

P13-2010-21

Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов

**ПРЕДЕЛЫ БЕЗОПАСНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ  
ВНЕШНЕЙ РЕАКТИВНОСТИ ИБР-2**

Направлено в журнал «Annals of Nuclear Energy»

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.

P13-2010-21

Пределы безопасных возмущений внешней реактивности ИБР-2

Для импульсного реактора ИБР-2 путем моделирования динамики реактора определены границы безопасных возмущений реактивности. Показано, что в процессе работы реактора происходит непрерывное сужение области допустимых возмущений реактивности при наличии существенных флуктуаций ее границы. Для некоторых видов возмущений реактивности граница безопасности за 20 лет эксплуатации реактора сократилась более чем в 3 раза. Сокращение области допустимых флуктуаций реактивности связано с постепенным ослаблением быстрой мощностной обратной связи. Показано, что наиболее вероятная причина этого явления вызвана ростом положительной компоненты обратной связи за счет изменения термомеханических деформаций тепловыделяющих элементов с энерговыработкой. Отмечено, что даже с учетом непрерывного сужения границы безопасности штатная система автоматического регулирования реактора надежно обеспечивает безопасность реактора.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Pepolyshv Yu. N., Popov A. K.

P13-2010-21

Limits of Safe Perturbations of External Reactivity  
of the IBR-2 Reactor

For the IBR-2 pulsed reactor the limits of safe perturbations of reactivity have been defined by mathematical simulation of the reactor dynamics. It has been shown that during the reactor operation there occurs a continuous narrowing of the region of permissible perturbations of reactivity in the presence of significant fluctuations of its limit. The safety limit for some kinds of reactivity perturbations during 20 years of the reactor operation has decreased by more than 3 times. The reduction of the region of permissible fluctuations of reactivity is connected with a gradual decay of the fast power feedback. It has been demonstrated that the most probable reason for this phenomenon is an increase in the positive component of the feedback due to a change in thermo-mechanical deformations of the fuel elements in the course of energy production. It has been noted that even in view of the continuous narrowing of the safety limit a standard system of automatic control of the reactor reliably ensures its safe operation.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

## **ВВЕДЕНИЕ**

При работе реактора ИБР-2 на него воздействуют различные возмущения реактивности, вызывающие флуктуации энергии импульсов. Нормальное функционирование реактора возможно только при условии, что уровень и скорость введения реактивности находятся в некотором допустимом диапазоне. Вне этого диапазона реактор функционировать не может. Граница диапазона зависит от нейтронно-физических параметров реактора, его способности к саморегулированию, выбора критерия безопасности, работы системы аварийной защиты и от многих других факторов.

Рассматривается расчетно-экспериментальная оценка границы безопасности ИБР-2 на плоскости возмущений внешней реактивности.

## **МЕТОД ОЦЕНКИ ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ РЕАКТИВНОСТИ**

Опыт эксплуатации реактора показал, что в нормальном режиме работы реактора с системой автоматического регулирования мощности ИБР-2 не теряет устойчивости. Поэтому напрямую граница устойчивости на плоскости «уровень–скорость» возмущений реактивности  $\Delta\rho-d\rho/dt$  определена быть не может.

Граница допустимых возмущений реактивности определялась расчетным путем с использованием модели динамики ИБР-2, наиболее адекватно описывающей поведение реактора на разных этапах его эксплуатации [1]. В модели использовались экспериментальные данные о параметрах реактора, определяющих его динамику.

В расчетах рассматривались переходные процессы изменения мощности при варьировании уровня  $\Delta\rho$  и скорости перехода возмущающей реактивности с уровня на уровень  $d\rho/dt$ . Были рассмотрены также скачкообразные переходы с уровня на уровень ( $d\rho/dt = \infty$ ). В переходных процессах мощности, соответствующих приложенным возмущениям реактивности, фиксировался максимальный выброс энергии импульсов.

