

P13-2026-30

Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов, Д. Сумхуу,
Ц. Цогтсайхан, Т. С. Дикова

НАТРИЕВАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ
И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА **ИБР-2М**

Направлено в журнал “Nuclear Engineering and Technology”

Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д., Сумхуу Д., Цогтсайхан Ц., P13-2026-30
Дикова Т. С.

Натриевая обратная связь и колебательные свойства
импульсного реактора ИБР-2М

Исследовано влияние расхода натрия через активную зону на динамику, эффекты реактивности обратной связи и устойчивость импульсного реактора периодического действия ИБР-2М. На основе расчетно-экспериментальных исследований гидродинамического и быстрого расходного эффектов реактивности, спектрального анализа колебаний энергии импульсов («реакторного шума») и моделирования динамики реактора показано, что быстрый расходный коэффициент реактивности линейно зависит от мощности реактора и квадрата обратного расхода натрия через активную зону (W/G^2). Амплитуда низкочастотных (0,1–0,3 Гц) колебаний мощности возрастает как с увеличением мощности, так и с ростом расхода. Получены зависимости запаса устойчивости от расхода натрия. Область устойчивой работы реактора с минимальными колебаниями энергии импульсов соответствует диапазону расхода 95–99 м³/ч. Результаты позволяют оптимизировать режим работы ИБР-2М для повышения надежности и безопасности.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2026

Pepelyshev Yu. N., Rogov A. D., Sumkhuu D., Tsogtsaikhan Ts., P13-2026-30
Dikova T. S.

Sodium Feedback and Oscillatory Properties
of the IBR-2M Pulsed Reactor

The influence of the sodium flow rate through the core on the dynamics, reactivity feedback effects, and stability of the IBR-2M periodic pulsed reactor was studied. Using computational and experimental investigations of the hydrodynamic and fast flow-induced reactivity effects, spectral analysis of pulse energy fluctuations (reactor noise), and reactor dynamics modeling, it was demonstrated that the fast flow coefficient of reactivity is linearly dependent on the reactor power and on the square of the reciprocal sodium flow rate through the core (W/G^2). The amplitude of low-frequency (0.1–0.3 Hz) power fluctuations increases with both power and flow rate. The dependence of the stability margin on the sodium flow rate was obtained. The region of stable reactor operation with minimal pulse energy fluctuations corresponds to a flow rate range of 95–99 м³/h. These results enable optimization of the IBR-2M operating regime to enhance reliability and safety.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор периодического действия ИБР-2М работает в Дубне в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ для проведения экспериментов на выведенных нейтронных пучках. Номинальная мощность реактора при частоте повторения импульсов, равной 5 с^{-1} , составляет 2 МВт, длительность импульсов 200 мкс. Периодические импульсы мощности вызывают периодические эффекты реактивности обратной связи (МОС) длительностью 0,5–10 с. Эти эффекты существенно влияют на динамику реактора, особенно на его резонансные свойства. Быстрая МОС во многом зависит от мощности реактора, энерговыработки и расхода натрия через активную зону [1]. Расход натрия с самого начала эксплуатации ИБР-2М был установлен постоянным и равным $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, поэтому параметры МОС достаточно подробно исследовались только в плоскости двух переменных «мощность–энерговыработка» [2–7]. В работе представлены результаты дальнейших расчетно-экспериментальных исследований динамики реактора, связанных с влиянием расходных эффектов реактивности на устойчивость реактора. Эти знания необходимы для оценки безопасной работы реактора при изменении расхода натрия через активную зону как случайного характера, так и при переходе на новый уровень.

