

P13-2025-51

Ю. Н. Пепелышев¹, А. В. Виноградов¹,
А. В. Долгих¹, А. Д. Рогов¹, Д. Сумхуу^{1,2},
Ц. Цогтсайхан^{1,2}

ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2М
ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ОСТАНОВА.
ДИНАМИКА РЕАКТОРА

Направлено в журнал «Атомная энергия»

¹ Объединенный институт ядерных исследований,
141980, Дубна, Россия

² Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор, Монголия

Пепельшев Ю. Н. и др.

P13-2025-51

Пуск реактора ИБР-2М после длительного останова.

Динамика реактора

Приводятся результаты исследования динамики импульсного реактора ИБР-2М, полученные в процессе первого вывода реактора на мощность после длительного останова. Даны оценки устойчивости реактора, определены перспективы его работы.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Pepelyshev Yu. N. et al.

P13-2025-51

Start-Up of the IBR-2M Reactor after a Long Stop.

Reactor Dynamics

The results of a dynamics study of the IBR-2M reactor obtained during the first reactor start-up after a long stop are presented. Estimates of the reactor's stability are given, and the prospects for reactor operation are presented.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования параметров импульсного реактора ИБР-2М, полученные при его пуске после длительного останова с октября 2021 г. по февраль 2025 г. В этот период реактор был остановлен для замены воздушных теплообменников в системе охлаждения активной зоны. Реактор эксплуатируется в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (Дубна) и используется как импульсный источник нейтронов с длительностью импульса 200 мкс и частотой повторения импульсов 5 с^{-1} для проведения физических экспериментов на выведенных нейтронных пучках. Пуск реактора проводился с 17 февраля по 7 марта 2025 г. Цель экспериментов, проводимых в процессе вывода реактора на мощность, — определение и подтверждение значений параметров реактора при работе на мощности. Особое внимание уделялось экспериментальному определению параметров динамики, имеющих важное значение в оценке динамической устойчивости реактора при изменении средней мощности. Работа реактора

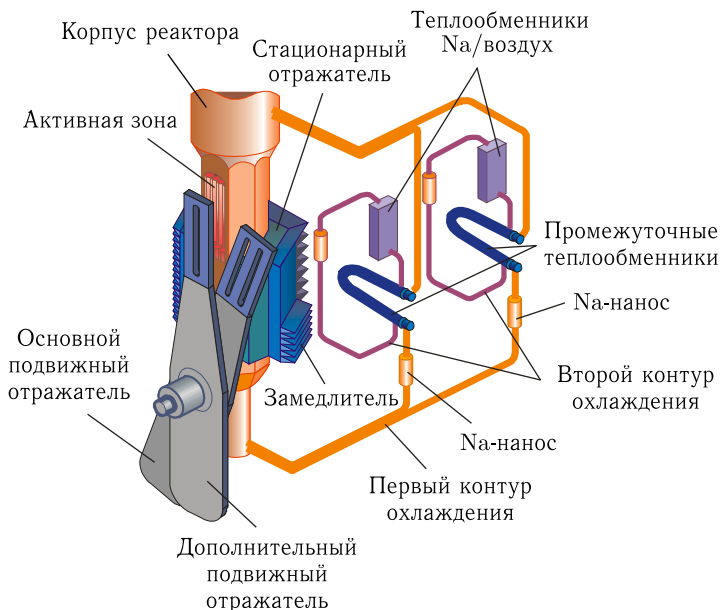


Рис. 1. Принципиальная схема корпуса реактора ИБР-2М с модулятором реактивности и системой охлаждения активной зоны

проводилась в импульсном режиме на частоте 5 Гц с расходом натрия через активную зону, равным $98 \text{ м}^3/\text{ч}$, при следующих уровнях мощности: 500, 1000, 1300, 1400 и 1500 кВт. На каждом уровне выполнялся цикл экспериментов. На начало выполнения программы вывода реактора на мощность энерговыработка реактора составляла $1830 \text{ МВт} \cdot \text{сут.}$ 17 февраля 2025 г. реактор был выведен на мощность 500 кВт. Далее мощность реактора постепенно повышалась и 3 марта 2025 г. достигла 1500 кВт. 7 марта мощность была штатно снижена до нуля. На этом работа ИБР-2М по программе пуска была закончена. Полный цикл работы реактора с 17 февраля по 7 марта назван циклом №1. Всего реактор отработал на мощности 16,9 сут и выработал $22 \text{ МВт} \cdot \text{сут.}$ Технологические системы реактора работали надежно, обеспечивая установленные режимы в заданных пределах. В ходе вывода реактора на мощность не было выявлено ни одного отказа. Описание реактора можно найти в работе [1]. Принципиальная схема охлаждения активной зоны реактора с модулятором реактивности приведена на рис. 1. Ниже приведены основные данные, полученные в процессе проведения реакторных экспериментов, ориентированных на изучение динамических характеристик реактора.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОГО МОЩНОСТНОГО ЭФФЕКТА РЕАКТИВНОСТИ (БЫСТРОГО И МЕДЛЕННОГО)

