

P13-2008-178

Ли Ен Чхан, Ю. Н. Пепельшев, Чжан Чан Мин

СЛУЧАЙНЫЙ ХАРАКТЕР ДИНАМИКИ  
МЕДЛЕННОЙ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ  
РЕАКТОРА **ИБР-2**

Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н., Чжан Чан Мин  
Случайный характер динамики медленной мощностной  
обратной связи реактора ИБР-2

P13-2008-178

Проведен анализ зависимости параметров медленной мощностной обратной связи реактора ИБР-2 от энерговыработки. Показано, что в отличие от параметров быстрой мощностной связи параметры медленной динамики не зависят от энерговыработки и имеют значительную шумовую составляющую. Это связано с тем, что медленная динамика реактора обусловлена процессами, происходящими в конструкционных элементах вне активной зоны, в которых наблюдаются относительно умеренные радиационные и термомеханические напряжения.

Наиболее вероятные причины случайного изменения параметров медленной динамики при переходе от одного реакторного цикла к другому могут быть связаны с необратимостью перемещений стационарных отражателей, изменением параметров систем охлаждения отражателей и радиационной защиты. Эта случайность в динамике реактора не уменьшает степень его надежности и безопасности.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Li Yong Chan, Pelyolyshev Yu. N., Jang Chang Min  
Random Nature in the Dynamics of Slow Power Feedback  
of the Pulsed Fast Reactor IBR-2

P13-2008-178

Analysis of the relationship between the parameters of slow power feedback and power production in the pulsed fast reactor IBR-2 has been accomplished. The investigation result has shown that unlike the parameters of fast power feedback, the parameters of slow dynamics are not related to energy production and have considerable noise components. This is caused by the fact that the slow dynamics of the reactor is generated by the processes in the structural components around the reactor vessel, in which relatively mild radiation, thermal and mechanical conditions are observed.

The most possible causes of the random change in the parameters of slow dynamics from one reactor cycle to another are the irreversibility of displacement of the stationary reflectors, change in the parameters of the cooling systems of the stationary reflectors. This randomness in the dynamics of the reactor does not influence the reliability and safety of the reactor.

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

Нормальная работа реактора ИБР-2 поддерживается с помощью системы автоматического регулирования, которая обрабатывает все эффекты изменения внешней реактивности. Условно эффекты реактивности можно разделить на две группы: быстрые и медленные. Под быстрыми эффектами понимаются эффекты, действующие в пределах  $\sim 0-5$  мин. Характер изменения быстрых эффектов в зависимости от времени работы реактора и энерговыработки исследован в работе [1]. Эффекты реактивности с временными константами более 30 мин можно отнести к медленным эффектам. При анализе параметров медленных эффектов оказалось, что их значения довольно сильно меняются от одного реакторного цикла к другому (разброс превышал 30 %). Такое изменение параметров медленной динамики реактора нельзя было объяснить погрешностью измерения (4 %) или методической погрешностью обработки данных. Кроме того, физическая природа появления самих медленных эффектов реактивности и случайного характера изменения их параметров была не совсем понятна. В работе сделана попытка на основе имеющегося экспериментального материала (с 1982 по 2006 гг.) выявить и объяснить характер случайного изменения медленной динамики реактора и его связь с энерговыработкой.

### 1. ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МЕДЛЕННЫХ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ ОТ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ

Параметры медленных эффектов реактивности определялись из анализа баланса реактивности в отдельном реакторном цикле на основе модели динамики ИБР-2, предложенной в работе [2]. По этой модели полный эффект реактивности мощностной обратной связи (МОС)  $\rho_{\text{мос}}$  состоит из двух компонентов: быстрой и медленной  $\rho_{\text{мос}} = \rho_{\text{р}} + \rho_{\text{м}}$ . При рассмотрении медленных процессов быстрый компонент считается безынерционным звеном. В свою очередь, медленный компонент изменения реактивности  $\rho_{\text{м}}$  выражается двумя инерционными звеньями первой степени, каждое из которых имеет две временных константы. Наличие двух временных констант у одного звена в данном случае определяется нелинейностью медленной динамики реактора.