1. НАТРИЕВЫЕ РАСХОДНЫЕ ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ИБР-2М

Выявить какие-либо закономерности в поведении реактора в условиях нестационарной динамики, которые позволили бы обобщить динамические свойства реактора, связанные с расходом натрия через активную зону, и сделать прогноз на будущее, представляется чрезвычайно сложной задачей. Действие всех эффектов реактивности, в том числе и расходных, в конечном итоге отражается на колебаниях энергии импульсов: их величине и спектральном составе. Здесь и в дальнейшем понятие *колебания энергии импульсов* аналогично понятию *колебания мощности*, поскольку быстрые отклонения мощности рассматриваются как энерговыделение за период. Исследование шумов дает возможность выявить различные закономерности в шумах, если они есть, и оценить их динамику и связь с эффектами МОС. Это один из путей исследования параметров обратной связи, вызванной расходными эффектами реактивности (РЭР). Второй путь — исследование динамики реактора с помощью модели, в которой параметры МОС определяются экспериментально [2]. Оба пути исследования динамики реактора требуют знания исходных (базовых) параметров расходных эффектов реактивности.

Под расходным эффектом реактивности понимается изменение реактивности при изменении расхода натрия через активную зону. Кратко дадим некоторые общие пояснения.

При резком изменении расхода натрия в активной зоне ИБР-2М происходит следующее:

1. Быстрый во время изменения расхода гидродинамический толчок на топливные кассеты. При уменьшении расхода — это схлопывание кассет к центру активной зоны. Характерные времена 1–6 с.

2. Далее происходит быстрый неоднородный подогрев топлива и натрия, находящегося в активной зоне, затем искривление твэлов и топливных кассет, смещение разогретого натрия по оси активной зоны, разогрев корпуса активной зоны и его смещение относительно стационарных отражателей. Характерные времена 0,5–60 с.

3. Затем происходит подогрев активной зоны натрием, поступающим после круга циркуляции по первому контуру системы охлаждения в активную зону. После чего температурные изменения в активной зоне начинают стабилизироваться. Характерные времена 300 с и более.

Для обеспечения безопасной работы реактора важно знать два первых быстрых расходных эффекта. В дальнейшем под термином *расход натрия через активную зону* в тексте используется сокращение *расход* или *расход натрия*. Численным выражением каждого из двух быстрых компонентов расходного эффекта является расходный коэффициент реактивности, определяемый как значение РЭР при скачкообразном изменении расхода при постоянной мощности реактора и температуре натрия на входе в активную зону, отнесенное к изменению расхода, т. е.

$$\frac{dK}{dG} = \left(\frac{dK}{dG} \right) |_{W, T = \text{const.}}$$

1.1. Гидродинамический (ГЭР) и быстрый расходный эффекты реактивности (БРЭ). На рис. 1 показано изменение реактивности в зависимости от времени при скачках расхода через активную зону при номинальном уровне мощности 2 МВт. Отчетливо видно, что скачок расхода вначале вызывает быстрый скачок реактивности, а далее следует формирование основного быстрого натриевого эффекта, выходящего на асимптотику приблизительно через 1 мин (БРЭ). На рис. 2 показана зависимость ГЭР от расхода натрия, измеренная в стационарном режиме при «нулевой» мощности (без вращения модулятора реактивности).

Как видно из рис. 1 и 2, ГЭР отрицателен (при повышении расхода реактивность уменьшается) и в зависимости от расхода приблизительно описывается параболой

$$\Delta K_{\text{ГЭР}} = \gamma G^2,$$

где $\gamma = -(6,24 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$, $10^{-2} \beta_{\text{эф}} / (\text{м}^3/\text{ч})^2$, $[G] = \text{м}^3/\text{ч}$. Полное значение ГЭР при изменении расхода ступенями от режима холостого хода до номинального $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ равно

$$\Delta K_{\text{ГЭР}} = -(6,24 \pm 0,20) \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}.$$

