

P13-2016-17

Ю. Н. Пепельшев¹, А. К. Попов¹, Д. Сумхуу^{1,2,*}

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОЩНОСТНОЙ
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ РЕАКТОРА ИБР-2М
С ПОМОЩЬЮ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ
РЕАКТИВНОСТИ**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор

* E-mail: dsumkhuu@jinr.ru

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.

P13-2016-17

Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности

На основе анализа переходных процессов мощности реактора ИБР-2М, обусловленных преднамеренными прямоугольными колебаниями реактивности при работе импульсного реактора в режиме саморегулирования, получены оценки параметров мощностной обратной связи (МОС). МОС ИБР-2М описана тремя линейными дифференциальными уравнениями первого порядка: две составляющие МОС осуществляют отрицательную обратную связь, одна — положительную. Суммарная обратная связь отрицательная, т. е. оказывает стабилизирующее воздействие на работу реактора. Наиболее медленная отрицательная составляющая МОС, вероятнее всего, обусловлена разогревом топлива. Периодически повторяемая в процессе эксплуатации оценка параметров МОС является одним из способов обеспечения безопасной и надежной работы реактора.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2016

Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.

P13-2016-17

Estimation of Power Feedback Parameters of the IBR-2M Reactor by Square Wave Reactivity

Parameters of the IBR-2M reactor power feedback (PFB) are estimated based on the analysis of power transients caused by deliberate square wave reactivity when the pulsed reactor operates in the self-regulation mode. The PFB of the IBR-2M is described by three linear first-order differential equations. Two components of the PFB are responsible for the negative feedback and one, for the positive. The overall feedback is negative, i. e., it has a stabilizing effect for the operation of the reactor. The slowest negative component of the PFB is probably caused by heating of the fuel. Periodically repeated in the process of exploitation, estimation of the PFB parameters is one of the methods to ensure safety operation of the reactor.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Исследование быстрой мощностной обратной связи (МОС) реактора ИБР-2М необходимо для обоснования надежной и безопасной работы реактора. От характера этой связи зависит, будет ли реактор устойчив или перейдет в режим колебательной неустойчивости. Точные оценки параметров МОС ИБР-2М могут быть получены только после анализа переходных процессов мощности, вызванных преднамеренными периодическими колебаниями реактивности (изменения реактивности осуществляются в интервалах между соседними импульсами мощности) [1]. В результате формируются периодические колебания мощности. Энергия импульсов при этом меняется в соответствии с амплитудой введенной реактивности и характером обратной связи. Соответствующая обработка экспериментальных данных позволяет определить параметры этой связи.

В работе представлены результаты первых исследований параметров быстрой обратной связи ИБР-2М, полученные в режиме модуляции реактивности в 2015 г. Энерговывработка реактора на момент проведения измерений составляла 767 МВт · сут.

ТЕХНИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛЯЦИИ РЕАКТИВНОСТИ

Быстрая обратная связь обусловлена процессами, происходящими в активной зоне реактора при резком изменении мощности. Действие этой связи длится с момента изменения мощности в течение ~ 200 с. Из-за больших флуктуаций энергии импульсов ($\pm 20\%$) обычные методы исследований дают только качественную оценку параметров обратной связи. Точные оценки амплитуд и временных характеристик всех компонентов обратной связи, вплоть до самых коротких, действующих в пределах нескольких импульсов, могут быть получены после анализа переходных процессов, вызванных периодическими колебаниями реактивности. При этом используются симметричные прямоугольные колебания реактивности, которые формируются следующим

образом. Строго между импульсами мощности (менее чем за 0,2 с, т. е. с точки зрения формирования импульсов мощности мгновенно) осуществляются изменения реактивности с одного уровня на другой (длительность каждого полупериода равна нескольким минутам).