По этой модели при ступенчатом изменении мощности на  $\delta$ (МВт) изменение реактивности в медленных процессах  $\delta\rho_m$  ( $\% \Delta K/K$ ), где  $K$  — коэффициент размножения нейтронов, если реактор до возмущения был в установившемся состоянии, выражается формулой

$$\delta\rho_m(t) = \delta \cdot [k_1 \cdot (1 - \exp(-t/T_1)) + k_2 \cdot (1 - \exp(-t/T_2))],$$

где постоянные времени  $T_1, T_2$ (ч) будут равны  $T_{n1}$  и  $T_{n2}$  при положительном знаке изменения мощности и  $T_{y1}$  и  $T_{y2}$  — при отрицательном. Анализ показал, что первое звено имеет положительный коэффициент реактивности и постоянную времени несколько часов, второе звено — отрицательный коэффициент и постоянную времени десятки часов. Таким образом, каждое звено характеризуется тремя параметрами: коэффициентом передачи  $k_i$  и постоянными времени нарастания  $T_{ni}$  и убывания  $T_{yi}$ . Медленные процессы изменения реактивности можно описать, зная значения указанных выше шести параметров. Способ определения значений параметров медленной динамики на основе анализа баланса реактивности подробно изложен в работе [2].

Были исследованы параметры динамики в 141 реакторном цикле при мощности 1,5 и 2 МВт. Для уменьшения методической погрешности в определении параметров медленной динамики в процедуре многопараметрической оптимизации фиксацией мало меняющихся параметров было уменьшено число степеней свободы. Правомочность этой операции основывалась на следующем свойстве мощностной обратной связи. Через 20 ч после начала реакторного цикла все компоненты мощностного эффекта реактивности за исключением наиболее медленного полностью исчезают. Поэтому в реакторном цикле длительностью 300 ч можно точно определить постоянную времени наиболее медленного звена. Из обработки данных по 14 реакторным циклам без сбросов мощности (сбросы мощности существенно влияют на ход изменения реактивности, см. раздел 3) были получены постоянные времени самой медленной компоненты реактивности  $T_{ni} = 92$  ч (среднее квадратичное отклонение  $\sim 5\%$ ). Далее путем предварительной оптимизации данных при фиксированном значении  $T_{ni}$  с усреднением по реакторным циклам со сбросами мощности были получены отношения постоянных времени убывания реактивности и ее нарастания ( $\phi_i = T_{yi}/T_{ni}$ ). Таким образом, для последующей обработки были зафиксированы наиболее вероятные по всем реакторным циклам значения слабо меняющихся параметров  $T_{n2} = 92$  ч,  $\phi_1 = 0,92$  и  $\phi_2 = 0,153$ .

Результаты многопараметрической оптимизации баланса реактивности в 141 реакторном цикле с учетом принятых выше допущений показаны на рис. 1. Некоторые статистические характеристики параметров медленной динамики приведены в таблице.

Из рис. 1 и таблицы видно, что разброс значений параметров медленной динамики относительно их средних значений довольно велик. Кроме того,

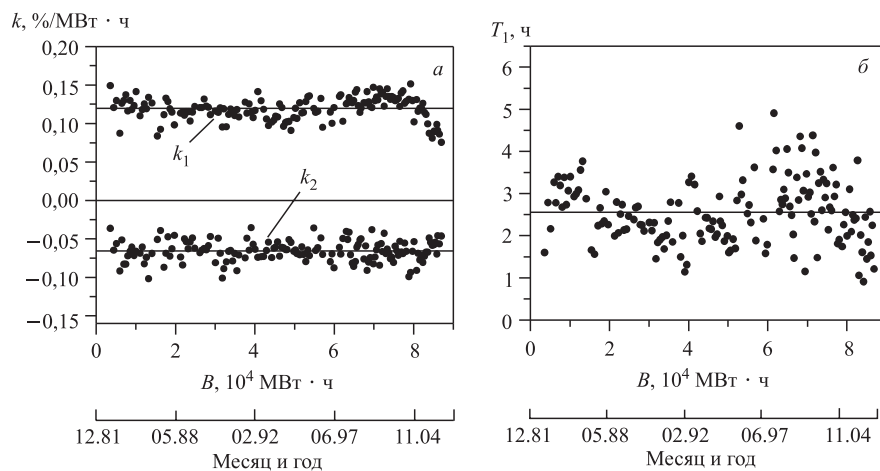


Рис. 1. Коэффициенты передачи медленной мощностной обратной связи двух звеньев (а) и постоянная времени первого звена (б) в зависимости от энерговыработки

