся в среднем реактивности (более 80 точек измерения). Значения реакторных параметров (положение каждого из четырех органов регулирования, температура натрия на входе и выходе из активной зоны и расход натрия через активную зону) измерялись с помощью штатной системы контроля реакторных параметров. Период опроса составлял 1 ч. По измеренным данным были получены последовательности значений суммарной вводимой реактивности (из уравнения (3)) и тепловой мощности реактора (из перепада температуры и расхода натрия через активную зону). Из кривой изменения общей реактивности в цикле был выбран интервал времени установившегося процесса реактивности длительностью  $\Delta T$  (см. рис. 1). В этом же интервале времени подготовлены соответствующие последовательности значений температуры натрия, расхода и мощности реактора. Далее во всех временных рядах устранялись тренды второй степени, при этом в последовательности значений реактивности устранялись и медленные компоненты  $\rho_B$  и  $\rho_m$ . После устранения тренда из уравнения (2) имеем

$$\Delta\rho_{\text{СУЗ}} = -\Delta\rho_T - \Delta\rho_G - \Delta\rho_p - \Delta\rho_x. \quad (4)$$

Соотношение (4) показывает изменение реактивности, вызванное случайным изменением мощности, температуры и расхода натрия.

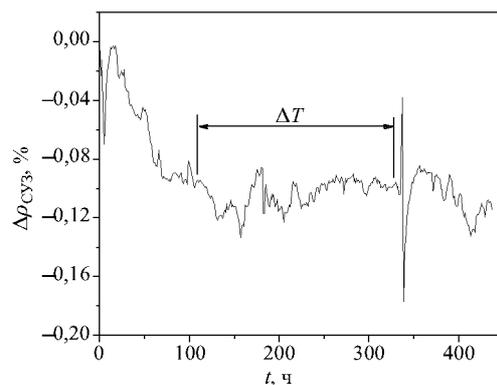


Рис. 1. Изменение реактивности, вычисленной из выражения (2), в течение одного из циклов работы реактора (ноябрь 1987 г.). Корреляционный анализ проводился в интервале времени  $\Delta T$

В процессе анализа вычислялись коэффициенты корреляции с проверкой гипотезы о наличии корреляционных связей температуры, расхода и мощности с реактивностью. Было установлено, что четкая корреляционная связь с реактивностью наблюдается только для колебаний температуры натрия на входе в активную зону. Корреляция флуктуаций расхода натрия с реактивностью проявляется в гораздо меньшей степени. Это объясняется двумя причинами: во-первых, колебания расхода в нормальных условиях эксплуатации реактора малы, во-вторых, сам натриевый эффект при малых изменениях расхода мал. Корреляция медленных колебаний мощности с реактивностью практически незаметна, поскольку мощность поддерживается системой автоматического регулирования на достаточно стабильном уровне. Ниже каждый из указанных эффектов рассмотрен более подробно.

### 3. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ

Наличие тесной корреляционной связи между температурой натрия на входе в активную зону и реактивностью позволяет качественно оценить изотермический коэффициент реактивности. Для этого воспользуемся методом регрессионного анализа. На рис. 2 показано типичное изменение реактивности при случайном изменении входной температуры натрия для одного из реакторных циклов. На рис. 3 приведена зависимость вычисленных в каждом из 57 реакторных циклов значений изотермического коэффициента от энерговыработки.

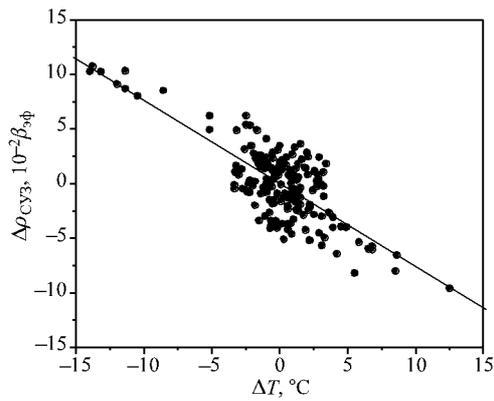


Рис. 2. Корреляция температуры натрия на входе в активную зону с реактивностью (ноябрь 1987 г.)