Полный мощностной эффект реактивности (реактивность мощностной обратной связи) используется для оценки запаса реактивности при выводе реактора на заданный уровень мощности. Здесь и в дальнейшем мощностной эффект обратной связи понимается как изменение вводимой реактивности за вычетом расходного и температурного эффектов реактивности, но с обратным знаком. Эффект мощностной обратной связи ИБР-2М разделяется на две части: быстрый и медленный. Быстрый мощностной эффект реактивности имеет постоянные времени менее 3 мин и обусловлен процессами, происходящими в активной зоне реактора и в ее самом ближайшем окружении. Эффекты со временем действия более 3 мин — медленные эффекты. Медленные эффекты мощностной обратной связи (МОС) обусловлены изменением состояния конструктивных элементов, окружающих активную зону, таких как тепловая и биологическая защита.

Для получения хода мощностной обратной связи ($\rho_{\text{МОС}}$), согласно [2–4], использовалось уравнение баланса реактивности относительно состояния импульсной критичности:

$$\rho_{\text{МОС}} = - \left(\sum_{i=1}^I [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})] + \rho_T + \rho_G + \rho_\beta + \rho_x \right),$$

где ρ_T , ρ_G — температурный и расходный эффекты реактивности соответственно; ρ_β — эффект энерговыработки, который в данном случае мал и им можно пренебречь; ρ_x — эффекты от шумов различного рода.

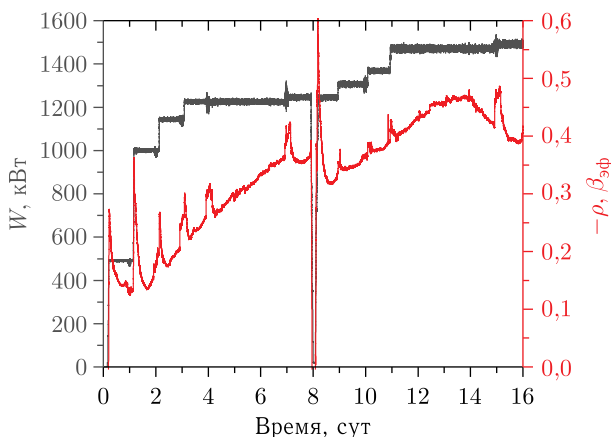


Рис. 2. Изменение мощности (W) и реактивности полной МОС (ρ) за вычетом температурного и натриевого эффектов за весь период работы реактора в цикле № 1

Известны следующие параметры:

- эффективность регулирующих органов $k_i(z_i)$;
- изотермический коэффициент реактивности k_T ;
- коэффициент k_G , учитывающий эффект расхода.

Для получения оценки меленной МОС измерялись следующие параметры:

- положение органов регулирования z_i ;
- температура натрия на входе в активную зону $T_{ВХ}$;
- расход натрия через активную зону G ;
- мощность W (МВт).

Частота опроса всех параметров составляла 10 с^{-1} , мощность — 5 с^{-1} .

На рис. 2 приведен ход изменения мощности и реактивности полной МОС в процессе работы реактора в цикле № 1.

2. МЕДЛЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Медленные эффекты МОС ИБР-2М, как видно из рис. 2, проявляются на кривой изменения реактивности в виде двух компонент: 1) спад реактивности непосредственно после подъема мощности с константой несколько часов; 2) рост реактивности с константой 15 сут. Напомним, что мощностная обратная связь — это ввод реактивности с обратным знаком.

Детальное изменение медленных мощностных эффектов спада реактивности при работе реактора в начале реакторного цикла № 1 приведено на рис. 3 и 4. Спад и подъем реактивности близок к экспоненциальной зависимости. В табл. 1 даны параметры асимптотического спада, в табл. 2 — параметры асимптотического роста реактивности МОС при некоторых уровнях мощности.