Смысл измерений с вводом периодических колебаний реактивности состоит в том, что реакция реактора на разовый большой и достаточно медленный скачок реактивности заменяется на реакцию, усредненную по большому числу быстрых скачков малой амплитуды. Это существенно уменьшает влияние шумов мощности на регистрируемый переходной процесс и повышает точность определения параметров МОС. Кроме того, переход на малые скачки реактивности повышает безопасность измерений.

Оценка параметров МОС осуществлялась при штатном расходе натрия через активную зону, равном $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, на следующих уровнях средней мощности: 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 МВт.

В процессе измерений регистрировались:

- положения автоматического (АР) и промежуточного (ПР) регуляторов;
- амплитуда импульса мощности с трех независимых каналов контроля мощности;
- температура теплоносителя на входе и выходе активной зоны.

Период опроса всех параметров, за исключением мощности, составлял 0,1 с. Для мощности период опроса был равен периоду повторения импульсов — 0,2 с. Измерялась энергия каждого импульса. Изменение реактивности с одного уровня на другой осуществлялось посредством перемещения стержня АР, который был выведен из контура автоматического регулирования и использовался как задатчик возмущающей реактивности. Величина вносимой стержнем АР реактивности вычислялась по характеристике «перемещение–реактивность», зарегистрированной во время физического пуска реактора [2]. Время измерения не превышало 30 мин. В результате математической обработки измеренных периодических колебаний реактивности и мощности получена импульсная переходная характеристика МОС.

В качестве единицы измерения реактивности принята так называемая импульсная доля запаздывающих нейтронов β_n [3]. Для ИБР-2М $\beta_n = 1,54 \cdot 10^{-4}$. Возмущениям реактивности r в пределах $r = \pm 0,1 \beta_n$ соответствуют относительные отклонения энергии импульсов мощности $\Delta E_n / E_n^0 \approx \pm 0,1$, где $\Delta E_n = E_n - E_n^0$ — отклонение энергии импульса E_n от его базового значения E_n^0 , в качестве которого принято среднее значение энергии импульса [4].

На рис. 1 приведен характерный вид возмущающей реактивности АР (a), суммарной реактивности АР и шума реактивности (b) и соответствующее относительное изменение амплитуды импульсов мощности (c).

Измерения показали, что переходные процессы мощности ИБР-2М симметричные. В связи с этим при построении методики обработки экспери-