Граница предельных возмущений реактивности соответствовала появлению в переходных процессах мощности предельного (аварийного) выброса

энергии импульса. Аварийным выбросом мощности для ИБР-2 и ИБР-2М считается 20-кратное превышение амплитуды импульса относительно среднего (базового) уровня. Энергия импульса в этом случае равна 8 МДж. Такой импульс развивается, например, при введении между импульсами реактивности  $3\beta_{и}$ , где  $\beta_{и}$  — импульсная доля запаздывающих нейтронов [2], играющая ту же роль, что  $\beta_{эф}$  в стационарном реакторе. Для ИБР-2  $\beta_{и} = 1,6 \cdot 10^{-4}$ . При выделении в импульсе указанной выше энергии происходит частичная разгерметизация топливных оболочек и попадание осколочной активности в первый натриевый контур охлаждения активной зоны.

В расчетах в качестве безопасной границы возмущений реактивности принимались возмущения, при которых в переходных процессах мощности относительное отклонение  $\Delta E/E^0$  энергии импульса  $E$  от его базового значения  $E^0$  достигало значения 10:

$$\left(\frac{\Delta E}{E^0}\right)_{\max} = \left(\frac{E - E^0}{E^0}\right)_{\max} = 10.$$

Выбранный из условий безопасности критерий 10-кратного выброса мощности в данном случае является консервативной (с запасом) оценкой 20-кратного превышения энергии импульса.

В модели динамики для определения границы безопасных возмущений реактивности принципиальное значение имеет быстрая мощностная обратная связь (МОС). Медленными компонентами обратной связи (более одной минуты) в данной задаче можно пренебречь. Используемую модель обратной связи можно представить в виде трех параллельно соединенных апериодических звеньев [3]. Каждое из этих звеньев характеризуется коэффициентом передачи  $k_{\theta j}$  и постоянной времени  $T_{\theta j}$  ( $j = 1, 2, 3$ ). При этом в качестве входного сигнала МОС рассматривалась мощность реактора в виде последовательности импульсов мощности, а в качестве выходного — реактивность, создаваемая мощностной обратной связью.

За время длительной работы ИБР-2 выявилась принципиальная особенность: суммарная реактивность МОС, оставаясь отрицательной, существенно уменьшалась по модулю [3]. Некоторые значения суммарного коэффициента передачи МОС на разных этапах эксплуатации ИБР-2 представлены в табл. 1.

Из-за колебательного характера переходных процессов мощности, наблюдаемых перед остановкой реактора в 2006 г., была получена лишь оценка суммарного коэффициента передачи  $\sum k_{\theta} = -2\beta_{и}/\text{МВт}$ . В связи с этим в ка-

**Таблица 1. Изменение суммарного коэффициента передачи быстрой МОС  $\sum k_{\theta}(\beta_{и}/\text{МВт})$  ИБР-2 по годам**

1984	1988	2002	2006
-7	-5,26	-2,74	-2

честве набора параметров МОС для 2006 г. были приняты параметры набора 2002 г., но с измененным коэффициентом передачи  $k_{\theta 1}$ , так чтобы суммарный коэффициент передачи составил  $\sum k_{\theta} = k_{\theta 1} + k_{\theta 2} + k_{\theta 3} = -2 \beta_{\text{н}}/\text{МВт}$ :  $k_{\theta 1} = -5,36$ ,  $k_{\theta 2} = 3,8$ ,  $k_{\theta 3} = -0,44 \beta_{\text{н}}/\text{МВт}$ ;  $T_{\theta 1} = 7,9$ ,  $T_{\theta 2} = 4,8$ ,  $T_{\theta 3} = 0,19$  с.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты были проведены для всех наборов значений параметров МОС, представленных в табл. 1. Для наглядности на рис. 1 показаны переходные процессы мощности для некоторых характерных наборов параметров МОС:  $-5,26$  и  $-2 \beta_{\text{н}}/\text{МВт}$  для случая, когда переход реактивности на новый уровень осуществлялся за 2 с. Расчетные кривые опасных зон возмущений реактивности приведены на рис. 2. Точки на кривых соответствуют значениям уровня вносимой реактивности  $\Delta \rho$  и скорости ее нарастания  $d\rho/dt$ , при которых наблюдается 10-кратный максимальный выброс относительного значения энергии импульсов:  $[(E - E^0)/E^0]_{\text{max}} = 10$ .

