

P13-2025-15

А. Е. Верхоглядов, Е. П. Шабалин

**МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РЕАКТОРА ИБР-2  
НА ОСНОВЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ  
МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

Направлено в журнал «Вопросы атомной науки и техники.  
Серия: Физика ядерных реакторов»

Верхоглядов А. Е., Шабалин Е. П.

P13-2025-15

### Модель динамики реактора ИБР-2

на основе двухкомпонентной мощностной обратной связи

В ходе работ по изучению динамики реактора ИБР-2 было указано на два основных эффекта обратной связи по реактивности: удлинение столба топливных таблеток твэла и поперечный изгиб тепловыделяющих сборок. Описывается модель динамики реактора ИБР-2, учитывающая эти эффекты. Предполагается, что нестабильность динамики наступает по причине изменения амплитуды одного из эффектов, что связано с выгоранием топлива. Показано, что при определенном значении параметра выгорания динамика реактора становится неустойчивой.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Verkhoglyadov A. E., Shabalin E. P.

P13-2025-15

### Model of the Dynamics of the IBR-2 Reactor

Based on Two-Component Power Feedback

In the course of the work on studying the dynamics of the IBR-2 reactor, two main effects of reactivity feedback were indicated: the elongation of the column of fuel pellets and the transverse bending of the fuel assemblies. A model of the dynamics of the IBR-2 reactor is described that takes these effects into account. It is assumed that the instability of the dynamics occurs due to a change in the amplitude of one of the effects, which depends on fuel burnout. It is shown that at a certain value of the burnout parameter the reactor dynamics becomes unstable.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Импульсные реакторы периодического действия — это уникальные исследовательские источники нейтронов, применяемые для исследований в области физики твердого тела, ядерной физики и радиационных исследований [1]. Реактор такого типа переводится в состояние надкритичности по мгновенным нейтронам несколько раз в секунду и является сложной динамической системой с обратными связями. Надежная и безопасная эксплуатация действующего реактора ИБР-2, а также проектирование новых источников нейтронов этого типа требуют глубокого понимания физических процессов, оказывающих влияние на динамику импульсов мощности. Применяемые ранее феноменологические модели реактора, основанные на статистической обработке значений энергии импульсов, позволяют проанализировать текущее состояние реактора [2, 3]. Но прогнозировать поведение реактора в будущем, как и предсказывать оптимальную конструкцию нового реактора, эти модели не могут, поскольку не имеют в своей основе описания физических явлений.

В ходе работ по изучению динамики реактора ИБР-2 было указано на два основных эффекта обратной связи, которые должны влиять на реактивность реактора в момент очередного импульса: удлинение столба топливных таблеток твэла и поперечный изгиб тепловыделяющих сборок (ТВС). В данной работе описывается модель динамики реактора ИБР-2, учитывающая эти эффекты. Допускается, что изменение реактивности во времени, вызванное единичным импульсом мощности, складывается из отрицательной реактивности от удлинения таблеток и положительной реактивности от изгиба ТВС. Каждый из указанных эффектов является следствием термоупругих деформаций, а значит, вносимая им реактивность будет иметь временную зависимость, отвечающую температуре соответствующего элемента активной зоны. Высказано предположение, что нестациональность динамики наступает по причине изменения амплитуды одного из эффектов (удлинение топлива в твэле), что связано с выгоранием. В связи с этим предлагаемая модель динамики реактора ИБР-2, в которой обратная связь по реактивности вычисляется как сумма вкладов от предыдущих импульсов, имеет амплитуду одного из эффектов в качестве свободного параметра. Таким образом, появляется возможность продемонстрировать и оценить влияние выгорания на динамику пульсирующего реактора. В модели учитывается влияние запаздывающих нейтронов с использованием 8-группового приближения. Показано, что при определенных значениях параметра выгорания реактор устойчив к возмущениям реактивности. При превышении критического значения параметра динамика реактора переходит в состояние незатухающих колебаний энергии импульсов.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Импульсная характеристика обратной связи  $\rho(t)$  — это изменение во времени реактивности импульсного реактора, вызванное отдельным импульсом единичной мощности [3]. Функция  $\rho(t)$  является удобным инструментом для изучения динамики импульсного реактора, поскольку позволяет моделировать эволюцию импульсов мощности, а по виду графика можно судить о степени устойчивости реактора. Кроме того, импульсная характеристика может быть получена двумя независимыми способами: прямым расчетом реактивности с учетом процессов теплопередачи и термоупругости активной зоны и путем проведения эксперимента на действующем реакторе с последующей обработкой результатов измерений энергии импульсов [4, 5].