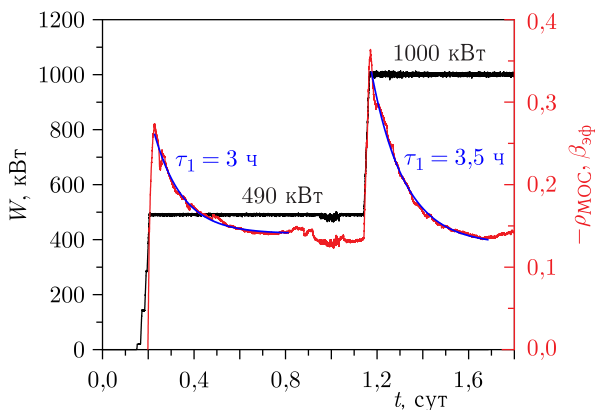


Рис. 3. Характерное изменение медленных эффектов спада мощностной обратной связи, действующих непосредственно после подъема мощности. Показан выбег реактивности (ρ) за вычетом температурного и натриевого эффектов при поэтапном подъеме мощности (W) от ~ 0 до 500 и далее до 1000 кВт. Приведены значения константы спада и роста экспоненциальной зависимости отдельных элементов мощностной обратной связи

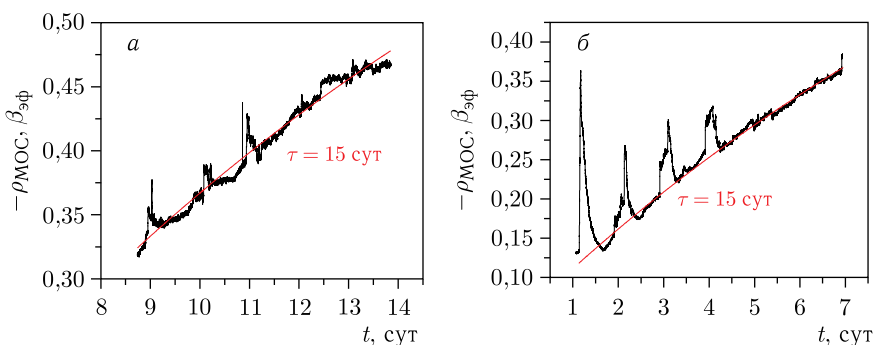


Рис. 4. Изменение реактивности медленной мощностной обратной связи ($-\rho_{\text{МОС}}$) в процессе вывода реактора на уровни мощности 1200 (а) и 1500 (б) кВт. Приведены значения временной константы экспоненциальной аппроксимации. Пики — реакция на частичный подъем мощности

Таблица 1. Значение асимптотического спада реактивности $\Delta K/K$ сразу после выхода на некоторые уровни мощности (W): ΔW — изменение мощности между уровнями, $(\Delta K/K)/\Delta W$ — изменение асимптотического спада реактивности к изменению мощности, τ — константа спада реактивности в одноэкспоненциальном приближении

W , кВт	ΔW , кВт	$\Delta K/K$, $10^{-2} \beta_{\text{эф}}$	$(\Delta K/K)/\Delta W$, $10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{МВт}$	τ , ч
0–500	500	12,9	26	3
500–1000	500	22,7	45	3,5

Таблица 2. Значение асимптотического роста реактивности $\Delta K/K$ после выхода на некоторые уровни мощности (W): ΔW — изменение мощности между уровнями, $(\Delta K/K)/\Delta W$ — изменение асимптотического медленного роста реактивности к изменению мощности, τ — константа медленного роста реактивности

W , кВт	ΔW , кВт	$\Delta K/K$, $10^{-2} \beta_{эф}$	$(\Delta K/K)/\Delta W$, $10^{-2} \beta_{эф}/\text{МВт}$	τ , сут
500–1240	740	24,5	33	15
1240–1500	260	14,5	56	

3. ИЗМЕРЕНИЕ БЫСТРОГО АСИМПТОТИЧЕСКОГО МОЩНОСТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОСТИ

Основная цель измерений — получить величину и зависимость асимптотического значения быстрого мощностного коэффициента реактивности (МКР) от мощности. Постоянные времени быстрой мощностной связи (менее 3 мин) значительно меньше скорости штатного изменения мощности (1 МВт/ч), поэтому в процессе подъема (снижения) мощности в любой момент времени реализуются квазистационарные условия по быстрому мощностному эффекту реактивности. Таким образом, ввод реактивности быстрой МОС следует практически синхронно с подъемом мощности. В предыдущем разделе на рис.3 показан ход изменения реактивности быстрой МОС в процессе подъема мощности до 500 кВт и далее до 1000 кВт. На рис.5 представлен ход реактивности быстрой МОС при штатном снижении и подъеме мощности от 1200 кВт. Средневзвешенное по изменению мощности значение МКР равно $-0,039 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{кВт}$. Значение асимптотического МКР при непрерывном изменении мощности в условиях штатного подъема составило $0,49 \beta_{эф}/\text{МВт}$. Это значение практически

