

P13-2009-119

Ли Ен Чхан, Ю. Н. Пепельшев

**ДИНАМИКА ИБР-2 ПРИ НАЛИЧИИ  
СБРОСОВ МОЩНОСТИ**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

С помощью моделирования динамики ИБР-2 рассмотрено влияние сбросов мощности, имеющих место в ходе эксплуатации реактора, на изменение реактивности мощностной обратной связи.

Расчеты показали, что при наличии сбросов мощности форма кривой реактивности сложным образом зависит от момента сброса относительно начала реакторного цикла, от времени останова реактора после сброса, а также от числа сбросов в реакторном цикле.

Показано, что эффекты реактивности от сброса мощности действуют в течение двух суток после сброса мощности, далее этими эффектами можно пренебречь. Полное изменение реактивности после сброса мощности может составлять от  $+0,12$  до  $-0,05 \% \Delta k/k$ .

В большинстве практических случаев на кривой реактивности после сброса мощности формируется область отрицательной реактивности («яма»), длительность и глубина которой зависят от времени останова реактора после сброса, а также от момента сброса относительно начала цикла. Глубина «ямы» может достигать  $-0,05 \% \Delta k/k$ , а длительность может изменяться от нескольких часов до нескольких десятков часов.

Знание изменения реактивности после сброса мощности позволяет уточнить последствия различных аварийных ситуаций, а также прогнозировать состояние реактора в помощь оператору при повторном выводе реактора на мощность.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.  
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

The influence of shut-down during the operation on the power feedback reactivity change with the dynamics of the IBR-2 fast pulsed reactor has been considered.

The investigation result has shown that shapes of reactivity curves are related to the time from the beginning of the reactor cycle, to the duration after the shut-down, and to the number of shut-down events during the cycle of the reactor.

It has been shown that the reactivity effects due to the shut-down appeared during 2 days after the shut-down and after then disappeared. Total reactivities after the shut-down events vary between  $+0.12$  and  $-0.05 \% \Delta k/k$ .

In many practical cases, the negative range on reactivity curves («pit») after the shut-down events is formed and its duration and depth are related to the operation time after the shut-down and to the moment of the shut-down from the beginning of the reactor cycle. The depth of «pit» may reach  $0.05 \% \Delta k/k$  and its duration varies between a few hours and several tens of hours.

The knowledge of the reactivity change after the shut-down allows the consequence of various accidental situations to be explained and the operator to foresightly predict the reactor state during the following power operation.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

## **ВВЕДЕНИЕ**

В процессе исследования реактора ИБР-2 было отмечено, что сбросы мощности, имеющие место в ходе эксплуатации реактора, существенно влияют на баланс реактивности и, соответственно, на характер повторного вывода реактора на мощность и ее поддержание на заданном уровне. За все время эксплуатации ИБР-2 с 1984 по 2006 г. среднее число сбросов мощности за отдельный реакторный цикл ( $\sim 250$  ч непрерывной работы на мощности с последующим двухнедельным перерывом) составило 2,27.

Резкое падение мощности практически до нуля за время менее секунды вызывает сложное изменение реактивности, обусловленное действием мощностной обратной связи. Ход реактивности после сброса мощности ИБР-2 реализуется таким образом, что при повторном запуске реактора состояние критичности может отличаться от критичности до сброса.

Понимание динамики ИБР-2 при наличии сбросов мощности имеет важное значение как с точки зрения ядерной безопасности, так и с точки зрения эксплуатации реактора. В первом случае знание хода реактивности после сброса мощности позволяет уточнить последствия различных аварийных ситуаций, во втором случае — прогнозировать состояние реактора в помощь оператору при повторном выводе реактора на мощность.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ХОДА РЕАКТИВНОСТИ ПРИ СБРОСЕ МОЩНОСТИ**