можно считать, что параметры медленной динамики в среднем не меняются с энерговыработкой, т. е. динамика реактора в медленных процессах не зависит от энерговыработки. Этот вывод можно было ожидать и с физической точки зрения. В результате сильного радиационного и теплового воздействия состав и свойства активной зоны со временем меняются. Это становится причиной изменения быстрых эффектов реактивности, связанных с процессами внутри активной зоны [2]. В окружении активной зоны радиационное воздействие существенно меньше, поэтому можно ожидать, что какие-либо изменения во внезонных конструкциях в процессе работы реактора будут также малы. Поэтому и параметры медленной динамики, связанные в основном с процессами во внезонных структурах, не должны существенно меняться с энерговыработкой. Вопрос состоит в том, что является причиной разброса параметров медленной динамики?

**Некоторые статистические характеристики параметров медленной динамики (коэффициентов передачи  $k_1$  и  $k_2$  и постоянной времени  $T_{n1}$ ,  $T_{n2}$  обоих звеньев)**

Название параметров	Среднее значение	Относительное стандартное отклонение, %	Относительный размах, %
$k_1$	0,12 % $\Delta K/K$ /МВт	13	36
$T_{n1}$	2,5 ч	30	94
$k_2$	-0,066 % $\Delta K/K$ /МВт	21	55
$T_{n2}$	92 ч	5	14

## **2. НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫЕ ПРИЧИНЫ СЛУЧАЙНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕДЛЕННОЙ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

В настоящее время понимание физической природы медленного изменения реактивности обратной связи неоднозначно. По мнению авторов, вероятные причины медленной динамики мощностной обратной связи могут быть обусловлены следующим:

- Во-первых, имеются термомеханические деформации и перемещение корпуса реактора и конструктивных элементов из ближайшего его окружения. Термомеханические деформации этих систем при изменении мощности от нуля до номинального значения могут вызвать изменение реактивности, сравнимое с наблюдаемым эффектом. Например, смещение от зоны стационарного отражателя (с введенными в зону блоками регулирования) вызывает изменение реактивности  $0,4\beta_{эф}/мм$  [3]. Необратимость или неоднозначность положения конструктивных элементов из ближайшего окружения активной зоны вызваны тем, что различные элементы реактора вокруг реакторного корпуса жестко не скреплены друг с другом.

- Во-вторых, наблюдаемое на практике медленное уменьшение мощности (на 4,1 %), приводит к изменению баланса реактивности. Этот эффект может быть связан с особенностями работы системы автоматического регулирования мощности при прогреве радиационной защиты. Отметим, что эта компонента реактивности значительно меньше наблюдаемого изменения.

- В-третьих, происходит миграция воды в бетонной радиационной защите при ее радиационном нагреве. Содержание воды в бетоне уменьшается при повышении его температуры. Это меняет баланс нейтронов. По предварительным данным, этот эффект составляет 0,004 %/МВт, что также меньше наблюдаемого.

Нельзя исключить, что указанные выше эффекты могут действовать аддитивно и в нужную сторону, кроме того, их временные константы близки.

С точки зрения построения модели динамики реактора, случайное изменение реактивности в медленных процессах означает наличие неизвестных и поэтому неучитываемых в модели переменных. К ним можно отнести неоднозначность деформации конструктивных элементов в зависимости от температуры.

Немалую роль в анализе медленной динамики реактора имеет погрешность определения импульсной критичности, которая является базовым значением при определении баланса реактивности в цикле. Импульсный реактор периодического действия находится в состоянии импульсной критичности, если надкритичность на мгновенных нейтронах в импульсе равна равновесной импульсной надкритичности. Аппаратурная фиксация состояния равновесной надкритичности имеет погрешность, которая напрямую влияет на точ-

ность определения коэффициента передачи и постоянной времени первого звена. Анализ показал, что погрешность фиксации импульсной критичности обычно равна  $0,005\% \Delta K/K$ . Очень редко эта погрешность достигала  $0,05\% \Delta K/K (\sim 0,2\beta_{эф})$ . Средняя погрешность параметров медленной динамики (параметров первого звена), связанная с погрешностью определения импульсной критичности, оценивается 2–3 %.