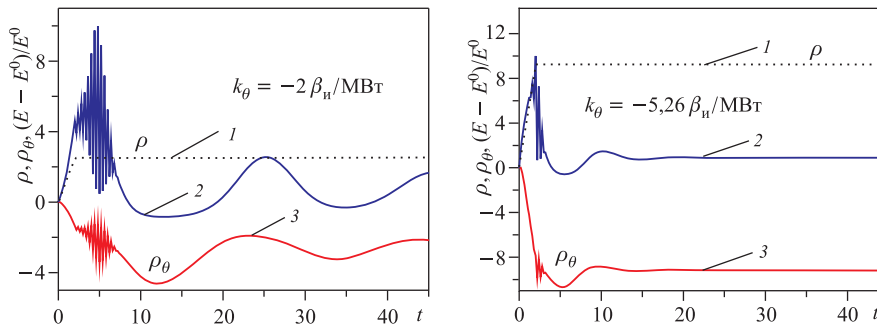


Рис. 1. Переходные процессы мощности  $(E - E^0)/E^0$  (2) при линейном переходе реактивности  $\rho$  (1) на новый уровень за 2 с для двух значений суммарного коэффициента передачи быстрой обратной связи  $k_{\theta}$  на мощности 2 МВт.  $\rho_{\theta}$  — реактивность обратной связи в  $\beta_{\text{н}}$  (3);  $t$  — время в секундах

Опасное состояние реактора возникает для значений  $\Delta \rho$  и  $d\rho/dt$ , соответствующих точкам, расположенным выше кривой, когда  $[(E - E^0)/E^0]_{\text{max}} > 10$ .

Из рис. 2 видно, что область безопасной работы реактора со временем сокращается. При этом граница скоростей изменения реактивности асимптотически выходит на значение предельного скачка реактивности  $2,4 \beta_{\text{н}}$ .

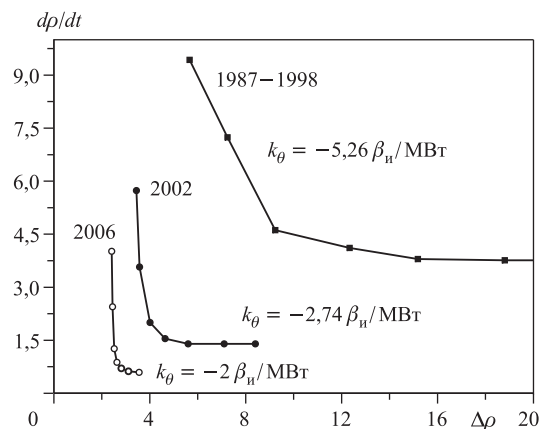


Рис. 2. Граница 10-кратного выброса энергии импульсов на плоскости возмущающей реактивности «уровень  $\Delta\rho$  ( $\beta_n$ ) – скорость нарастания  $d\rho/dt$  ( $\beta_n/c$ )» на разных этапах работы ИБР-2

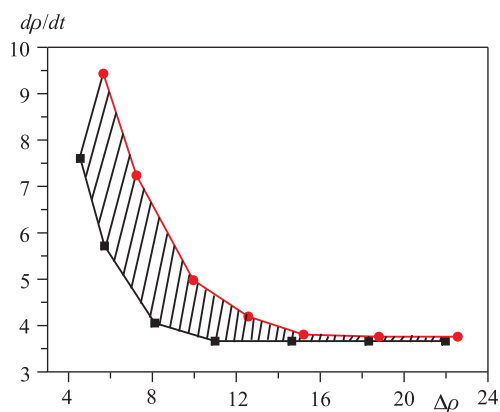


Рис. 3. «Размытие» границы 10-кратного выброса энергии импульсов на плоскости возмущающей реактивности «уровень  $\Delta\rho$  ( $\beta_n$ ) – скорость нарастания  $d\rho/dt$  ( $\beta_n/c$ )» за счет неустойчивости коэффициентов передачи быстрой МОС при работе реактора на мощности 2 МВт

Зоны безопасности на рис. 2 приведены для средних значений суммарного коэффициента быстрой мощностной связи. В реальных условиях работы реактора быстрая мощностная связь, оставаясь в некоторый период времени в среднем постоянной, имеет существенный разброс параметров [4], что «размывает» границу безопасности. Как показали исследования, на мощности 2 и 1,5 МВт разброс параметров МОС (в основном коэффициентов передачи мощностной обратной связи) от измерения к измерению составляет  $\pm 30\%$  относительно средних значений. Разброс параметров быстрой обратной связи