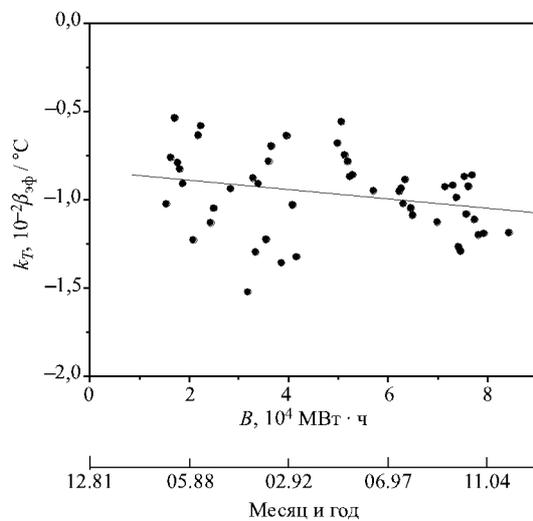


Рис. 3. Изменение изотермического коэффициента реактивности в зависимости от энерговыработки по данным регрессионного анализа

По данным регрессионного анализа среднее значение изотермического коэффициента в начале эксплуатации реактора равно  $-0,85 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$ , а в конце эксплуатации в 2006 г. изотермический коэффициент увеличился по модулю до  $1,1 \cdot 10^{-2} \pm 0,102 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$  (на  $0,25 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$ ). Как видно из рис. 3, регрессионный анализ при множестве факторов, влияющих на реактивность, дает в оценке изотермического коэффициента большую погрешность. По данным регрессионного анализа можно лишь утверждать, что

модуль изотермического коэффициента растет с энерговыработкой. Измеренный во время энергетического пуска реактора изотермический коэффициент реактивности был равен  $-1 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$  [1, 5]. В последующих измерениях в начале эксплуатации реактора изотермический коэффициент оставался неизменным. Поскольку по данным регрессионного анализа видна тенденция к росту изотермического коэффициента с энерговыработкой, в конце 2006 г. был проведен дополнительный независимый эксперимент. Значение изотермического коэффициента оказалось равным  $-1,2 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$  (увеличение составило  $0,2 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$ ), что совпадает с результатом регрессионного анализа.

Учитывая, что за кампанию 1982–2006 гг. изотермический коэффициент изменился незначительно, можно считать это изменение линейным:

$$k_T = -(1 + 2,33 \cdot 10^{-6} B), \quad 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}, \quad (5)$$

где  $B$  — энерговыработка (МВт · ч). Увеличение изотермического коэффициента реактивности в зависимости от энерговыработки, вероятнее всего, связано с частичным сцеплением топлива с оболочкой твэла. Этот эффект вызывается тем, что линейное расширение стали выше по сравнению с топливом (двуокись плутония).

#### 4. РАСХОДНЫЙ ЭФФЕКТ РЕАКТИВНОСТИ

Отмеченная выше процедура корреляционного анализа, выполненная для расхода натрия, показала слабую корреляцию между расходом и реактивностью. При малых изменениях расхода температурный эффект реактивности, вызванный случайным изменением температуры натрия, проявляет себя сильнее гидродинамического эффекта. На фоне сильной связи температуры с реактивностью при большой взаимной спектральной плотности их колебаний корреляция слабых переменных может быть незаметной. Поэтому из общей реактивности была удалена компонента температурного эффекта, после чего вновь определялась корреляция расхода с реактивностью. Даже при таком достаточно полном выделении расходной компоненты реактивности влияние расхода на реактивность оказалось слабым. В процессе энергетического пуска реактора ИБР-2 было получено выражение для расходного эффекта реактивности [5]:

$$\rho_G = k_{G1}(G^2 - G_0^2) - k_{G2}Q^2(1/G_0 - 1/G), \quad (6)$$

где  $G$  — суммарный расход натрия в первом контуре ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );  $Q$  — мощность реактора (МВт);  $k_{G1} = 2,4 \cdot 10^{-6} \%/(\text{м}^3/\text{ч})^2$ ,  $k_{G2} = (4,8 - 8) \% (\text{м}^3/\text{ч})/\text{МВт}^2$ . Оценим расходный эффект по изменению расхода и мощности в цикле.