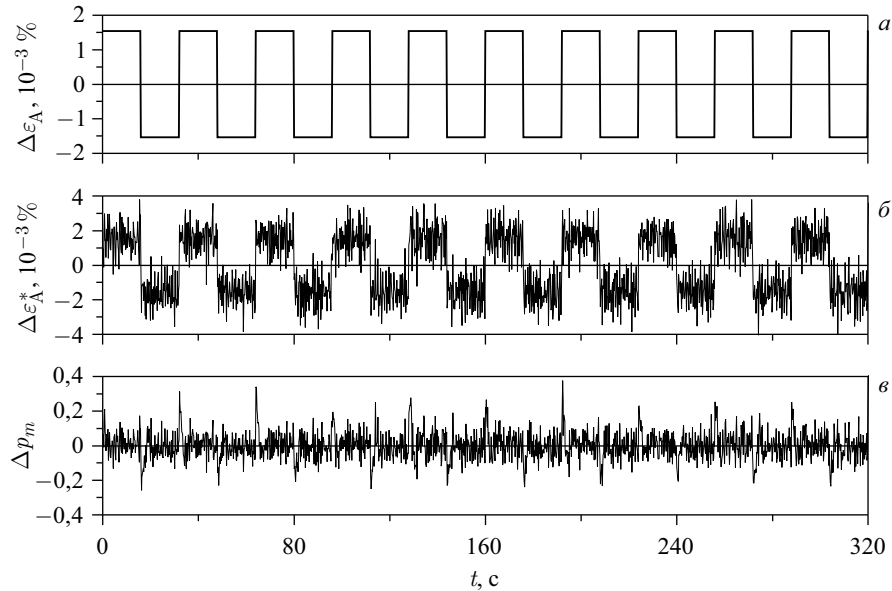


Рис. 1. Колебания реактивности и амплитуды импульсов мощности: а) прямоугольные колебания реактивности $\Delta\varepsilon_A$ амплитудой $1,54 \cdot 10^{-3} \%$, обусловленные движением AP с периодом 32 с; б) реактивность $\Delta\varepsilon_A^*$ как сумма прямоугольных колебаний $\Delta\varepsilon_A$ и шума реактивности $\Delta\varepsilon^*$ при мощности 2 МВт; в) относительное отклонение амплитуды импульсов мощности от среднего значения $\Delta p_m = (P_m - P_m^0)/P_m^0$, вызванное прямоугольными колебаниями реактивности совместно с шумом $\Delta\varepsilon^*$

ментальных данных коэффициенты передачи мощностной обратной связи ИБР-2М приняты постоянными величинами и МОС ИБР-2М в общем случае характеризуют только шесть параметров (3 постоянных времени и 3 постоянных коэффициента передачи). Соответственно, каждая из трех составляющих реактивности МОС r_{Tjn} ИБР-2М описана линейным уравнением. Кроме того, при обработке данных оказалось, что при средней мощности (менее 1,5 МВт) МОС ИБР-2М достаточно хорошо описывается одним линейным дифференциальным уравнением. Это обстоятельство учтено при анализе результатов обработки.

Для определения параметров МОС была использована специально созданная программа поиска минимума. Обработка данных заключалась в следующем. Исходный зарегистрированный переходный процесс, обусловленный прямоугольными колебаниями реактивности, приводился к усредненному периоду колебаний $\Delta E_{ин}/E_{н}^0$, в котором исходная шумовая составляющая существенно уменьшалась. Этот усредненный период колебаний с уменьшенным шумом принимался в качестве зарегистрированного переходного процесса $\Delta E_{ин}/E_{н}^0$.

Далее переходный процесс $\Delta E_{n\Delta n}/E_n^0$ вычислялся по уравнениям кинетики и МОС, представленным в виде разностных уравнений, связывающих значения переменных, соответствующих текущему (с индексом n) и предшествующему (с индексом $n - 1$) импульсу мощности [6–9]:

$$\begin{aligned}\frac{E_n}{E^0} &= \frac{E_{nn}}{E^0} + \frac{E_{\Phi n}}{E^0}, & \frac{E_{nn}}{E_n^0} &= \frac{S_n}{S^0} e^{r_n}, \\ \frac{\Delta E_{nn}}{E_n^0} &= \frac{E_{nn}}{E_n^0} - 1, & \frac{E_{\Phi n}}{E^0} &= k_{\Phi} \frac{S_n}{S^0}, \\ k_{\Phi} &= \frac{E_{\Phi}^0}{E^0} = \frac{\beta T_n}{\Delta k_{\text{ПО}} - \varepsilon_m^0} \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{e^{-\lambda_i T_n}}{1 - e^{-\lambda_i T_n}}\end{aligned}$$

(в модели динамики значение k_{Φ} принято постоянным и равным доле энергии фона от полной энергии в базовом режиме, поскольку в режиме стабилизации зависимость коэффициента k_{Φ} от реактивности пренебрежимо мала),