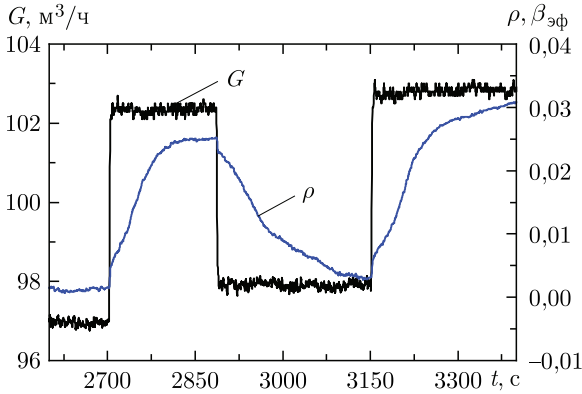


Рис. 1. Изменение реактивности ($\rho, \beta_{эф}$) в зависимости от времени (t, c) при скачках расхода ($G, m^3/ч$) при номинальной мощности 2 МВт и начальном расходе натрия через активную зону $\sim 100 m^3/ч$. Автоматический регулятор включен

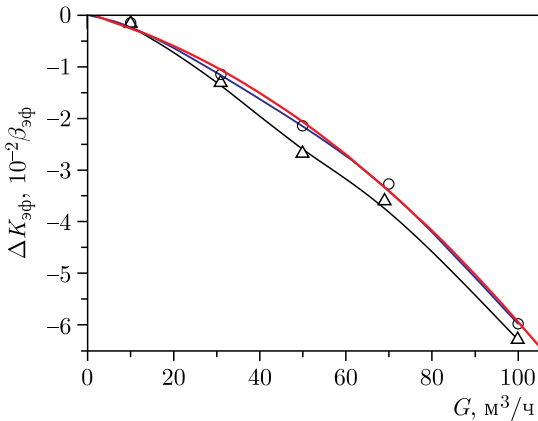


Рис. 2. Изменение ГЭР в зависимости от расхода натрия через активную зону в критическом по запаздывающим нейтронам состоянии в стационарном режиме работы реактора (модулятор реактивности заторможен): Δ — повышение, \circ — понижение расхода

Гидродинамический коэффициент реактивности (ГКР)

$$ГКР = \frac{dk}{dG} = -1,2 \cdot 10^{-3} \cdot G, \quad 10^{-2} \beta_{эф} / (m^3/ч), \quad [G] = m^3/ч$$

при номинальном значении расхода равен $dk/dG = -0,12 \cdot 10^{-2} \beta_{эф} / (m^3/ч)$. Из-за отсутствия гистерезиса гидродинамический коэффициент с ростом или уменьшением расхода ведет себя единым образом. Природа данного эффекта есть смещение тепловыделяющих сборок (ТВС) при их «расталкивании» потоком натрия (топливные кассеты внизу закреплены цанговыми

захватами, вверху могут свободно перемещаться в потоке натрия в пределах межкассетных зазоров).

Полный гидродинамический эффект реактивности, вызванный изгибами всех топливных кассет, равен $\Delta K_{ГЭР} = -(6,24 \pm 0,20) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$. Средний ГЭР на одну кассету (65 ТВС) и на один твэл (7 твэлов на ТВС) в абсолютных единицах реактивности равен $2,1 \cdot 10^{-6}$ а.е.р./(на одну кассету) и $3,0 \cdot 10^{-7}$ а.е.р./(на один твэл). Видно, что изгибные эффекты для отдельной кассеты или тем более твэла ИБР-2М находятся в области, недоступной ни измерению, ни расчету.

1.2. Быстрый расходный эффект реактивности (БРЭ). В данном пункте рассматривается основной компонент быстрого расходного эффекта, который для простоты изложения представлен как *расходный эффект*. Установившийся коэффициент размножения как функция внутреннего теплового и гидродинамического состояния реактора может быть представлен в терминах двух независимых переменных: мощности реактора и расхода теплоносителя [1]. Расходный коэффициент реактивности можно представить в виде

$$\left(\frac{\Delta K}{\Delta G}\right)_W = c - b \frac{W}{G^2},$$

где $c = -0,228 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/(\text{м}^3/\text{ч})$, $b = 1,187 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/(\text{м}^3/\text{ч})/[\text{кВт}/(\text{м}^3/\text{ч})]^2$.

Быстрый расходный коэффициент $(\Delta K/\Delta G)_W$, измеренный при высоком уровне мощности от 500 кВт до 2 МВт, в зависимости от обобщенного параметра (W/G^2) представлен на рис. 3.