Кроме того, положение органов регулирования, по которым фиксируется состояние импульсной критичности, также есть величина случайная. Дело в том, что органы регулирования размещены в матрице стационарных отражателей, которые, как уже было сказано, подвержены термомеханическим перемещениям. Соответственно, положение органов регулирования относительно активной зоны случайным образом меняется от цикла к циклу. При детальной обработке данных вклад этой погрешности может быть уменьшен (см. также раздел 3).

Колебания температуры и расхода воздуха в системе охлаждения стационарных отражателей могут влиять на случайный характер термомеханических перемещений отражателей и связанные с этим изменения реактивности. Средняя температура стационарного отражателя  $T_R$  определяется мощностью реактора, расходом и входной температурой охлаждающего отражатель воздуха. Эту температуру при установившемся термодинамическом состоянии отражателей приближено можно представить в виде [4]

$$T_R = T_{in} + K_f \cdot P/G + K_a \cdot P/G^{0,8}, \quad (1)$$

где  $T_{in}$  — входная температура воздуха,  $P$  — мощность реактора (МВт),  $G$  — расход воздуха ( $m^3/ч$ ),  $K_f$  и  $K_a$  — коэффициенты пропорциональности. По данным об изменении  $T_{in}$  и  $G$  от цикла к циклу можно оценить разброс температуры стационарных отражателей. Этот разброс без учета влияния положения шибберов нейтронных каналов на температуру отражателей составляет  $\sim 10\%$ . Влияние шибберов на температуру отражателей кратковременное и в определении параметров медленной динамики не является определяющим. Таким образом, эффект, вызванный случайностью температур стационарных отражателей, велик (10%), но не может полностью объяснить наблюдаемый на практике разброс параметров динамики ( $> 30\%$ ).

### **3. ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНОГО ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕДЛЕННЫХ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ РЕАКТОРА**

Случайный характер изменения параметров медленной динамики ИБР-2 вызывает некоторую неопределенность в эксплуатации реактора, поскольку

изменение реактивности в течение реакторного цикла, компенсируемое системой автоматического регулирования и оператором установки, есть случайная и довольно значительная величина. Рассмотрим, может ли эта неопределенность сказываться на безопасности и надежности работы реактора. Для этого выделим изменение максимальной и минимальной реактивности в цикле в зависимости от энерговыработки. Что считается минимальной и максимальной реактивностью в цикле, показано на рис. 2.

Изменение реактивности в цикле  $\rho_{\text{мос}}$  вычислялось из квазистационарного уравнения баланса реактивности как сумма быстрого и медленного мощностных эффектов [2]

$$\rho_{\text{мос}} = - \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})] - k_T(T_{\text{вх}} - T_{\text{вх0}}) - \rho_G - k_{\text{э}}(B - B_0), \quad (2)$$

где  $\sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})]$  — эффект перемещений органов регулирования;  $k_i(z)$  — кривая эффективности  $i$ -го блока системы управления и защиты;  $z$  — положение органа регулирования;  $k_T(T_{\text{вх}} - T_{\text{вх0}})$  — изотермический эффект реактивности;  $k_T$  — изотермический коэффициент реактивности;  $\rho_G$  — расходный эффект реактивности натрия;  $k_{\text{э}}(B - B_0)$  — эффект реактивности, связанный с энерговыработкой (выгорание топлива) в цикле;  $k_{\text{э}}$  — коэффициент реактивности, связанный с энерговыработкой;  $T_{\text{вх}}$  — температура натрия на входе активной зоны;  $B$  — энерговыработка. Нижний индекс «0» означает базовое значение в момент импульсной критичности.