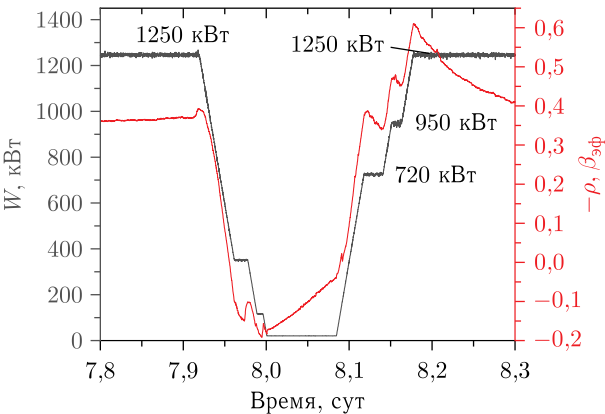


Рис. 5. Ввод реактивности быстрой МОС ($-\rho_{\text{МОС}}$) при штатном снижении, двухчасовой выдержке и штатном подъеме мощности (W) на прежний уровень 1250 кВт. По оси x — время от начала цикла

совпадает с обоснованным в отчете по безопасности ИБР-2 (ООБ) [5] значением $0,45 \beta_{эф}/\text{МВт}$.

4. ФЛУКТУАЦИИ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ

Ввиду малого значения $\beta_{имп}$ (импульсной доли запаздывающих нейтронов — эквивалента эффективной доли запаздывающих нейтронов для стационарных реакторов) шумы энергии импульсов при нормальной работе ИБР-2М велики [6, 7]. Измерение флуктуаций (шумов) энергии импульсов проводилось на всех уровнях мощности, указанных выше. Мощность, расход и температура натрия на входе в реактор во время измерений поддерживались в среднем постоянными. Реактор работал в штатном режиме автоматического регулирования (АР) мощности.

4.1. Разброс энергии импульсов. Измерения проводились следующим образом. За время ~ 2 ч регистрировались последовательные значения энергии импульсов, формируемые в виде временного ряда. Далее проводился статистический анализ временных рядов с вычислением спектральных характеристик и плотности распределения колебаний энергии импульсов. Все распределения хорошо аппроксимируются гауссовой усеченной зависимостью (рис. 6).

Для численной оценки уровня реакторных шумов использовались значения среднеквадратических относительных отклонений (иногда обозначены как «стандартные отклонения») энергии импульсов и относительный размах колебаний (величина, равная отношению разности между максимальным значением энергии импульсов и минимальным к среднему значению энергии). На рис. 7 дана зависимость среднеквадратических отклонений и полных колебаний энергии импульсов от средней мощности. Для сравнения на рис. 8 приведены данные по флуктуациям энергии импульсов реактора ИБР-2 перед его остановом на модернизацию, а также данные по шумам реактора ИБР-2М на стадии его энергетического пуска в 2011 г.

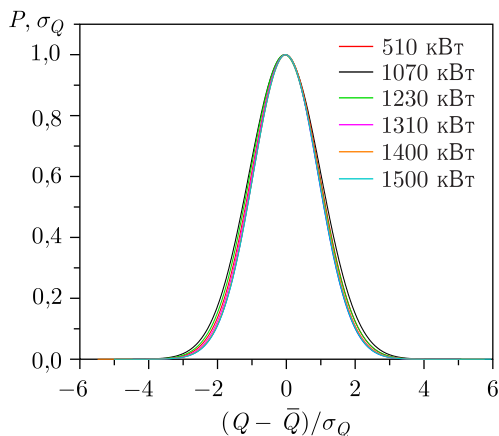


Рис. 6. Плотность распределения энергии импульсов при разных уровнях мощности в долях относительного стандартного отклонения. Кривыми показан результат аппроксимации по Гауссу. Цветом обозначены уровни мощности