есть результат действия сложных термомеханических и гидродинамических процессов в активной зоне при работе реактора на мощности. Изменение зоны безопасности ИБР-2 за счет разброса параметров быстрой обратной связи на мощности 2 МВт показано на рис. 3. Заштрихованная область на рис. 3 фактически есть область «размытия» границы безопасности реак-

тора. Здесь нужно отметить следующее. На мощности 2 МВт реактор работал с 1984 по 1996 г. Суммарный коэффициент передачи быстрой МОС в начале кампании довольно резко уменьшился по модулю с  $-10$  до  $-5\beta_n/\text{МВт}$  и затем долгое время в среднем сохранялся на этом уровне [4].

Приведенные выше данные говорят о том, что граница безопасности в процессе работы реактора флуктуирует и в то же время постоянно сужается. Как показывают результаты моделирования, определяющим фактором сужения границы безопасности реактора во времени является уменьшение (по модулю) суммарного коэффициента передачи быстрой связи. Ослабление обратной связи происходит естественным образом, поскольку вызывается процессами деградиационного типа, происходящими в тепловыделяющих элементах активной зоны. Например, с выгоранием топлива меняются термомеханические характеристики тепловыделяющих элементов, в результате чего меняется характер их искривления и структура контактов друг с другом и с корпусом реактора.

Нужно также отметить, что сокращение области безопасности реактора происходит не только за счет ослабления обратной связи во времени, но и за счет роста случайных колебаний реактивности, вызванных работой различных технологических систем.

В данных условиях (при наблюдаемом характере изменения обратной связи с выгоранием топлива) основная гарантия долговременного сохранения безопасности реактора обеспечивается скорее не за счет внутренней способности реактора к саморегулированию, а за счет оптимизации работы системы автоматического регулирования мощности и системы аварийной защиты.

Указанные выше выводы можно частично перенести и на реактор ИБР-2М, являющийся модернизированной версией ИБР-2. Предполагается, что динамические свойства реактора ИБР-2М в начале кампании будут близки к динамическим свойствам ИБР-2. Учитывая это, можно сделать следующие выводы. Во-первых, реактор ИБР-2М в режиме автоматического регулирования будет устойчив. Во-вторых, смоделированные для ИБР-2 переходные процессы, характеризующиеся многократным увеличением амплитуды импульсов мощности, на реакторе ИБР-2М не будут реализованы. Они будут прерваны в самом начале по сигналу превышения амплитуды импульса из-за сброса аварийной защиты и компенсирующих органов. За время между импульсами (0,2 с) аварийная защита ИБР-2М способна перевести реактор в состояние ниже мгновенной критичности и уменьшить мощность реактора до безопасного уровня.

Очевидно также, что при ужесточении критерия допустимого выброса энергии импульса граница безопасности еще более сужается. Так, если пользоваться критерием  $[(E - E^0)/E^0]_{\max} = 5$  (вместо 10), то для диапазона скорости введения реактивности  $d\rho/dt$ , например, от 2 до  $5\beta_n/\text{с}$  граничный уровень вводимой реактивности уменьшается в 2–3 раза.

Ослабление со временем быстрой МОС, вызывающей сужение зоны безопасности ИБР-2 по колебаниям реактивности, не совсем понятно. Особенно неясна причина резкого ослабления быстрой мощностной связи с  $-2,74$  до  $-2\beta_n/\text{МВт}$  перед остановом реактора в 2006 г. (см. рис. 2). Из-за важности этого факта рассмотрим некоторые модельные варианты его объяснения.

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ ОСЛАБЛЕНИЯ БЫСТРОЙ МОС В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ ИБР-2 И ГРАНИЦА УСТОЙЧИВОСТИ

Трехэкспоненциальное представление быстрой связи ИБР-2 есть результат формальной математической обработки экспериментальных данных. Наиболее вероятная физическая интерпретация результатов обработки выглядит следующим образом. Самая медленная компонента обратной связи связана с топливной составляющей (аксиальное расширение топлива), остальные — натриевые. Положительная обратная связь как часть натриевых эффектов обусловлена, вероятнее всего, термомеханическими деформациями топливных элементов (изгибами) через градиент температуры натрия.