На рис. 3 приведен ход максимальной и минимальной реактивности медленной мощностной обратной связи в зависимости от энерговыработки, начи-

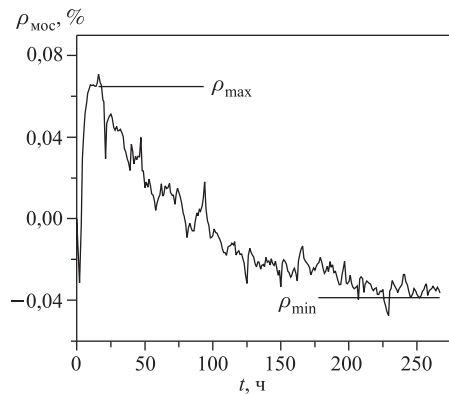


Рис. 2. Пример определения максимального ( $\rho_{\text{max}}$ ) и минимального ( $\rho_{\text{min}}$ ) значений реактивности медленной МОС в одном из циклов работы реактора (май 1995 г.)



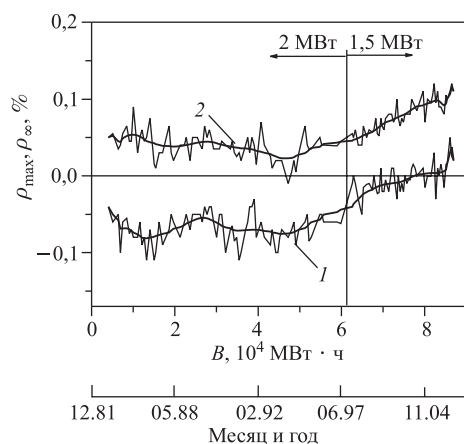


Рис. 3. Изменение минимального (1) и максимального (2) значений реактивности медленной МОС в зависимости от энерговыработки. — — линии после фильтрации

ная с марта 1984 г. Предварительно была устранена погрешность, связанная с оценкой импульсной критичности, которая определялась по синхронному изменению максимальной и минимальной реактивности (если в каком-то цикле импульсная критичность определена с большой погрешностью, то максимальная и минимальная реактивность сдвинется по оси ординат).

Отметим, что, начиная с энерговыработки 4500 МВт · ч (1993 г.), наблюдается постепенное повышение максимальной и минимальной реактивности. Причиной такого изменения реактивности может быть только уменьшение по модулю быстрого мощностного коэффициента реактивности, поскольку при его изменении кривая мощностного эффекта на рис. 2 смещается по ординате. Это совпадает с выводами работы [1] по уменьшению быстрого мощностного коэффициента реактивности в процессе эксплуатации реактора.

Кроме погрешности оценки импульсной критичности на точность определения параметров медленной динамики влияют и другие факторы. Один из них — сбросы мощности. Как показывают анализ экспериментальных данных и результаты модельных экспериментов, чем чаще сбросы и чем длиннее время останова реактора после сброса, тем меньше  $\Delta\rho = \rho_{\max} - \rho_{\min}$  (см. рис. 4). Например, при трех сбросах мощности с длительностью останова 5 ч разность значений реактивности уменьшается на 32% по сравнению с реакторным циклом без сброса мощности. Кроме того, нужно отметить, что уменьшение диапазона изменения реактивности зависит от момента сброса мощности относительно начала реакторного цикла. Чем дальше сбросы к концу цикла, тем меньше становится разность  $\Delta\rho$ . Это тема отдельного

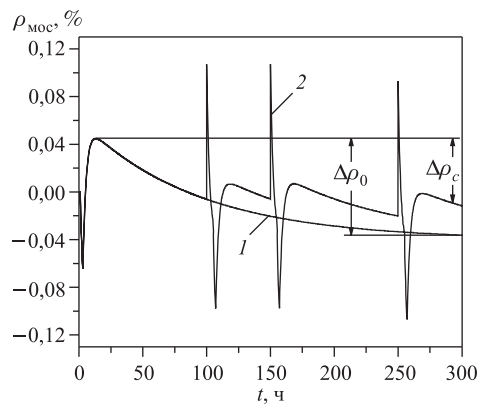


Рис. 4. Модельный эксперимент. Изменение мощного эффекта реактивности ИБР-2 на мощности 1,5 МВт без сбросов (1) и со сбросами (2) мощности