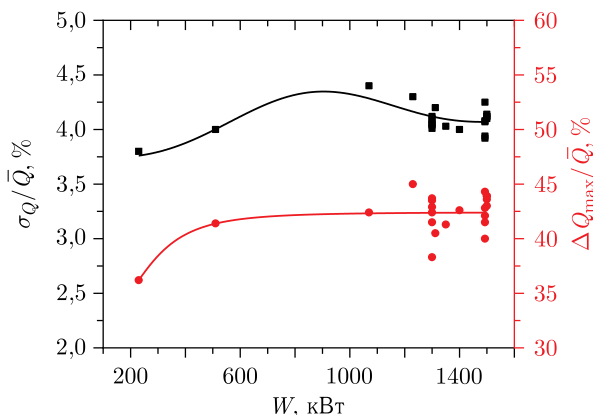
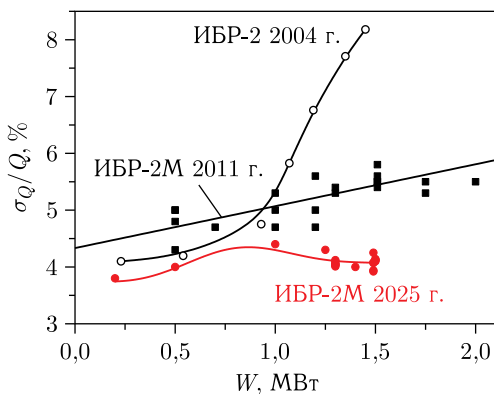


Рис. 7. Изменение относительных среднеквадратических отклонений (σ_Q/\bar{Q}) и относительного размаха колебаний ($\Delta Q_{\max}/\bar{Q}$) энергии импульсов ИБР-2М в зависимости от мощности

Рис. 8. Изменение величины относительных среднеквадратических отклонений энергии импульсов (σ_Q/Q) в зависимости от мощности. Для сравнения приведены данные для ИБР-2, полученные в 2004 г., для ИБР-2М при энергетическом пуске реактора — в 2011 г. и данные текущих измерений по ИБР-2М в цикле №1 — в 2025 г. (отмечено красной линией). Видно уменьшение колебания энергии импульсов ИБР-2М в 2025 г.



4.2. Спектральный состав колебаний энергии импульсов. Знание спектрального состава колебаний энергии импульсов необходимо для диагностики источников шумов мощности. Для ИБР-2М основным источником шумов являются осевые колебания подвижных отражателей (представлены в спектре шумов на рис. 9 в виде пиков линейчатого спектра) и так называемые низкочастотные шумы от резонансных состояний в амплитудно-частотной характеристике реактора, связанные с действием быстрых эффектов мощностной обратной связи (см. следующий раздел). На рис. 9 показано изменение спектра шумов мощности в диапазоне изменения мощности от 500 до 1500 кВт. На рис. 10 для сравнения приведены данные по спектрам шумов мощности, измеренных на ИБР-2М перед его остановом в 2021 г. и в текущем 2025 г. при одной и той же мощности — 1490 кВт. Отчетливо видно, что при общем сходстве спектров низкочастотная ком-

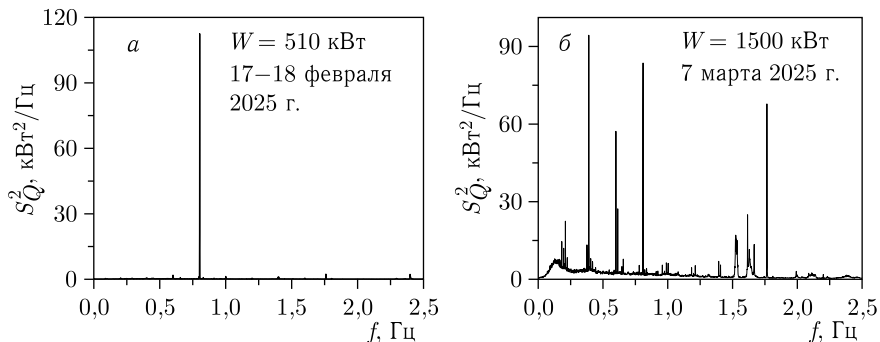


Рис. 9. Спектральная плотность колебаний мощности (S_Q) при средней мощности 500 (а) и 1500 (б) кВт, f — частота колебаний. Число точек спектральной плотности равно 2048

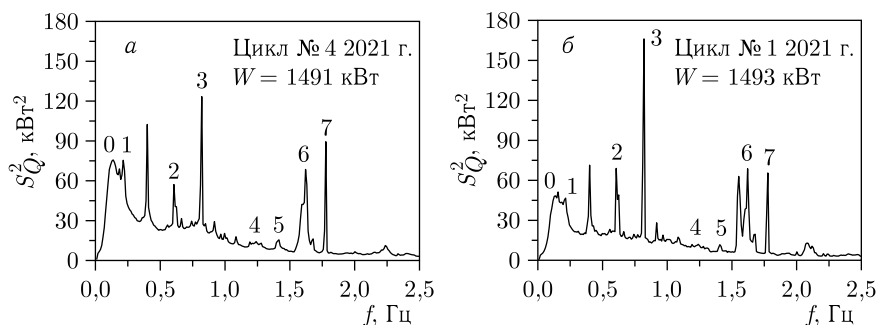


Рис. 10. Спектральная плотность колебаний мощности ИБР-2М (S_Q) при средней мощности 1490 кВт в цикле № 4 2021 г. (а) и в цикле № 1 в 2025 г. (б). Число точек спектральной плотности равно 512