$$\begin{aligned}\frac{E_{nn}}{E^0} &= \frac{E_{nn}}{E_n^0} \frac{E_n^0}{E^0}, & \frac{E_n^0}{E^0} &= 1 - k_{\Phi}, \\ \frac{E_n}{E^0} &= \frac{E_{nn}}{E^0} + \frac{E_{\Phi n}}{E^0}, & \frac{\Delta E_n}{E_n^0} &= \frac{E_n}{E_n^0} - 1, \\ \frac{\Delta S_{in}}{S^0} &= \left(\frac{\Delta S_{i n-1}}{S^0} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \frac{\Delta E_{n-1}}{E^0} \right) e^{-\lambda_i T_n}, \\ \frac{\Delta S_n}{S^0} &= \sum_i \frac{\Delta S_{in}}{S^0}, & \frac{S_n}{S^0} &= \frac{\Delta S_n}{S^0} + 1, \\ \frac{E^0}{S^0} &= 1 \left/ \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{e^{-\lambda_i T_n}}{1 - e^{-\lambda_i T_n}} \right., \\ r_n &= r_{0n} + r_{Tn}, & r_{Tn} &= \sum_{j=1}^3 r_{Tjn}, \\ r_{Tjn} &= \left(r_{Tj n-1} + \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} P^0 T_n \frac{\Delta E_{n-1}}{E^0} \right) e^{-T_n/T_{Tj}},\end{aligned}$$

где $j = 1, 2, 3$ — номер составляющей МОС; E_n , E_{Φ} , E — энергия импульса мощности, энергия фона (выделяемая между импульсами) и полная энергия за период соответственно; S — суммарная интенсивность источников запаздывающих нейтронов, выраженная в единицах мощности; $\Delta S = S - S^0$,

$S_i = S_i - S_i^0$ — отклонение интенсивности источников запаздывающих нейтронов (суммарной и группы i соответственно) от базового значения; β — суммарная доля запаздывающих нейтронов; P^0 — средняя мощность реактора, МВт; T_i — период импульсов мощности (0,2 с); $\Delta k_{\text{ПО}}$ — эффективность подвижного отражателя, абс. ед.; ε_m^0 — базовое значение максимальной надкритичности на мгновенных нейтронах в импульсе реактивности, абс. ед.; $r = (\varepsilon_m - \varepsilon_m^0)/\beta_i$ — результирующая реактивность (в долях β_i), равная отклонению надкритичности от ее базового значения; r_0, r_T — составляющие результирующей реактивности r (в долях β_i): возмущающая и МОС соответственно; μ_i, λ_i — относительная доля и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i соответственно.

Значения параметров МОС подбирались из условия наилучшего приближения вычисленных переходных процессов мощности к зарегистрированным. В качестве показателя наилучшего приближения принят минимум среднеквадратического отклонения вычисленного переходного процесса от зарегистрированного $\sigma = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta E_{in}/E_n^0 - \Delta E_{iAn}/E_n^0)^2 \right]^{1/2}$. Здесь и далее индексом n помечены переменные, относящиеся к n -му импульсу мощности (N — количество импульсов мощности в переходном процессе), индексом А — отклонение энергии импульса мощности, соответствующее выбранным параметрам МОС, верхним индексом 0 — базовые значения переменных.

В качестве примера на рис. 2 показаны процессы изменения мощности, представленные одним периодом колебаний и процессом, усредненным по многим периодам.

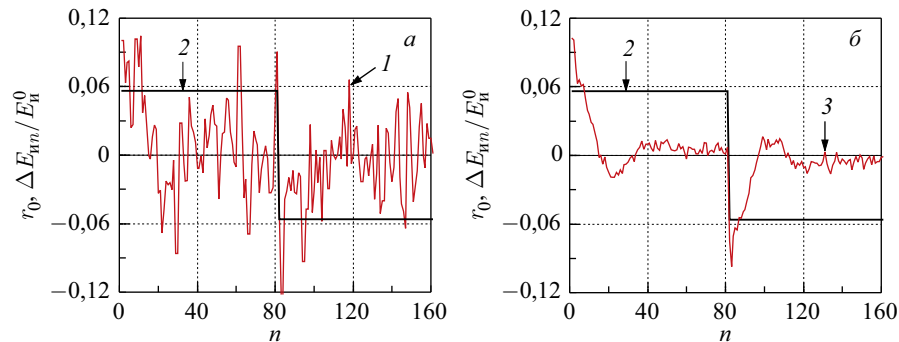


Рис. 2. Относительные отклонения энергии импульсов мощности от среднего уровня $\Delta E_n/E_n^0$ (1), обусловленные прямоугольными колебаниями реактивности (2), n — номер импульса мощности: а) процесс соответствует одному периоду колебаний мощности; б) изменение мощности, усредненное по многим периодам (3). Средняя мощность реактора 2 МВт

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИБР-2М

Использование модели МОС в виде одного линейного аperiodического звена имеет хорошие результаты при средней мощности реактора от 0,5 до 1,5 МВт. При мощности 0,5 МВт мощностная связь определяется только самой медленной компонентой МОС.