Известно, что динамика мощностной обратной связи реактора ИБР-2 определяется тремя звеньями: одно звено — практически безынерционное (постоянные времени 0,2–10 с), отражает характер быстрой связи, второе — инерционное звено положительной обратной связи с постоянной времени 2,5 ч, третье — инерционное звено отрицательной обратной связи с постоянной времени 92 ч [1]. В данном случае инерционностью быстрой мощностной обратной связи можно пренебречь, поскольку ее временные константы значительно меньше анализируемых интервалов времени. Каждое из медленных звеньев (второе и третье) имеют две постоянных времени, нарастания и убывания. При изучении хода реактивности после сброса мощности использовались

экспериментальные данные о параметрах мощностной обратной связи. Значения параметров представлены в таблице. Эти данные соответствуют периоду работы ИБР-2 с 1987 по 2000 г. [2]. Средний уровень мощности принимался равным номинальному 1,5 МВт, а время, необходимое для достижения при пуске реактора номинальной мощности, считалось равным двум часам, что соответствовало штатному линейному режиму подъема мощности.

**Значения параметров динамических звеньев мощностной обратной связи ИБР-2**

Номер звена	Коэффициент передачи $k$ , %/МВт	Постоянная времени нарастания $T_n$ , ч	Постоянная времени убывания $T_y$ , ч
1	-0,080	—	—
2	0,119	2,54	2,33
3	-0,0657	92	14,1

В общем случае в расчетах учитывалась зависимость коэффициента передачи быстрой мощностной обратной связи от энерговыработки [2]; коэффициенты передачи медленных компонентов обратной связи от энерговыработки не зависят [3].

Как будет показано ниже, наиболее существенную роль в формировании хода реактивности, вызванного сбросом мощности, имеют медленные компоненты динамики реактора. Физическая природа медленной мощностной обратной связи в данной работе не рассматривается. Используется некоторая математическая модель динамики, наиболее адекватно описывающая переходные процессы изменения мощности. Медленные компоненты динамики, вероятнее всего, связаны с термомеханическими деформациями корпуса реактора и, частично, с процессами миграции воды при нагреве радиационной защиты реактора [3, 4].

В модели динамики мощностной обратной связи каждое  $i$ -е инерционное звено выражается следующим дифференциальным уравнением

$$T_i \frac{d\rho_i(t)}{dt} + \rho_i(t) = k_i P(t), \quad (1)$$

где  $\rho_i$  — реактивность (выходной сигнал);  $P$  — мощность или отклонение мощности от исходного базового уровня (входной сигнал);  $T_i$  — постоянная времени;  $k_i$  — коэффициент передачи;  $i$  — номер звена. Для  $T_i$  используются два значения: при подъеме мощности  $T_{ni}$ , при снижении —  $T_{yi}$ .

Кривая полного мощностного эффекта получается суммированием выходных сигналов каждого звена. Поэтому можно рассмотреть аналитические решения дифференциального уравнения (1) для следующих трех характерных случаев:

- при линейном подъеме мощности

$$\rho_i(t) = (\rho_{0i} + k_i P_0 T_i / \tau) \exp[-(t - t_0) / T_i] - k_i P_0 [T_i - (t - t_0)] / \tau, \quad t > t_0; \quad (2)$$

- при постоянной мощности

$$\rho_i = \rho_{0i} \exp[-(t - t_0) / T_i] + k_i P_0 \{1 - \exp[-(t - t_0) / T_i]\}; \quad (3)$$

- при сбросе мощности

$$\rho_i(t) = \rho_{0i} \exp[-(t - t_0) / (T_{yi})], \quad t > t_0, \quad (4)$$

где  $t_0$  — момент события (начало подъема, момент достижения постоянной мощности или момент сброса мощности),  $\rho_{0i}$  —  $i$ -я компонента реактивности в момент  $t_0$ ;  $P_0$  — номинальная мощность или отклонение мощности от исходного базового уровня;  $\tau$  — время, необходимое для подъема мощности от нуля до номинального.