понента шумов в 2025 г. стала в 1,5–2 раза меньше, но с ростом мощности низкочастотная компонента шумов возрастает.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОЙ МОЩНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ИБР-2М

Знание импульсной характеристики быстрой МОС ИБР-2М позволяет получить частотные передаточные функции реактора и их изменение в зависимости от мощности [8, 9]. Данные по быстрой МОС необходимы также для оценки запаса устойчивости реактора в разных режимах его работы. Импульсная характеристика (ИХ) обратной связи представляет собой изменение во времени (t) реактивности обратной связи r_T от единичного импульса с энергией 1 МДж:

$$r_T(t) = \sum_j \left(\frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \right) e^{-\frac{t}{T_{Tj}}},$$

где T_{Tj} — постоянные времени и k_{Tj} — соответствующие коэффициенты передачи. Сумма $\sum k_{Tj} = k_T$ есть быстрый мощностной коэффициент реактивности. Характерные времена изменения компонентов быстрой МОС составляют 1–20 с.

Импульсная характеристика быстрой МОС оценивалась из измерений переходных процессов, получаемых с помощью метода осцилляции реактивности в интервале времени 30–60 с [9]. С помощью устройств, входящих в штатную систему АСУЗ реактора ИБР-2М, перемещением стержня АР вверх-вниз создавалась периодическая модуляция реактивности прямоугольной формы с размахом до $0,08 \beta_{и}$, где $\beta_{и}$ — импульсная доля запаздывающих нейтронов. Значение $\beta_{и}$ равно $1,57 \cdot 10^{-4}$. Ввод реактивности реализуется между импульсами мощности. Период модуляции был равен 160 периодам повторения всплеск. Размах реактивности и период модуляции задавался оператором реактора.

Целью измерений являлся усредненный период колебаний мощности. После соответствующей математической обработки определялись параметры быстрой мощностной обратной связи и вид импульсной характеристики [9]. На рис. 11 показан вид переходных процессов изменения энергии импульсов мощности, полученных с помощью модуляции реактивности при некоторых уровнях мощности, а на рис. 12 — вид импульсных характеристик. В табл. 3 приведены значения суммарного коэффициента передачи МОС k_T при разных уровнях мощности.

Реактор стабилен, когда импульсная характеристика находится в отрицательной области реактивности и суммарный коэффициент передачи МОС также отрицателен [9–11]. Как видно из рис. 12 и табл. 3, эти условия в цикле № 1 полностью выполняются. При всех рассмотренных выше случаях суммарная быстрая МОС ИБР-2М в цикле № 1 отрицательная и оказывает стабилизирующее действие на работу реактора. Дополнительно с помощью модели динамики реактора были получены оценки запаса устойчивости во всем исследуемом диапазоне мощности. В качестве кри-

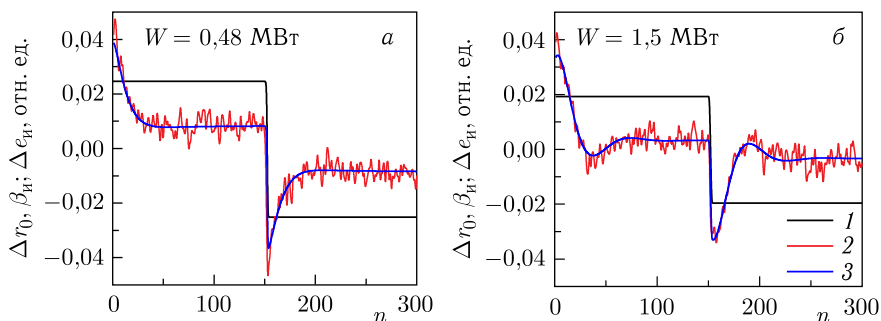


Рис. 11. Переходные процессы изменения мощности при прямоугольных колебаниях задающей реактивности r_0 (1) за период колебаний зарегистрированного $\Delta \epsilon_{и, экс}$ (2) и вычисленного $\Delta \epsilon_{и, мод}$ (3) относительного отклонения энергии импульсов мощности при средней мощности 0,5 (а) и 1,50 (б) МВт