Обычно расход натрия в цикле колеблется относительно среднего значения в пределах  $\pm 3$  м<sup>3</sup>/ч. Вычисленный из (6) расходный эффект реактивности изменяется в пределах  $\pm(2-5) \cdot 10^{-3}$ %. По температурному эквиваленту указанное изменение реактивности составляет 1–2 °С, в то время как полные колебания температуры натрия на входе в активную зону в среднем равны 5 °С. В итоге в колебаниях реактивности компонента расходного эффекта в 2,5–5 раз меньше температурного. Это полностью совпадает с результатами корреляционного анализа.

При исследовании баланса реактивности расходный эффект можно оценивать с помощью формулы (6). При этом коэффициент  $k_{G2}$  принимается равным среднему значению 6,4 % (м<sup>3</sup>/ч)/МВт<sup>2</sup>. При таком значении  $k_{G2}$  расчетные данные по формуле (6) совпадают с данными корреляционного анализа. В целом, анализ по всем 57 выделенным реакторным циклам показал, что расходный эффект не меняется с энерговыработкой, или же его изменение мало и находится в пределах погрешности измерений.

## 5. БЫСТРЫЙ МОЩНОСТНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ

Коэффициент реактивности быстрой мощностной обратной связи невозможно определить по данным штатной системы контроля и управления реактора, поскольку частота их опроса составляет 1 ч. Характер изменения быстрого мощностного эффекта в зависимости от энерговыработки был по-

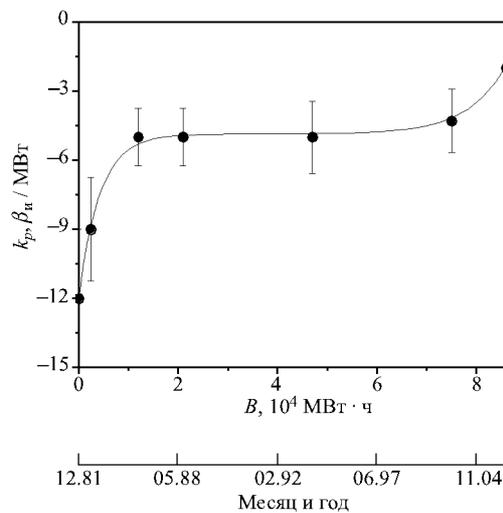


Рис. 4. Коэффициент быстрой мощностной обратной связи ( $k_p$ ) в зависимости от энерговыработки ( $B$ )

лучен из анализа всей совокупности результатов ранее проведенных экспериментов. Дополнительно быстрый мощный коэффициент был измерен в конце эксплуатации реактора в трех последних циклах 2006 г. Анализ показал, что модуль быстрого мощного коэффициента  $k_p$  в процессе работы реактора уменьшается [4], поэтому каждому реакторному циклу соответствует свой коэффициент передачи. В таблице представлены значения  $k_p$  на различных этапах эксплуатации реактора [1, 2, 4, 5], а на рис. 4 показано изменение быстрого мощного коэффициента реактивности в зависимости от энерговыработки.

Большой разброс значений быстрого мощного коэффициента реактивности относительно среднего в большей степени связан с нестабильностью быстрой мощной связи. Функция, аппроксимирующая экспериментальные точки на рис. 4, имеет вид

$$k_p = 0,6229 \cdot \exp\left(\frac{B - 74140}{7547}\right) - 7,194 \cdot \exp\left(-\frac{B}{4243}\right) - 4,868, \quad \beta_n. \quad (7)$$

Диапазон действия формулы (7) от  $\sim 0$  до 87 400 МВт·ч.