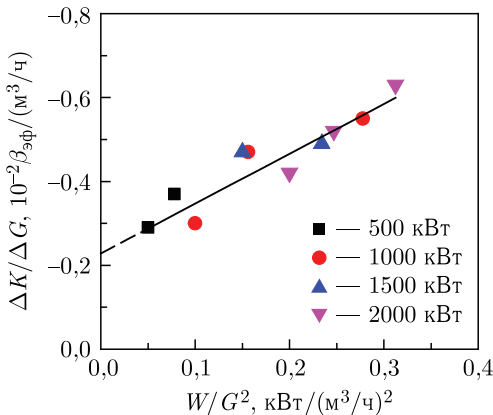


Рис. 3. Быстрый расходный коэффициент реактивности $(\Delta K/\Delta G)$ в зависимости от мощности реактора и квадрата обратного расхода натрия через активную зону (W/G^2)

2. РЕАКТОРНЫЙ ШУМ И РАСХОД НАТРИЯ ЧЕРЕЗ АКТИВНУЮ ЗОНУ

Чтобы разобраться в том, какие колебания энергии импульсов необходимо учитывать при изучении динамики реактора и ее связи с параметрами расходного эффекта реактивности, разделим полные колебания мощности ИБР-2М по их характерным особенностям [8].

1. Колебания мощности от действия случайных возмущений реактивности. Действуют при любой мощности, но заметны только при мощности выше ~ 1 кВт;

2. Колебательная нестабильность. Проявляется как колебания энергии импульсов на низкой частоте 0,1–0,3 Гц. Связана с резонансными свойствами активной зоны. Зависит от множества реакторных параметров.

Спектральный состав колебаний энергии импульсов при работе ИБР-2М на мощности можно представить в виде двух компонентов [9]:

- линейчатый спектр S_{lin} (в основном представлен осевыми колебаниями подвижных отражателей гармонического типа);
- низкочастотные шумы от резонансных состояний в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) реактора S_{rez} , вызванные действием быстрых эффектов мощностной обратной связи.

Структура низкочастотных шумов резонансного типа в спектре колебаний энергии импульсов выделялась в виде так называемой базовой линии $S_{\text{rez}} = |S_X^{(i)}(f)|^2 - S_{\text{lin}}$ [9]. Ниже представлены некоторые данные по колебаниям энергии импульсов. На рис. 4 показана спектральная плотность колебаний энергии импульсов при работе реактора на мощности 0,5 и 1,5 МВт. Характерное изменение базового компонента в спектре колебаний энергии импульсов в зависимости от расхода натрия через активную зону при постоянной мощности 1450 кВт показано на рис. 5. На рис. 6 приведено изменение среднеквадратических отклонений энергии импульсов в зависимости от времени работы реактора в отдельном реакторном цикле.

Из представленных рисунков отчетливо видно, что амплитуда резонанса растет с мощностью и растет с расходом натрия через активную зону.

Колебания мощности при изменении расхода формируются в две группы. Одна группа с расходом 95–98 м³/ч, вторая — 104–108 м³/ч. Рост колебаний энергии импульсов в отдельном реакторном цикле имеет асимп-

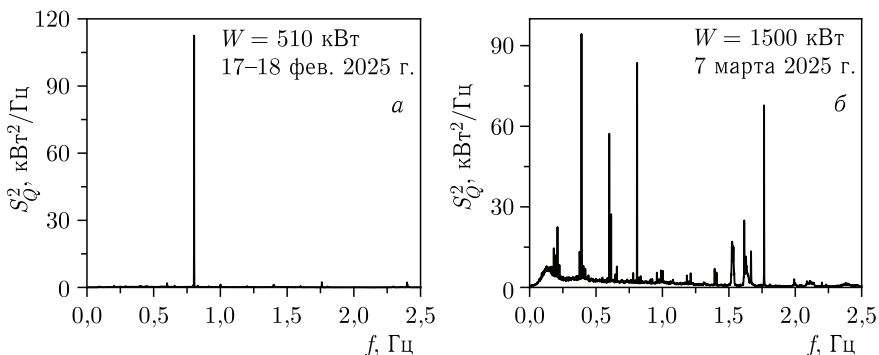


Рис. 4. Спектральная плотность колебаний мощности (S_Q) при 500 (а) и 1500 кВт (б), f — частота колебаний