Однако при мощности 2 МВт такой простой однокомпонентной модели МОС уже недостаточно. Хорошее приближение вычисленных переходных процессов к зарегистрированным для всего диапазона средних мощностей от 0,5 до 2 МВт получается при использовании модели МОС, представленной в виде трех линейных аperiodических звеньев.

Оценка параметров МОС ИБР-2М в виде одного линейного аperiodического звена приведена в табл. 1, для трех линейных аperiodических зве-

Таблица 1. Параметры МОС ИБР-2М в упрощенной модели в виде одного линейного аperiodического звена при разных уровнях мощности

Параметр	P^0 , МВт; r_0 , β_n			
	0,5; $\pm 0,02655$	1,0; $\pm 0,0375$	1,5; $\pm 0,05$	2,0; $\pm 0,0563$
$k_T, \beta_n/\text{МВт}$	-7,62	-5,81	-6,24	-10,08
T_T , с	6,15	7,5	10,5	22,3

Таблица 2. Параметры МОС ИБР-2М в представлении трех линейных аperiodических звеньев при разных уровнях мощности

P^0 , МВт	Параметр	j		
		1	2	3
0,5	$\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-6,85		
	$k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-6,99	1,75	-1,61
	T_{Tj} , с	6,0	0,22	0,41
1,0	$\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,54		
	$k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,61	1,16	-1,09
	T_{Tj} , с	6,9	0,40	0,37
1,5	$\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,52		
	$k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,87	1,31	-0,96
	T_{Tj} , с	8,2	1,33	1,13
2,0	$\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,14		
	$k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,91	1,59	-0,82
	T_{Tj} , с	7,6	1,02	0,46