В общем случае каждый реакторный цикл состоит из серии чередующихся событий подъема мощности, работы на мощности, сброса, подъема и снижения мощности. С использованием (2)–(4) можно получить  $i$ -ю компоненту изменения мощностного эффекта реактивности для цикла с любым числом сбросов. Общий мощностный эффект вычисляется следующим образом:

$$\rho(t) = \sum_{i=1}^3 \rho_i(t). \quad (5)$$

Рассмотрим реакторный цикл с одним сбросом мощности. На рис. 1 представлена кривая, изображающая изменение реактивности в реакторном цикле при сбросе мощности, происшедшем в момент времени 200 ч от начала цикла. Момент времени сброса в данном случае выбран произвольно. Жирная линия на рис. 1 показывает изменение реактивности обратной связи при отсутствии сброса мощности.

Для удобства дальнейшего изложения и понимания сути проблемы отметим, что жирная линия на рис. 1 соответствует типичному изменению мощностной обратной связи ИБР-2 в процессе нормальной работы реактора. Эта кривая может быть получена экспериментально, например, из анализа баланса реактивности [1]. При работе на мощности реактор находится в критическом равновесном состоянии (реактивность равна нулю), а все компоненты обратной связи обрабатываются системой автоматического регулирования мощности.

При сбросе мощности реактивность, как видно из рис.1, не спадает сразу до нуля, а сложным образом меняется и только примерно через двое суток асимптотически приближается к нулю. В отдельные моменты времени реактивность может быть как отрицательной, так и положительной.

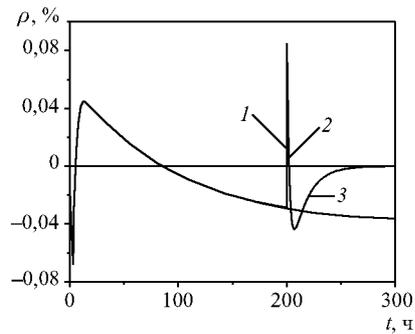


Рис. 1. Изменение реактивности обратнй связи в цикле при сбросе мощности в зависимости от времени: 1 — быстрая обратная связь; 2 — действие медленной положительной компоненты обратной связи; 3 — действие самого медленного звена обратной связи. Жирной линией обозначен ход реактивности обратнй связи без сброса мощности

Поскольку нейтронная мощность после сброса практически равна нулю, указанные эффекты реактивности могут быть определены только расчетным путем. Эффект реактивности от сброса мощности потенциально опасен тем, что это есть скрытая и довольно значительная реактивность, которая проявляется только при повторном выводе реактора на мощность. При сбросе мощности реактивность за счет безынерционной компоненты обратной связи повышается скачком на  $k \cdot P$ . На рис. 1 этот отрезок отмечен как линия 1. Кривая 2 отражает уменьшение реактивности за счет действия второй компоненты. Этот процесс завершается через 7–8 ч после сброса. Далее начинает доминировать относительно длинный процесс изменения реактивности, определяемый самой медленной компонентой обратной связи (кривая 3). Все эффекты реактивности от сброса мощности через двое суток становятся пренебрежимо малыми. Поэтому последствия единичного сброса мощности целесообразно рассматривать в интервале времени менее 50 ч. Отсюда, например, следует, что если не учитывать эффект выгорания за цикл ввиду его малости, то при повторном запуске реактора через двое и более суток после сброса мощности органы регулирования реактора в состоянии критичности будут находиться в том же самом положении, как и в начале цикла.

Необходимо подчеркнуть, что после сброса мощности изменение реактивности идет значительно быстрее, чем при подъеме или поддержании мощности на постоянном уровне (в последних случаях для достижения асимптотического насыщения реактивности требуется примерно две недели). Указанное различие объясняется различием значений постоянных времени нарастания и убывания самой медленной компоненты мощностной обратной связи [1].