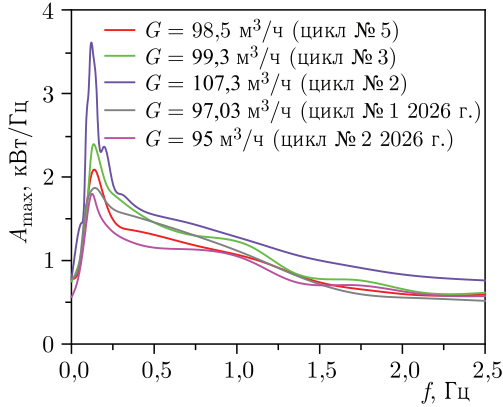


Рис. 5. Изменение базового компонента в спектре колебаний мощности ИБР-2М в цикле при постоянной мощности 1450 кВт, но разным расходе

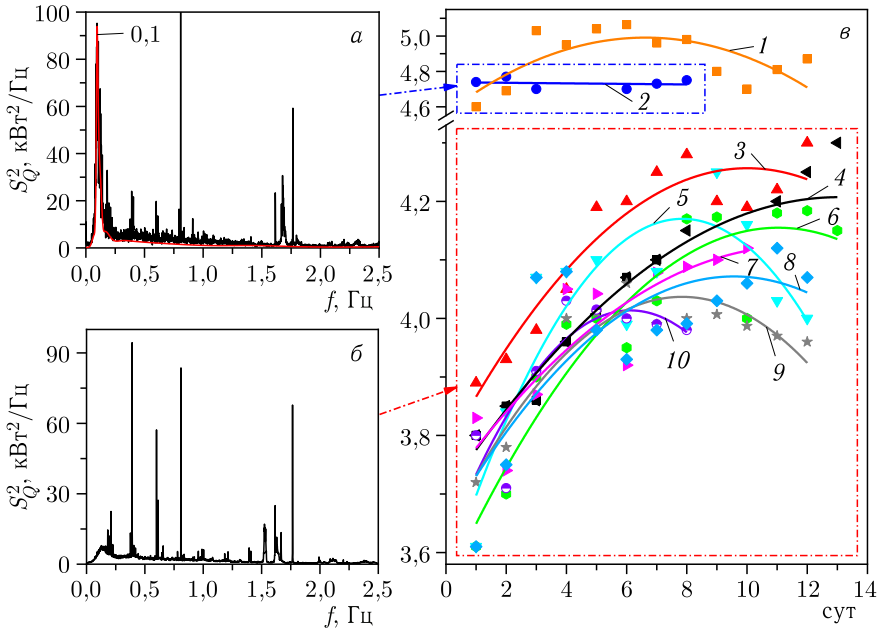


Рис. 6. Изменение относительных среднеквадратических отклонений энергии импульсов ИБР-2М в зависимости от времени работы реактора в отдельных реакторных циклах при некоторых значениях расхода натрия через активную зону. Слева показана спектральная плотность колебаний мощности. Аппроксимационные линии: 1 — цикл № 2 2021 г., $G = 104 \text{ м}^3/\text{ч}$; 2 — цикл № 2 2025 г.; 3 — цикл № 3 2025 г.; 4 — цикл № 4 2025 г.; 5 — цикл № 7 2025 г.; 6 — цикл № 5 2025 г.; 7 — цикл № 6 2025 г.; 8 — цикл № 3 2026 г., $G = 97 \text{ м}^3/\text{ч}$; 9 — цикл № 1 2026 г., $G = 97 \text{ м}^3/\text{ч}$; 10 — цикл № 2 2026 г., $G = 96 \text{ м}^3/\text{ч}$

тотический характер со стабилизацией колебаний через 6–8 сут и с последующим снижением уровня колебаний.