Рассмотрим импульсную характеристику  $\rho_{\text{exp}}(t)$ , полученную в результате измерений на реакторе ИБР-2 (рис. 1).

Необходимо отметить, что график на рис. 1 получен путем аппроксимации результатов обработки измерений суммой трех экспоненциальных функций:

$$\rho_{\text{exp}}(t) = \sum_{i=1}^3 \frac{k_i}{T_i} \exp\left(-\frac{t}{T_i}\right). \quad (1)$$

Здесь  $k_i$  — коэффициенты передачи;  $T_i$  — постоянные времени. Такое представление импульсной характеристики удобно для моделирования динамики импульсов [2], однако не позволяет судить о физических процессах, порождающих обратную связь. Поскольку в работе [5] не приводятся ошибки измерений, в дальнейших расчетах будем использовать значения аппроксимации  $\rho_{\text{exp}}(t)$ .

Изменение реактивности  $\rho_f(t)$  после импульса мощности, вызванное температурным расширением топлива, достаточно подробно изучено [6], и для реактора ИБР-2 расчетные значения показаны на рис. 2.

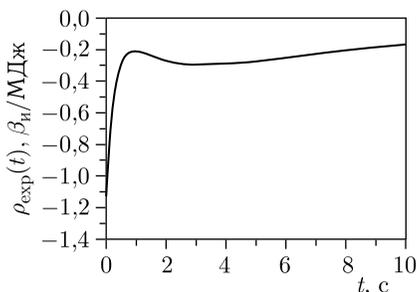


Рис. 1. Импульсная характеристика обратной связи ИБР-2 [5].  
 $\beta_i = 0,000154$

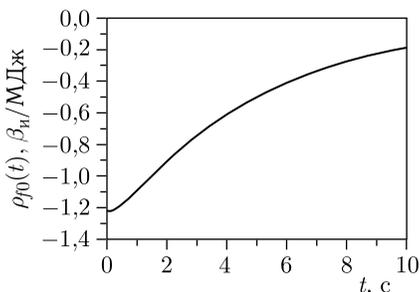


Рис. 2. Реактивность обратной связи ИБР-2 по расширению топлива [6].  
Расчет

Функция  $\rho_{f0}(t)$  была рассчитана в предположении отсутствия выгорания топлива и идеальной геометрии таблеток (без разрушения и распухания). Очевидно, что последствия деградации топлива — разрушение таблеток, застревание таблеток в канале твэла и т.п. — могут приводить только к снижению амплитуды реактивности обратной связи, поскольку при этом нарушается процесс удлинения столба таблеток как единого целого. Поэтому для модельных расчетов в данной работе будем использовать функцию  $\rho_f(t) = D\rho_{f0}(t)$ , где  $D < 1$ . Коэффициент  $D$  определяется из вида экспериментальной зависимости  $\rho_{\text{exp}}(t)$ . Поскольку в начальный момент времени реактивность обратной связи определяется исключительно расширением топлива (остальные элементы конструкции еще не успевают изменить температуру), то  $D = \rho_{\text{exp}}(0)/\rho_{f0}(0)$ . В нашем случае  $D = 0,92$ .

Реактивность, вносимая изгибом ТВС, возникает вследствие неравномерного переноса тепла от топлива на стенку корпуса ТВС. Эта реактивность положительна, так как часть ТВС, ближняя к центру активной зоны, нагревается сильнее, и изгиб направлен также к центру активной зоны. Как упоминалось выше, в начальный момент времени эффект изгиба должен быть равен нулю. Через несколько секунд после импульса изгиб ТВС также начинает убывать (подобно удлинению таблеток) вследствие охлаждения теплоносителем. Таким образом, изменение реактивности  $\rho_b(t)$  после импульса мощности, вызванное изгибом ТВС, имеет вид положительной функции с максимумом, равной нулю при  $t = 0$  и  $t \rightarrow \infty$ . В данной работе предлагается рассматривать обратную связь по реактивности как результат действия только двух описанных эффектов, поэтому найдем  $\rho_b(t)$  путем вычитания реактивности  $\rho_f(t)$  из  $\rho_{\text{exp}}(t)$ . Полученная зависимость (рис. 3) полностью удовлетворяет сделанным выше предположениям относительно вида кривой  $\rho_b(t)$ .