Рассмотрим, как меняется реактивность после сброса мощности в зависимости от момента сброса относительно начала реакторного цикла. Модельные исследования показали, что чем раньше от начала цикла наступают

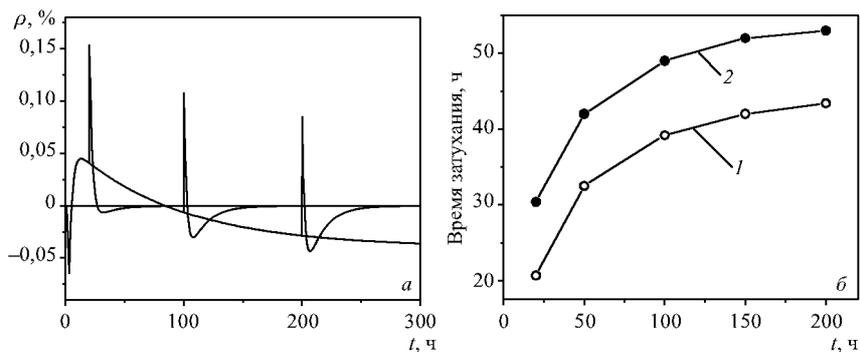


Рис. 2. Изменение реактивности обратной связи при единичном сбросе мощности в разные моменты времени от начала цикла (а) и время затухания эффекта сброса (б). 1 — погрешность 0,004%; 2 — 0,002%. Жирной линией показан ход мощностной обратной связи без сброса мощности

сброс мощности, тем быстрее исчезает эффект реактивности, вызванный этим сбросом. Рис. 2 иллюстрирует этот эффект. На рис. 2, а показаны кривая реактивности мощностной обратной связи в цикле без сброса (основная жирная спадающая линия) и три линии, начинающиеся на этой кривой и асимптотически стремящиеся к нулю. Эти линии характеризуют изменение реактивности после единичного сброса мощности, происходящего в разные моменты времени относительно начала реакторного цикла. На рис. 2, б показана продолжительность действия отрицательной компоненты реактивности в зависимости от момента сброса относительно начала реакторного цикла. Указанное изменение реактивности связано с действием самой медленной компоненты обратной связи и зависит от того, на каком участке исходной кривой обратной связи (положительной или отрицательной) происходит сброс. В начале цикла уже через 8 ч после подъема мощности реактивность, обусловленная действием первой и второй компонент динамики, достигает насыщения, а эффект от действия третьей компоненты динамики только начинает проявляться (увеличиваться). Поэтому при сбросе мощности в начале цикла реактивность быстрее подходит к нулю, чем в конце цикла.

Рассмотрим теперь влияние на реактивность времени останова реактора перед повторным выходом на мощность после сброса. Модельное представление реактивности при сбросе и последующем выводе реактора на мощность рассматривалось только в пределах типичной длительности реакторного цикла, т. е. 300 ч.

Анализ показал, что чем больше время останова реактора после сброса, тем больше отличие хода реактивности от кривой реактивности без сброса мощности (см. рис. 3). Как видно из рис. 3, реактивность после сброса мощ-

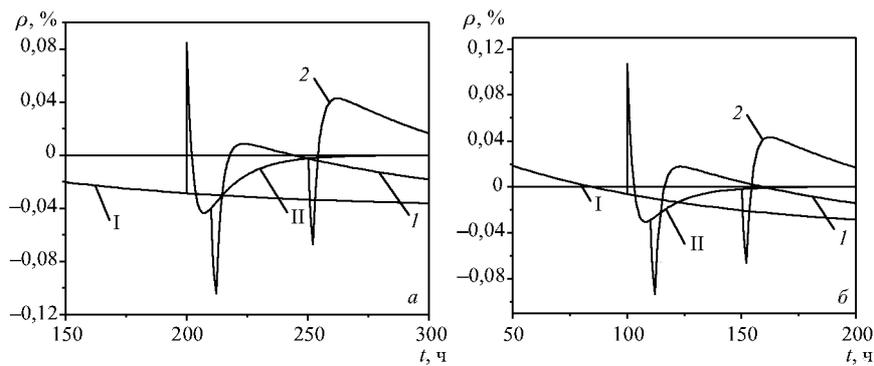


Рис. 3. Изменение реактивности при повторном выводе реактора на мощность после сброса мощности для двух моментов времени сброса относительно начала реакторного цикла: *a* — 200 ч, *б* — 100 ч; I — реактивность мощностной обратной связи без сброса, II — реактивность со сбросом, 1, 2 — время останова реактора после сброса мощности 10 ч и 50 ч соответственно