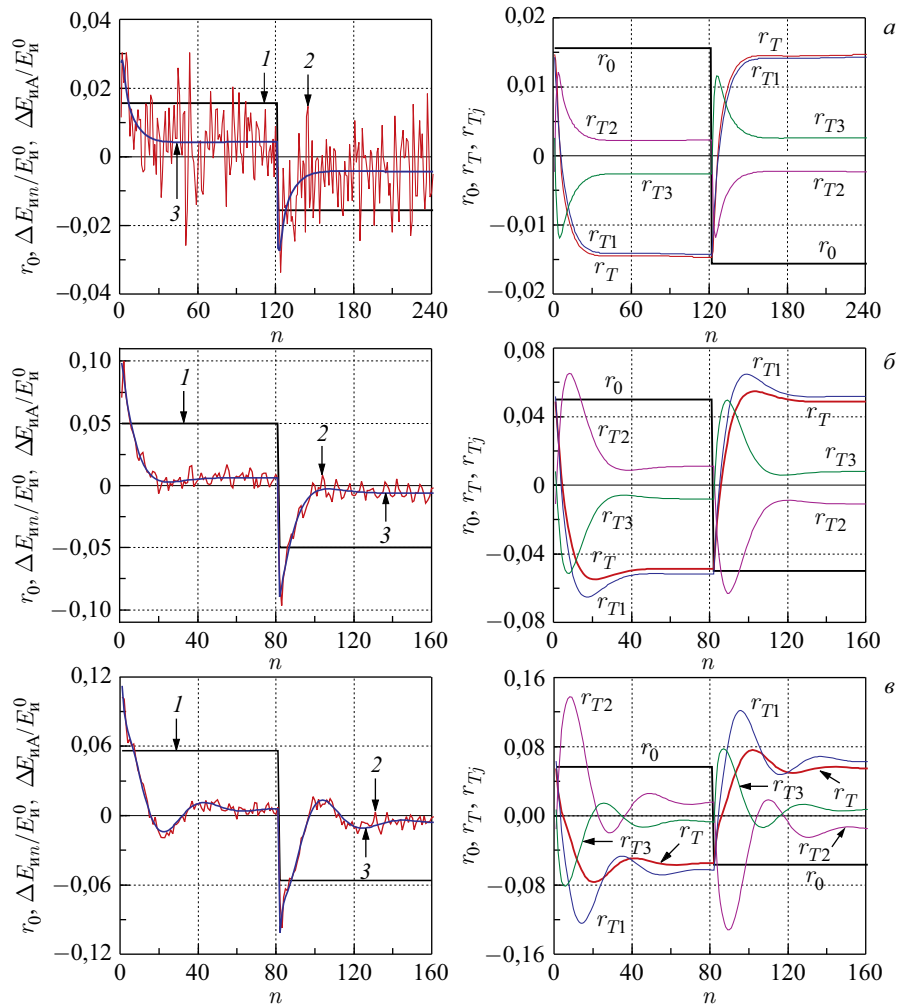


Рис. 3. Переходные процессы при прямоугольных колебаниях задающей реактивности r_0 (1) при средней мощности реактора: 0,5 МВт (а); 1,5 МВт (б); 2,0 МВт (в). Слева — периоды колебаний относительного отклонения энергии импульсов, зарегистрированного $\Delta E_n/E_n^0$ (2) и вычисленного $\Delta E_{nA}/E_n^0$ (3). Справа — задающая реактивность r_0 ; вычисленная суммарная реактивность МОС r_T и ее составляющие r_{T1} , r_{T2} , r_{T3}

ньев — в табл. 2. На рис. 3 представлены зарегистрированные и вычисленные переходные процессы, соответствующие выбранным параметрам МОС в трехкомпонентной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа переходных процессов мощности, обусловленных прямоугольными колебаниями реактивности при работе импульсного реактора в режиме саморегулирования, получены оценки параметров МОС.

Симметричные колебания реактивности в реакторе ИБР-2М вызывают симметричные колебания мощности. Это обстоятельство позволяет описать мощностную обратную связь ИБР-2М тремя линейными дифференциальными уравнениями: две составляющие МОС осуществляют отрицательную обратную связь, одна — положительную. Суммарная обратная связь отрицательная и оказывает стабилизирующее воздействие на работу реактора. Наиболее медленная составляющая МОС, вероятнее всего, обусловлена аксиальным расширением топлива при его разогреве.

Для обеспечения безопасности работы реактора необходима периодическая оценка параметров МОС в процессе эксплуатации ИБР-2М. В процессе эксплуатации ИБР-2 наблюдались существенные изменения параметров МОС. Это подтверждает важность наблюдения за изменением параметров МОС ИБР-2М.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Попов А. К.* Частотная и импульсная переходные характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р13-90-203. Дубна, 1990.
2. *Ананьев В. Д. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012.
3. *Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.
4. *Попов А. К.* Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р3-95-463. Дубна, 1995.
5. *Марачев А. А. и др.* Реактиметр импульсного реактора периодического действия ИБР-2М // АЭ. 2014. Т. 117, вып. 5. С. 249–254.
6. *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.
7. *Попов А. К.* Основы управления ядерным реактором: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 208 с.
8. *Пепельшев Ю. Н. и др.* Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М для анализа быстрых переходных процессов // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 3(194). С. 682–686.
9. *Pepeylyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Model of Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor for Study of Transient Processes in a Wide Range Change of Power // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 85. P. 488–493.

Получено 11 марта 2016 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 15.04.2016.

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

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,86. Тираж 215 экз. Заказ № 58798.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/