Обозначим энергию  $i$ -го импульса через  $Q_i$ . Она связана с количеством делений в  $i$ -м импульсе  $q_i$  очевидным соотношением  $Q_i = q_i \cdot 3 \times 10^{-11}$  Дж/дел. Для вычисления  $Q_i$  нужно знать интенсивность источников запаздывающих нейтронов  $S_i$  перед импульсом, максимальную

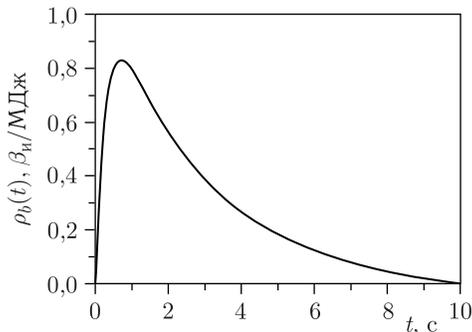


Рис. 3. Предполагаемая реактивность обратной связи ИБР-2 по изгибу ТВС

### Значения констант 8-группового приближения

№ группы	$\mu_i = \beta_i/\beta$	$T_{1/2i}, \text{ с}$	$\lambda_i, \text{ с}^{-1}$
1	0,0287	55,6	0,0125
2	0,225	24,5	0,0283
3	0,0951	16,3	0,0425
4	0,149	5,21	0,133
5	0,351	2,37	0,293
6	0,0370	1,04	0,667
7	0,0974	0,424	1,63
8	0,0168	0,195	3,55

надкритичность в импульсе  $\varepsilon$  (задается до начала расчета) и реактивность обратной связи  $r_i$ , которая учитывает влияние предыдущих импульсов на  $Q_i$ . Поскольку в модели предполагается, что в процессе выгорания топлива снижается только отрицательная обратная связь по расширению топлива, то в расчеты вводится параметр  $x$  — фактор выгорания. Этот параметр может меняться от 1 (нет выгорания) до 0 («полное» выгорание — отсутствие обратной связи по топливу). Последовательность импульсов  $Q_i$  вычисляется через рекуррентные соотношения [7]:

$$c_{ji} = (c_{ji-1} + q_{i-1}\beta_j\nu) e^{-\lambda_j T},$$

$$S_i = \sum_j c_{ji}\lambda_j, \quad (2)$$

$$r_i = \beta_i \sum_{k<i} Q_k (x\rho_f(T[i-k]) + \rho_b(T[i-k])),$$

$$q_i = S_i M(\varepsilon + r_i),$$

где  $c_{ji}$  — количество источников запаздывающих нейтронов  $j$ -й группы в  $i$ -м импульсе;  $\beta_j$  — доля запаздывающих нейтронов  $j$ -й группы;  $\nu$  — средний выход нейтронов ( $n$ ) на деление;  $\lambda_j$  — постоянная распада источников  $j$ -й группы ( $\text{с}^{-1}$ );  $T$  — период пульсаций реактора;  $M(\varepsilon)$  — фактор умножения (дел.  $\cdot$  с/ $n$ ) (см. таблицу).

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчетов динамики ИБР-2 используются следующие значения параметров [2, 8, 9]:

$T = 0,2 \text{ с}$  — период пульсаций реактора;

$\tau = 65 \cdot 10^{-9} \text{ с}$  — среднее время жизни мгновенных нейтронов;

$\nu = 2,87 \text{ н/дел.}$  — средний выход нейтронов на деление;

$\Delta K = 0,024$  — глубина модуляции реактивности;

$\beta = 0,00216$  — доля запаздывающих нейтронов;

$\beta_{\text{н}} = 0,000154$  — импульсная доля запаздывающих нейтронов.

## ФАКТОР УМНОЖЕНИЯ

Функция  $M(\varepsilon)$  для системы (2) была рассчитана в интервале  $\varepsilon \in [0,0004; 0,0014]$  путем численного интегрирования уравнений нейтронной кинетики в одноточечном приближении [7, 10]:

$$\dot{\omega}(t) = \frac{1}{\tau} \left( \omega(t)[k(t) + \varepsilon] + \frac{S(t)}{\nu} \right),$$

$$S(t) = \sum_{j=1}^8 c_j(t) \lambda_j, \quad (3)$$

$$\dot{c}_j(t) = \omega(t) \nu \beta_j - \lambda_j c_j(t),$$

$$M = \frac{1}{S(-t_b)} \int_{-t_b}^{t_b} \omega(t) dt.$$

Здесь  $\omega(t)$  — мгновенное значение мощности реактора (дел./с);  $k(t)$  — ход реактивности (рис. 4) с учетом скорости вращения основного подвижного отражателя 600 м/с;  $t_b$  — время снижения мощности реактора до фонового значения после импульса (с).