ности асимптотически стремится к нулю. На эту кривую накладывается изменение реактивности, вызванное подъемом мощности. Непосредственно в процессе подъема реактивность убывает, затем после достижения номинального уровня мощности начинают доминировать положительная и далее отрицательная компоненты обратной связи, в результате чего реактивность асимптотически уменьшается с константой 92 ч. В пределе реактивность устанавливается на некотором новом уровне, отличном от уровня реактивности без сброса мощности.

При этом отклонение реактивности 1, 2 с увеличением продолжительности времени останова реактора от кривой I без сброса мощности нарастает. Кривая 3 (50 ч останова) является верхним пределом изменения реактивности с ростом времени останова. При останове 50 и более часов ход реактивности практически уже не зависит от времени останова.

### ВЛИЯНИЕ СБРОСОВ МОЩНОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ РЕАКТОРА

В разделе рассматривается вопрос о влиянии эффекта реактивности, вызванного сбросом мощности, на характер повторного вывода реактора на мощность.

Эффект реактивности от сброса мощности определим как разность хода реактивности обратной связи, действующей после сброса мощности, и реактивности обратной связи непосредственно перед сбросом. Такое определение позволяет выделить эффект реактивности от сброса мощности в чистом виде.

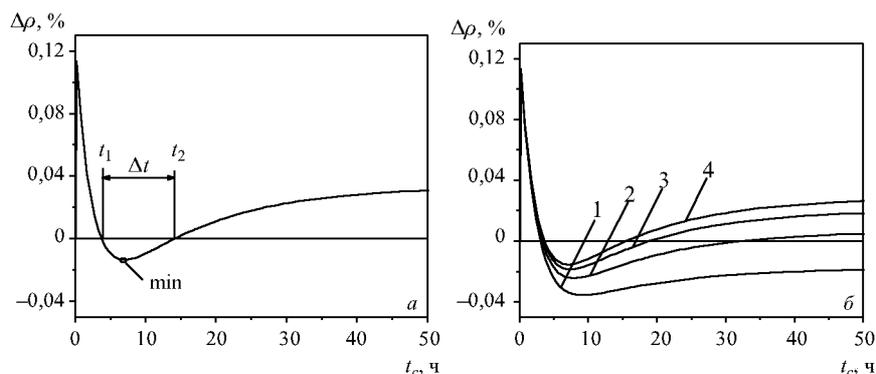


Рис. 4. Процесс формирования «ям» на кривой эффекта реактивности от сброса мощности в зависимости от времени останова реактора после сброса  $t_c$  (а) и изменение «ям» на кривой реактивности после сброса при сдвиге момента сброса от начала цикла (б): 1 — 50 ч; 2 — 100 ч; 3 — 150 ч; 4 — 200 ч

Также отметим следующее свойство этого эффекта: эффект реактивности от сброса мощности в процессе кампании ИБР-2 сохраняется неизменным. Объясняется это тем, что быстрая обратная связь при сбросе мощности не влияет на форму изменения реактивности, поскольку при изменении коэффициента быстрой связи кривая реактивности просто сдвигается вдоль ее оси. С другой стороны, значения параметров медленных звеньев мощностной обратной связи в среднем не зависят от энерговыработки [3]. Из вышесказанного следует, что форма кривой реактивности от сброса мощности в основном зависит только от момента сброса в цикле, времени останова реактора после сброса и числа сбросов в цикле.