В следующем разделе рассматривается динамическое состояние реактора в плоскости изменения «мощность–энерговыводка» при постоянном в среднем номинальном расходе натрия через активную зону, равном $100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

3. ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В ИБР-2М ПРИ ПОСТОЯННОМ РАСХОДЕ НАТРИЯ ЧЕРЕЗ АКТИВНУЮ ЗОНУ $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. ПОЯСНЕНИЯ К МОДЕЛИ ДИНАМИКИ

Динамика реактора и его устойчивость к автоколебаниям подробно изучалась при постоянном в среднем расходе натрия через активную зону с помощью модели динамики реактора в плоскости изменения «мощность–энерговыводка» [2–7, 10–16]. Расходные эффекты учитывались в модели, но при постоянном расходе их влияние на динамические свойства обратных связей было незначительным. В разделе приведены базовые данные по динамике ИБР-2М при постоянном расходе натрия через активную зону.

Кратко рассмотрим модель динамики ИБР-2М. Импульсные реакторы периодического действия с точки зрения динамики можно рассматривать как динамические дискретные системы автоматического регулирования (АР) [12–14]. Динамика ИБР-2М функционально является сложной системой: нелинейная, нестационарная, дискретная (импульсная), стохастическая (зависит от реакторных шумов). Базовый блок в модели динамики — блок кинетики — известен и описан достаточно хорошо. Блок автоматического регулирования также хорошо известен и описан [12–14]. Входные параметры системы — воздействие реактивности — представлены в системе в виде нескольких составляющих: изменение реактивности со стороны блоков системы управления и защиты реактора (известно подробно), случайное изменение реактивности от вибраций подвижных отражателей, третья вызвана дрожанием кассет в активной зоне (определяется экспериментально по колебаниям энергии импульсов) и четвертая — моделирование реактивности любой формы. Модель динамики ИБР-2М полностью отражает все переходные и частотные свойства реактора. Параметры быстрой мощностной обратной связи определяются экспериментально [2]. Вид модели при экспериментальном определении параметров МОС показан на рис. 7. Суммарное воздействие всех компонентов МОС на динамику реактора представлено в виде импульсной характеристикой МОС, т. е. изменения реактивности при воздействии единичного импульса мощности.

При всех режимах работы реактора параметры МОС ИБР-2М в общем случае описываются тремя слагаемыми следующим образом:

$$w_{rE} = \sum_{j=1}^3 \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \exp\left(-\frac{t}{T_{Tj}}\right), \quad \beta_{и}/\text{МДж}, \quad t - \text{время, с,}$$

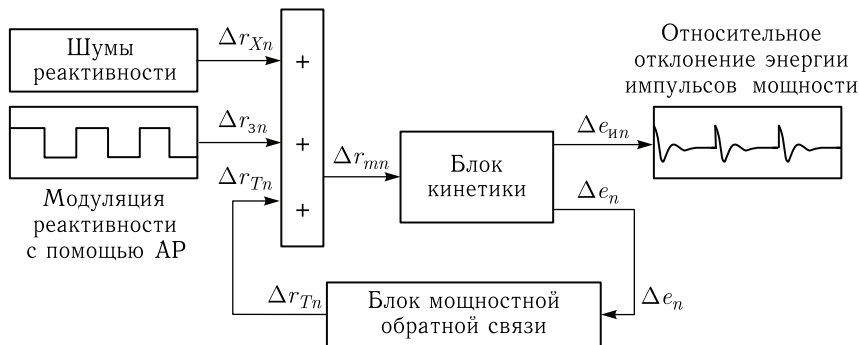


Рис. 7. Модель динамики реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования при экспериментальной оценке параметров быстрой МОС с помощью модуляции реактивности

$$\Delta r_{Tn} = \sum_{j=1}^3 \Delta r_{Tjn}, \quad \Delta r_{Tjn} = \left(\Delta r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \right) \exp \left(-\frac{T_n}{T_{Tj}} \right),$$

где Δr_{Tn} и Δr_{Tjn} — суммарная реактивность МОС и ее j -е составляющие, соответствующие n -му импульсу мощности в долях ($\beta_n = 1,57 \cdot 10^{-4}$); k_{Tj} , T_{Tj} — коэффициент передачи в $\beta_n/\text{МВт}$ и постоянная времени в секундах j -й составляющей МОС ($j = 1, 2, 3$) соответственно; ΔE_n — отклонение полной энергии за период n -го импульса мощности от базового значения; T_n — период импульсов мощности ($T_n = 0,2$ с).