Рассчитанная зависимость  $M(\varepsilon)$  вместе с аппроксимирующей кривой представлена на рис. 5. Временной шаг при интегрировании системы (2) составлял  $10^{-9}$  с.

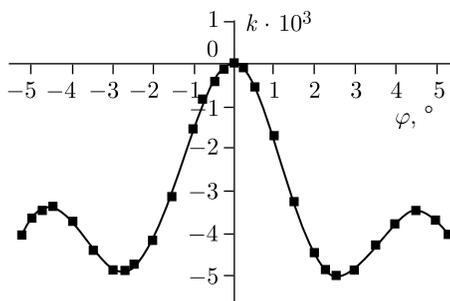


Рис. 4. Ход реактивности в зависимости от угла поворота модулятора  $\varphi$  [8]

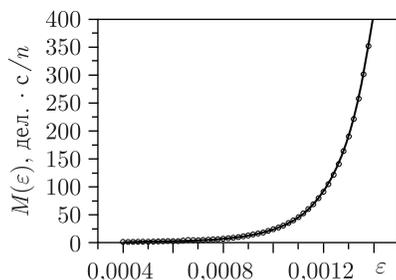


Рис. 5. Фактор умножения  $M(\varepsilon)$ . Точки — численный расчет, линия — аппроксимация

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДИНАМИКИ РЕАКТОРА

При устойчивых решениях системы (2) средние значения  $Q_i$  однозначно определяются параметром  $\varepsilon$ . В расчетах динамики значения  $\varepsilon$  выбирались исходя из номинальной мощности реактора 2 МВт, что соответствует

энергии импульса  $Q_i = 0,4$  МДж. Для проверки устойчивости решения на определенном шаге итераций вводилось возмущение — скачок реактивности величиной  $+0,1\beta_n$ . Эволюция импульсов зависит от параметра  $x$  (рис. 6–8). При  $x > 0,69$  система проявляет устойчивость, при  $x < 0,69$  — неустойчивость (колебания мощности с нарастающей амплитудой).

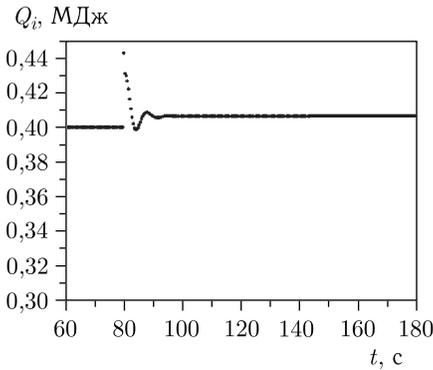


Рис. 6. Динамика импульсов при  $x = 1$

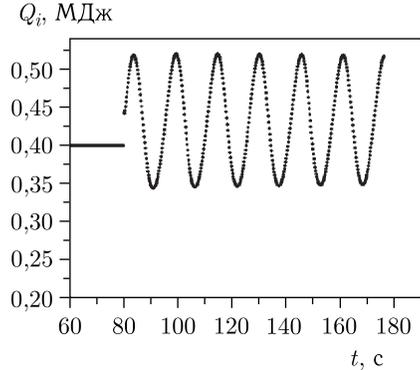


Рис. 7. Динамика импульсов при  $x = 0,69$

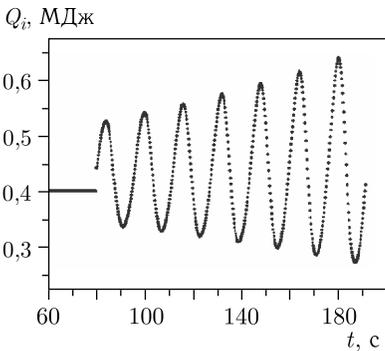


Рис. 8. Динамика импульсов при  $x = 0,67$

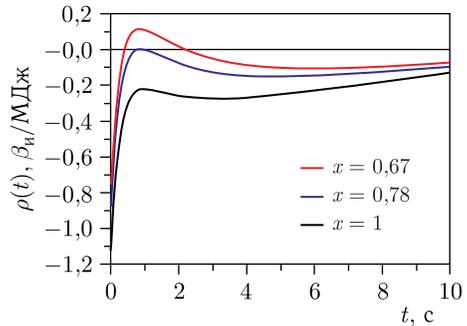


Рис. 9. Реактивность обратной связи для разных значений  $x$

На рис. 9 приведены графики импульсной характеристики обратной связи  $\rho(t)$  для разных значений параметра  $x$ .