Для наглядности результатов и удобства дальнейшего анализа перейдем к импульсной характеристике обратной связи, которая представляет собой изменение во времени  $t$  реактивности обратной связи  $\rho_\theta$  от единичного импульса мощности с энергией 1 МДж:

$$\rho_\theta(t) = \sum_j (k_{\theta j}/T_{\theta j}) e^{-t/T_{\theta j}},$$

где  $T_{\theta j}$  — постоянные времени и  $k_{\theta j}$  — соответствующие коэффициенты передачи обратной связи,  $j = 1, 2, 3$ . Сумма  $\sum k_{\theta j} = k_\theta$  есть асимптотическое значение быстрого мощностного коэффициента реактивности.

Очевидно, что необходимым условием устойчивости является условие  $k_\theta < 0$ . Наиболее вероятный сценарий ослабления обратной связи, так же как и достаточное условие устойчивости, можно определить путем прямого моделирования импульсной характеристики. Достаточным условием устойчивости может быть отрицательность импульсной характеристики  $\rho_\theta(t) < 0$ . Характерный вид зависимости  $\rho_\theta(t)$ , вычисленной по измеренным переходным процессам мощности в разные периоды работы ИБР-2, приведен на рис. 4.

Как видно из рис. 4, при значении суммарного коэффициента обратной связи  $k_\theta = -2,74\beta_n/\text{МВт}$  (2002 г.) реактор в режиме саморегулирования находится вблизи положительных значений реактивности, т. е. вблизи границы устойчивости. Случайные колебания реактивности или же случайные колебания параметров обратной связи могут перевести реактор за границу устой-



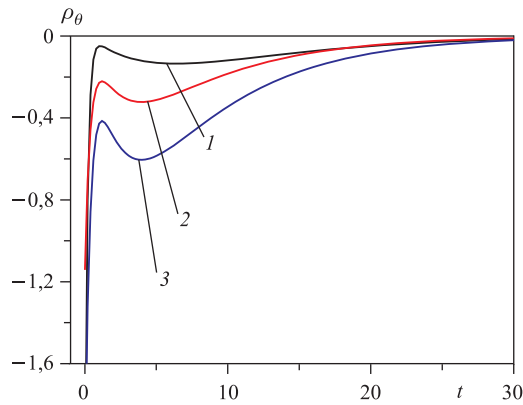


Рис. 4. Импульсная характеристика ИБР-2  $\rho_{\theta}$  ( $\beta_{и}/\text{МДж}$ ), соответствующая некоторым характерным наборам параметров обратной связи,  $t$  — время в секундах: 1 —  $k_{\theta} = -2,74$ , 2 —  $k_{\theta} = -5,26$ , 3 —  $k_{\theta} = -7,89 \beta_{и}/\text{МВт}$

чивости, в результате чего возможно появление автоколебаний мощности с развитием аварийного импульса. Здесь нужно отметить, что в реальных условиях эксплуатации ИБР-2 реализация автоколебаний невозможна, поскольку устойчивость реактора поддерживается системой автоматической стабилизации мощности.

С другой стороны, ослабление обратной связи до  $-2 \beta_{и}/\text{МВт}$  (2006 г.) не только сужает зону безопасных колебаний реактивности, но и переводит реактор в режиме саморегулирования на границу устойчивости. Возникает вопрос: за счет изменения каких компонентов обратной связи может быть реализовано состояние неустойчивости?

Поскольку по соображениям безопасности параметры обратной связи при малых значениях коэффициента передачи определить экспериментально невозможно, использовали моделирование процесса перехода реактора из состояния 1 (2002 г.) с коэффициентом  $-2,74$  к состоянию 2 (2006 г.) с коэффициентом  $-2 \beta_{и}/\text{МВт}$ . Мощность реактора составляла 1,5 МВт. Принималось, что временные константы обратной связи при переходе не изменяются. Это предположение достаточно верно, поскольку, как показывают долговременные наблюдения, временные константы, при прочих равных условиях, слабо зависят от времени работы реактора, но имеют довольно значительную случайную компоненту. В среднем значения временных констант на сравнительно небольших интервалах времени работы реактора можно считать постоянными.