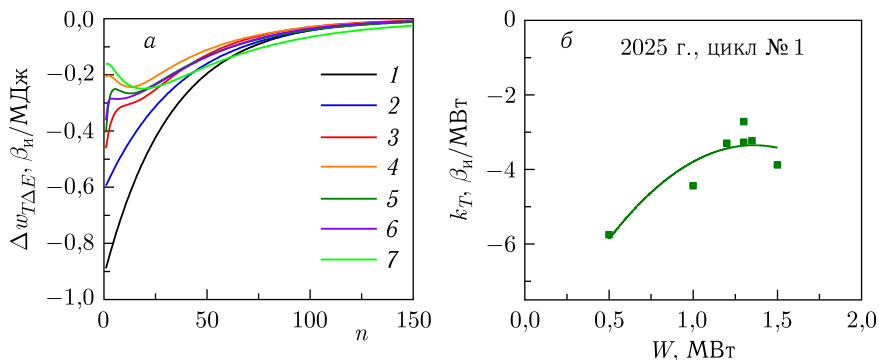


Рис. 12. Импульсная характеристика быстрой МОС в период 18 февраля – 4 марта 2025 г. после действия импульса мощности в момент времени $t = 0$, n — номер импульса при мощности 0,5 (1), 1,0 (2), 1,2 (3), 1,3 (4, 5), 1,35 (6) и 1,5 (7) МВт (а), суммарный коэффициент передачи быстрой МОС ИБР-2М в зависимости от мощности реактора (б)

Таблица 3. Параметры быстрой МОС ИБР-2М в представлении трех линейных аperiодических звеньев в период 18 февраля – 4 марта 2025 г

Дата	W , МВт	Параметр	j			$k_T = \sum k_{Tj}$, β_u / MWt
			1	2	3	
18.02.2025	0,48	$k_{Tj}, \beta_u / \text{MWt}$ $T_{Tj}, \text{с}$	-5,75 6,47	— —	— —	-5,75
19.02.2025	1,0	$k_{Tj}, \beta_u / \text{MWt}$ $T_{Tj}, \text{с}$	-4,45 7,47	— —	— —	-4,45
20.02.2025	1,23	$k_{Tj}, \beta_u / \text{MWt}$ $T_{Tj}, \text{с}$	-3,71 6,8	1,28 1,25	-0,87 0,92	-3,29
21.02.2025	1,30	$k_{Tj}, \beta_u / \text{MWt}$ $T_{Tj}, \text{с}$	-3,05 7,73	1,04 0,99	-0,71 0,82	-2,72
24.02.2025	1,30	$k_{Tj}, \beta_u / \text{MWt}$ $T_{Tj}, \text{с}$	-3,63 8,29	0,45 1,58	-0,08 0,34	-3,27
27.02.2025	1,35	$k_{Tj}, \beta_u / \text{MWt}$ $T_{Tj}, \text{с}$	-4,33 6,95	1,11 3,2	-0,01 0,12	-3,23
4.03.2025	1,5	$k_{Tj}, \beta_u / \text{MWt}$ $T_{Tj}, \text{с}$	-4,63 10,24	0,78 2,2	-0,02 0,39	-3,88

терия устойчивости использовался частотный критерий Найквиста [8, 12]. Наиболее медленная составляющая МОС ($T_{T1} \approx 8$ с) обусловлена аксиальным расширением топлива при его разогреве. Два других звена с меньшими постоянными времени, вероятнее всего, отображают изгиб топливных кассет, расширение опорной плиты, с которой связаны кассеты, и другие физические процессы, происходящие в активной зоне [8, 9, 12].

Отметим, что амплитуда низкочастотного резонанса в спектре колебаний мощности ИБР-2М (см. рис. 9) растет с уменьшением суммарного коэффициента передачи импульсной характеристики быстрой МОС (по модулю). Этот эффект наглядно проявляется на рис. 13. Зависимость запаса

Рис. 13. Изменение амплитуды колебаний энергии импульсов мощности на частоте $\sim 0,1$ Гц в зависимости от значения суммарного коэффициента передачи импульсной характеристики быстрой мощностной обратной связи в цикле № 1

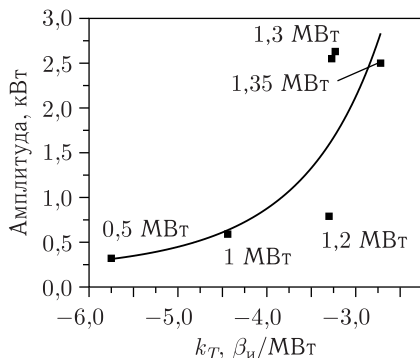
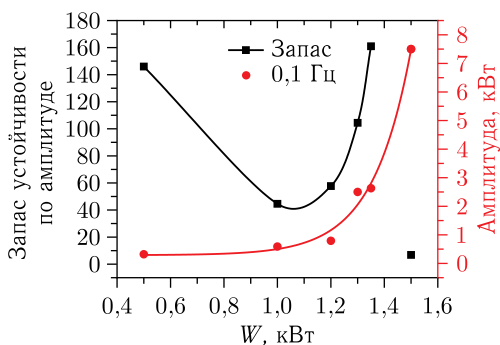