**Экспериментальные данные по быстрому мощному коэффициенту реактивности  $k_p$ .  $\beta_n = 1,6 \cdot 10^{-4}$  — импульсная доля запаздывающих нейтронов**

Дата (цикл)	Энерговыработка, МВт·ч	$k_p, \beta_n/\text{МВт}$
Декабрь 1981 г.	$\sim 0$	-13 (расчетная оценка)
Январь 1982 г.	10	-12
Июнь 1983 г.	2 500	-9
Январь 1987 г.	12 000	-5
Октябрь 1988 г.	21 000	-5
Июнь 1993 г.	47 500	-5
Февраль 2002 г.	75 000	-4,3
Октябрь 2006 г.	86 000	-2

Из таблицы и рис. 4 видно, что в начале работы реактора модуль быстрого мощного коэффициента реактивности довольно резко уменьшается, затем после энерговыработки 12 000 МВт·ч (январь 1987 г.) становится практически постоянным,  $-5 \beta_n/\text{МВт}$ , вплоть до энерговыработки 47 500 МВт·ч (июнь 1997 г.). Далее модуль мощного коэффициента реактивности вновь начинает уменьшаться. К концу работы реактора в 2006 г. коэффициент быстрой мощной обратной связи уменьшился приблизительно в шесть раз. Последнее уменьшение указывает на возможность дополнительных структурных изменений в активной зоне. Как уже отмечалось выше, импульсную характеристику быстрого мощного эффекта реактивности можно представить в виде трехэкспоненциальной зависимости, каждая компонента которой

обусловлена своей физической природой. К сожалению, из экспериментальных данных было невозможно выделить доминирующее изменение той или иной компоненты в зависимости от энерговыработки.

## ВЫВОДЫ

При нормальной работе реактора ИБР-2 с номинальной мощностью 1,5–2 МВт среди основных оперативных параметров реактора, вызывающих быстрые эффекты реактивности, таких как температура натрия на входе в активную зону, расход натрия и мощность реактора, только температура натрия вызывает наибольшие колебания реактивности. Колебания расхода и мощности слабо влияют на реактивность, поскольку эти параметры удерживаются на сравнительно стабильном уровне. Коэффициенты быстрых эффектов реактивности по-разному меняются с энерговыделением. Изотермический коэффициент изменяется от  $-1,0 \cdot 10^{-2}$  (1982 г.) до  $-1,2 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$  (2006 г.) и может быть выражен линейной функцией от энерговыработки. Коэффициент реактивности быстрой мощностной обратной связи к концу эксплуатации реактора уменьшается приблизительно в шесть раз от  $-12$  (1984 г.) до  $-2 \beta_{и}/\text{МВт}$  (2006 г.). Расходный эффект реактивности в процессе всей эксплуатации реактора в среднем проявляет себя в три раза слабее температурного эффекта. Изменение расходного эффекта с энерговыработкой не обнаружено.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетический пуск реактора ИБР-2. Второй этап. Промежуточный отчет. Дубна, 1982.
2. Результаты первого этапа энергетического пуска реактора ИБР-2. Дубна, 1981.
3. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.* Модель динамики мощностной обратной связи реактора ИБР-2 с учетом медленных составляющих. Препринт ОИЯИ Р13-2007-150. Дубна, 2007.
4. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при различных уровнях средней мощности. Препринт ОИЯИ Р13-2006-101. Дубна, 2006.
5. Отчет по обоснованию безопасности исследовательского импульсного реактора ИБР-2, ОИЯИ, ЛНФ. Дубна, 2000.

Получено 16 января 2008 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 14.04.2008.

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

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,97. Тираж 305 экз. Заказ № 56143.

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/)