Переход из состояния 1 в состояние 2 может быть реализован двумя путями: за счет увеличения коэффициента передачи положительной компо-

ненты обратной связи и за счет уменьшения по модулю отрицательных составляющих обратной связи. Возможна также комбинация указанных выше вариантов, например пропорциональное уменьшение всех коэффициентов передачи. В табл. 2 приведены первые два возможных варианта изменения параметров обратной связи, а на рис. 5 — соответствующие этим вариантам импульсные характеристики (рис. 5, *a* — для широкого диапазона времени, рис. 5, *б* — для начального этапа).

**Таблица 2. Возможные варианты изменения коэффициентов передачи МОС при переходе реактора из состояния с суммарным коэффициентом обратной связи  $-2,74$  к состоянию с коэффициентом  $-2\beta_n/\text{МВт}$ .  $T_{\theta j} = 7,9; 4,8; 0,19$  с**

№ кривой	$\beta_n/\text{МВт}$			$\sum k_{\theta}$
	$k_{\theta 1}$	$k_{\theta 2}$	$k_{\theta 3}$	
1	-6,1	4,54	-0,44	-2
2	-5,36	3,8	-0,44	-2
3	-6,1	3,8	-0,44	-2,74

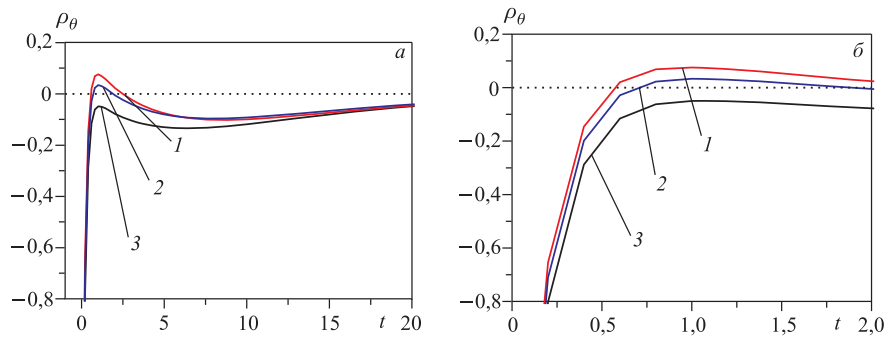


Рис. 5. Изменение импульсной характеристики обратной связи  $\rho_{\theta}$  ( $\beta_n/\text{МДж}$ ) для двух вариантов перехода реактора из состояния с суммарным коэффициентом передачи обратной связи  $-2,74$  (3) в состояние с  $-2\beta_n/\text{МВт}$  на мощности 1,5 МВт,  $t$  — время в секундах: кривая 2 — переход за счет уменьшения по модулю коэффициента передачи наиболее медленной отрицательной компоненты обратной связи, кривая 1 — переход за счет увеличения коэффициента передачи положительной составляющей обратной связи. Значения остальных коэффициентов передачи равны исходным

Из рис. 5 видно, что при указанных в табл. 2 сценариях перехода реактора в состояние 2 импульсная характеристика обратной связи частично выходит в положительную область реактивности, т. е. реактор становится неустойчивым. Видно также, что сценарий с ростом положительной компоненты обратной связи более чувствителен к ее изменению.

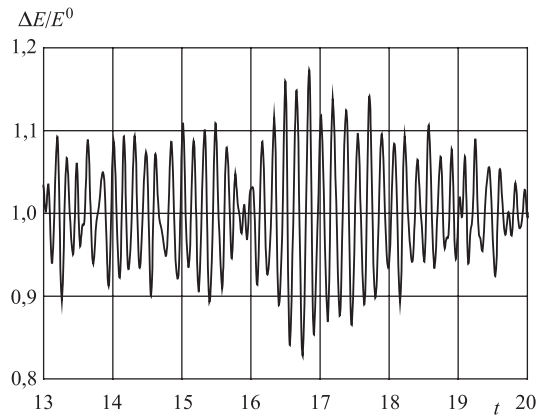


Рис. 6. Относительные колебания энергии импульсов ИБР-2 ( $\Delta E/E^0$ ) в режиме саморегулирования (при отключенной системе регулирования мощности) при суммарном коэффициенте обратной связи  $-2\beta_n/\text{МВт}$  на мощности 1,45 МВт,  $t$  — время в минутах. Наблюдаются автоколебания с периодом 11 с

Для проверки предполагаемой потери устойчивости реактора при коэффициенте обратной связи  $-2\beta_n/\text{МВт}$  реактор на короткое время был выведен в режим саморегулирования (система регулирования мощности была отключена). Сразу после отключения системы регулирования мощности реактор перешел в режим автоколебаний, т. е. утратил устойчивость. Характер автоколебаний показан на рис. 6.