Рис. 14. Зависимость запаса устойчивости ИБР-2М в режиме саморегулирования по амплитуде колебаний на частоте $\sim 0,1$ Гц и зависимость амплитуды низкочастотных колебаний от мощности реактора



устойчивости ИБР-2М в режиме саморегулирования по амплитуде колебаний на частоте $\sim 0,1$ Гц приведена на рис. 14. Запас устойчивости в режиме саморегулирования при всех уровнях мощности, вплоть до 1500 кВт, выше единицы. Уровень низкочастотных колебаний вплоть до мощности 1500 кВт, как видно из рис. 14, существенно мал и практически не оказывает влияния на общий реакторный шум.

ВЫВОДЫ

1. Результаты пуска реактора ИБР-2М после длительного останова в режиме 5 Гц на мощности до 1,5 МВт включительно показали, что реактор и его технологические системы работают надёжно.

2. За время пуска реактор отработал на мощности 0,5–1,5 МВт 16,9 сут и выработал энергию 22 МВт·сут. За период пуска не было ни одного срабатывания или планового сброса аварийной защиты.

3. Быстрый мощностной коэффициент реактивности на всех исследованных уровнях мощности был отрицательный. Значение асимптотического МКР при непрерывном изменении мощности в условиях штатного подъёма составило $0,49 \beta_{эф}/\text{МВт}$. Это значение практически совпадает с обоснованным в ООБ [5] значением $0,45 \beta_{эф}/\text{МВт}$.

4. Флуктуации энергии импульсов мощности во всем диапазоне изменения мощности составляют: среднеквадратические — $(4,5 \pm 0,4) \%$, максимальные — $(45 \pm 5) \%$.

5. Анализ переходных процессов и поведения импульсной характеристики обратной связи показывает на устойчивость реактора во всем диапазоне изменения мощности.

6. Рекомендации по эксплуатации реактора ИБР-2М на физический эксперимент: средняя тепловая мощность до 1500 МВт при расходе натрия $98 \text{ м}^3/\text{ч}$ с возможностью увеличения после дополнительных исследований на устойчивость реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dragunov Yu. G., Tretiyakov I. T., Lopatkin A. V. et al. Modernization of the IBR-2 Pulsed Research Reactor // *Atom. Energy*. 2012. V. 113, No. 1. P. 29–34.
2. Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д. Медленные эффекты мощностной обратной связи реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2013-7. Дубна, 2013.
3. Методика вычисления параметров мощностной обратной связи в модернизированном реакторе ИБР-2. Инв. № ИБР-2/3870.
4. Методика применения баланса реактивности при измерении медленных эффектов реактивности на модернизированном реакторе ИБР-2. Инв. № ИБР-2/3874.
5. Отчет по обоснованию безопасности исследовательской ядерной установки ИБР-2. Инв. № ИБР-2/4637.
6. Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц. Исследование динамики шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М в процессе выгорания топлива. Препринт ОИЯИ Р13-2017-4. Дубна, 2017.
7. Методика измерения флуктуаций энергии импульсов мощности модернизированного реактора ИБР-2. Инв. № ИБР-2/3693.
8. 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.
9. Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D. IBR-2M Reactor Power Feedback Parameters Evaluation Using Square Reactivity Oscillations // *Atom. Energy*. 2017. V. 122, No. 2. P. 75–80; doi: 10.1007/s10512-017-0238-8.
10. Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д., Сангаа Д. Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М для анализа быстрых переходных процессов // *Письма в ЭЧАЯ*. 2015. Т. 12, № 3(194). С. 682–686.
11. Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D. Model of the IBR-2M Pulsed Reactor Dynamics for Investigating Transition Processes in a Wide Range of Power Variation // *Ann. Nucl. Energy*. 2015. V. 85. P. 488–493; doi: 10.1016/j.anucene.2015.06.002.
12. Сумхуу Д. Исследование мощностной обратной связи и ее влияния на устойчивость импульсного реактора ИБР-2М: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 2019.

Получено 26 сентября 2025 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 27.10.2025.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,81. Тираж 110 экз. Заказ № 61199.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/