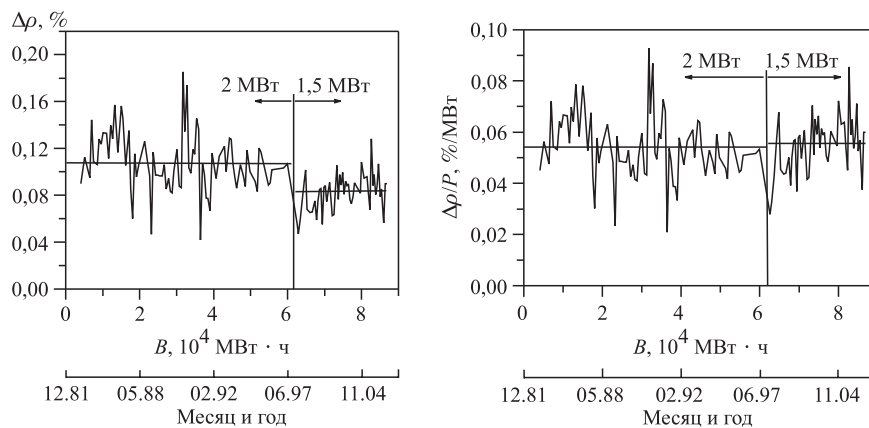


Рис. 5. Разность между максимальным и минимальным значениями реактивности в отдельных реакторных циклах в зависимости от энерговыработки. *a* — абсолютное значение, *b* — относительное значение

исследования. Рассмотрим изменение разности  $\Delta\rho$  в зависимости от энерговыработки. Эта разность показывает диапазон изменения реактивности в процессе длительной работы реактора (рис. 5). Отметим, что величина  $\Delta\rho$ , отнесенная к мощности, постоянна, если параметры медленной мощностной обратной связи в процессе длительной работы реактора не меняются. В области 2 МВт значение нормированной разности реактивностей в сред-

нем равно  $0,054\% \Delta K/K/\text{МВт}$ , и  $0,055\% \Delta K/K/\text{МВт}$  — в области 1,5 МВ. Таким образом, при работе реактора ИБР-2 на разных уровнях мощности относительное значение медленного изменения реактивности не меняется с энерговыработкой.

При этом разброс этой величины достаточно большой (среднеквадратичное отклонение на мощности 2 МВт равно 24 %, и на мощности 1,5 МВт — 18 %).

Как следует из рис. 5, а, среднее значение  $\Delta\rho$  составляет  $0,11\% \Delta K/K$ , при этом максимальная разность реактивности в отдельных реакторных циклах достигает  $0,18\% \Delta K/K$ . Можно считать, что полный диапазон изменения реактивности в цикле меньше полной эффективности промежуточного регулятора  $0,25\% \Delta K/K$ , а случайная компонента реактивности в этом диапазоне не превышает  $0,07\% \Delta K/K$ . Следовательно, для компенсации такого изменения реактивности, даже с учетом ее разброса, нет необходимости дополнительно перемещать другой регулятор реактивности. Кроме того, рассматриваемые изменения реактивности происходят медленно. В целом, случайное изменение параметров медленной динамики реактора не влияет на качество управления им и безопасность.

## ВЫВОДЫ

Анализ изменения параметров медленной мощностной обратной связи в процессе работы реактора показал, что параметры медленной динамики не зависят от энерговыработки и имеют значительную шумовую составляющую. Наиболее вероятные причины случайного изменения параметров медленной динамики при переходе от одного реакторного цикла к другому могут быть связаны с необратимостью перемещений стационарных отражателей, изменением параметров систем охлаждения отражателей и радиационной защиты. Существенное влияние на параметры медленной динамики оказывают и сбросы мощности. Случайность в медленной динамике реактора не снижает надежность его работы и безопасность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю.Н. Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-1. Дубна, 2008.
2. 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.

3. Отчет по обоснованию безопасности исследовательского импульсного реактора ИБР-2, ОИЯИ, ЛНФ. Дубна, 2000.
4. *Robert W. Serth. Process Heat Transfer. Principles and Applications. Elsevier Science & Technology Books, 2007. P. 53–62.*

Получено 2 декабря 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 28.01.2009.

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

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,97. Тираж 305 экз. Заказ № 56480.

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/)