Гипотетически возможен и другой сценарий ослабления обратной связи — равномерное уменьшение всех коэффициентов передачи (формальный анализ). В этом случае получается следующее. При стремлении суммарного коэффициента передачи обратной связи к нулю ( $k_\theta \rightarrow 0$ ) импульсная характеристика обратной связи также стремится к нулю ( $\rho_\theta(t) \rightarrow 0$ ), асимптотически вырождаясь в нулевую линию, оставаясь при этом отрицательной (см. рис. 7). Таким образом, в пределе (при  $k_\theta = 0$ ) получается очевидный результат (вырожденное состояние реактора) — реактор с нулевой обратной связью на границе устойчивости.

Такой формальный анализ предполагает возможность отсутствия отрицательной составляющей обратной связи по топливу (аксиальное расширение топлива), что физически невозможно. Поэтому наблюдаемое ослабление обратной связи в процессе работы реактора более вероятно связать с ростом вклада в суммарный коэффициент передачи положительной компоненты обратной связи. Таким образом, изменения, происходящие в процессе работы ИБР-2 в активной зоне (в распределении температуры топлива и натрия по активной зоне и связанные с этим изменения в термомеханических

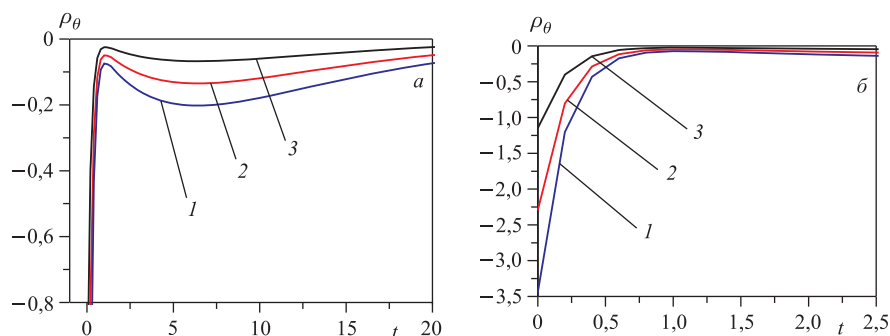


Рис. 7. Импульсные переходные характеристики обратной связи ( $\rho_\theta$ ,  $\beta_n$ ) в широком диапазоне времени ( $t$ , с) (а) и на начальном этапе (б) при пропорциональном изменении коэффициентов передачи обратной связи от  $k_\theta = -2,74$  (кривая 2, полученная из эксперимента) до  $-4,11$  (1) и  $-1,37 \beta_n/\text{МВт}$  (3)

деформациях топливных элементов), являются для реактора дестабилизирующим фактором. Эта задача достаточно сложная и требует отдельных исследований.

## ВЫВОДЫ

Приведенный анализ показал, что граница безопасности ИБР-2 в процессе работы реактора флуктуирует и в то же время постоянно сужается. Как показывают результаты моделирования, основанные на экспериментальных данных о параметрах реактора, определяющим фактором сужения границы безопасности реактора во времени является уменьшение (по модулю) суммарного коэффициента передачи быстрой обратной связи.

Моделирование показало, что наблюдаемое в конце кампании реактора уменьшение обратной связи таково, что импульсная характеристика реактора частично выходит в положительную область реактивности и реактор в режиме саморегулирования становится неустойчивым. Наиболее вероятно, что это явление связано с ростом натриевой положительной компоненты обратной связи, усиливающейся с выгоранием топлива.

При наблюдаемом характере изменения обратной связи гарантия безопасности реактора обеспечивается за счет оптимизации работы системы автоматического регулирования мощности и системы аварийной защиты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Попов А. К.* Частотная и импульсная переходные характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-90-203. Дубна, 1990.
2. *Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // Атомная энергия. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.
3. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 928–983.
4. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.* Измерение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-1. Дубна, 2008.

Получено 17 февраля 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 06.05.2010.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 305 экз. Заказ № 56981.

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/)