Рассмотрим эффект реактивности от сброса мощности более детально (см. рис. 4). В момент сброса реактивность меняется скачком, затем сравнительно быстро снижается и в момент  $t_1$  переходит нулевую линию. После насыщения реактивности, определяемой вторым звеном обратной связи, начинается ее медленный рост, и в некоторый момент времени  $t_2$  реактивность вновь переходит нулевую линию. Таким образом, после сброса мощности на кривой эффекта реактивности формируется «яма» длительностью  $\Delta t$ . Если в рассматриваемом интервале времени другие эффекты (например, температурный эффект натрия) не меняются или компенсируются, то реактор будет находиться в состоянии отрицательной реактивности относительно реактивности обратной связи, имеющей место непосредственно перед сбросом мощности. По кривой «ям» оператор может прогнозировать положение органов регулирования при повторном выходе на мощность.

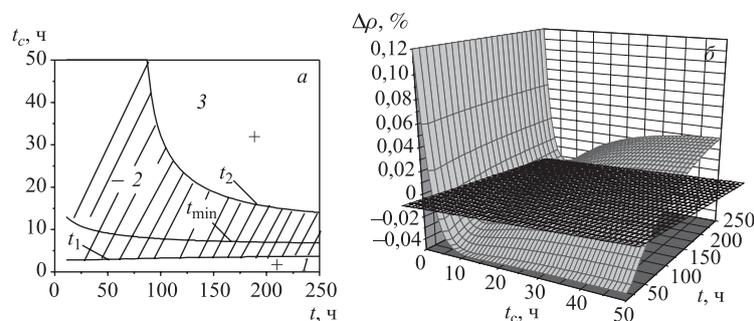


Рис. 5. Карта изменения эффекта реактивности от сброса мощности в зависимости от момента времени сброса относительно начала реакторного цикла  $t$  и времени останова реактора после сброса  $t_c$ . На кривой « $t_{\min}$ » находятся точки минимальных значений реактивности. «+» (1, 3) — области положительных значений реактивности, «-» (2) — область отрицательных значений реактивности

Нужно отметить, что длительность и глубина «ямы» меняются в зависимости от момента сброса относительно начала цикла. Если, например, сброс мощности был в начале цикла, то  $t_2$  может не быть вообще (рис. 4, б; кривая 1). Кроме того, длительность «ямы» уменьшается, если момент сброса наступает позже.

По серии кривых, представленных на рис. 4, б, можно составить карту изменения реактивности после сброса мощности (см. рис. 5). На рис. 5, а область, обозначенная знаком «-», есть область «ямы». В области «+» критичность при повторном выходе на мощность наступает раньше, чем при выходе на мощность в начале цикла. Заметим, что в области 1 реактивность меняется очень быстро.

## ВЫВОДЫ

Анализ показал, что динамика реактора при сбросах мощности существенно отличается от динамики при отсутствии сбросов. Это различие связано со сложным характером мощностной обратной связи ИБР-2.

При наличии сбросов мощности форма кривой реактивности обратной связи зависит от момента времени сброса относительно начала реакторного цикла, времени останова реактора после сброса и от числа сбросов в цикле. При этом чем больше время останова реактора после сброса, тем сильнее ход реактивности отклоняется от реактивности без сброса.

В большинстве практических случаев на кривой эффекта реактивности после сброса мощности формируется область отрицательной реактивности

(«яма»), длительность и глубина которой зависят от времени останова реактора после сброса и от момента сброса относительно начала цикла. Длительность «ямы» уменьшается, если момент сброса наступает позже. По кривой «ямы» при повторном выводе реактора на мощность оператор может прогнозировать критическое положение органов регулирования, что повышает безопасность эксплуатации реактора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.* Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-1. Дубна, 2008.
3. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.* Случайный характер динамики медленной мощностной обратной связи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-178. Дубна, 2008.
4. *Пепельшев Ю. Н., Чжан Чан Мин* Влияние температуры радиационной защиты на реактивность ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2009-43. Дубна, 2009.

Получено 5 августа 2009 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 09.09.2009.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,91. Тираж 305 экз. Заказ № 56703.

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/)