Система, описываемая уравнениями (2), проявляет неустойчивость на определенном уровне мощности, когда кривая  $\rho(t)$  имеет положительные значения (этому соответствуют значения  $x < 0,78$ ). В качестве примера ниже приведены расчеты динамики при  $x = 0,75$  для разных значений средней мощности (рис. 10, 11).

При плавном повышении мощности на определенном уровне возникают колебания с нарастающей амплитудой.

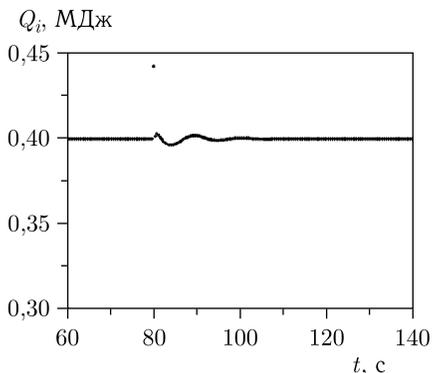


Рис. 10. Динамика импульсов при  $x = 0,75$ . Номинальная мощность

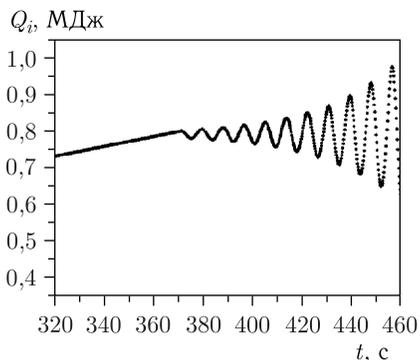


Рис. 11. Динамика импульсов при  $x = 0,75$ . Повышенная мощность

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая модель пульсирующего реактора позволяет изучать и оценивать влияние отдельных физических процессов в активной зоне на устойчивость импульсов. Представление мощностной обратной связи в виде суммы парциальных реактивностей от разных эффектов является более адекватным для исследования динамики реактора, поскольку основано на известных физических процессах в активной зоне, в отличие от трехэкспоненциального представления (1).

В данной работе использованы результаты лишь одного измерения импульсной характеристики с определенным значением мощности реактора и энерговыработки. Дальнейшее развитие модели предполагает использование экспериментальных данных, полученных в разных состояниях реактора, с обязательным учетом погрешностей измерений.

Для уточнения модели также требуются детальные расчеты каждой из компонент обратной связи: выгорание и распухание таблеток, распределение температуры по твэлу, зависание таблеток, расчет изгиба ТВС в полной геометрии. Возможно добавление в расчет реактивности новых эффектов обратной связи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
2. 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.
3. Попов А. К. Основы управления ядерным реактором. М.: МГУ, 2012.
4. Шабалин Е. П., Анцупов Н. П., Злоказов В. Б. и др. Импульсная характеристика обратной связи в ИБР-2 // АЭ. 1991. Т. 70, вып. 5. С. 326–328.

5. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при различных уровнях средней мощности. Сообщение ОИЯИ Р13-2006-101. Дубна, 2006.
6. *Верхоглядов А. Е., Верхоглядова В. Н., Вдовин Я. А., Кушницр И. В.* Расчет реактивности пульсирующего реактора с учетом термоупругих деформаций топлива // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2025 (направлено).
7. *Верхоглядов А. Е., Верхоглядова В. Н., Шабалин Е. П.* Математическая модель импульсного реактора периодического действия // АЭ. 2025. Т. 138, вып. 1–2.
8. *Ананьев В. Д., Анцупов Н. П., Виноградов А. В. и др.* Пуск и исследования основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа. Сообщение ОИЯИ Р13-2004-156. Дубна, 2004.
9. *Springs G., Campbell J., Piksaikin V.* An 8-Group Delayed Neutron Model Based on a Consistent Set of Half-Lives // Prog. Nucl. Energy. 2002. V. 41, No. 1–4.
10. *Рзянин М. В., Шабалин Е. П.* К вопросу динамики импульса мощности реактора «Нептун» — сравнение моделей расчета // ВАНТ. 2021. Вып. 1.

Получено 3 апреля 2025 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 29.04.2025.

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

Усл. печ. л. 0,6. Уч.-изд. л. 0,77. Тираж 110 экз. Заказ № 61089.

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/)