На рис. 8 приведены данные по изменению импульсной характеристики МОС и вида соответствующей ей амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ИБР-2М при некоторых значениях мощности реактора.

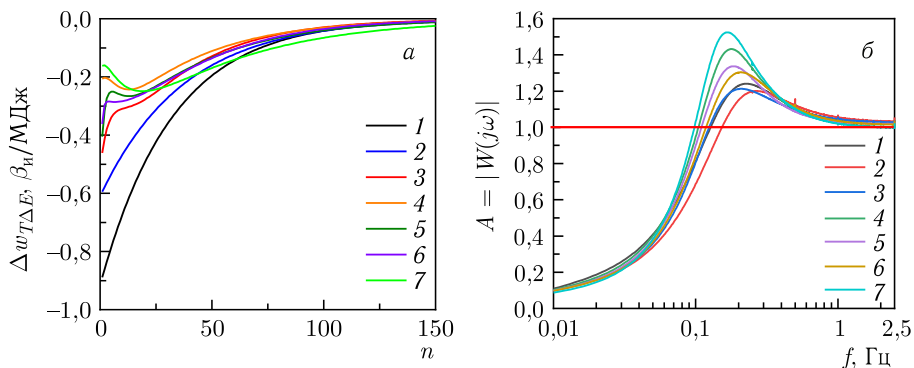


Рис. 8. Изменение формы импульсной характеристики быстрой МОС ИБР-2М (а) и соответствующее изменение амплитудно-частотной характеристики реактора при постоянном расходе натрия через активную зону, равном $98 \text{ м}^3/\text{ч}$, при некоторых уровнях мощности: 0,5 (1); 1,0 (2); 1,2 (3); 1,3 (4, 5); 1,35 (6) и 1,5 МВт (7) (б)

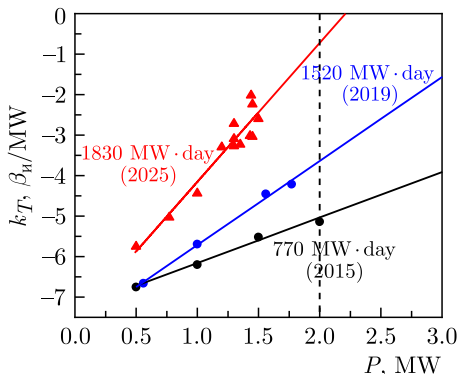


Рис. 9. Изменение суммарного коэффициента передачи МОС от мощности реактора при некоторых значениях энерговыработки при расходе натрия через активную зону, равном номинальному $100 \text{ м}^3/\text{ч}$

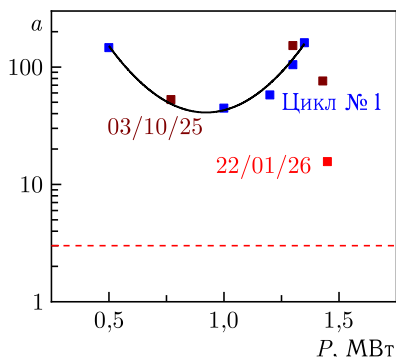


Рис. 10. Зависимость запаса устойчивости ИБР-2М по амплитуде низкочастотных колебаний энергии импульсов 0,1 Гц по критерию Найквиста от мощности в режиме саморегулирования. Штриховой линией показан допустимый уровень устойчивости, равный трем. Как видно, реактор существенно устойчив

На рис. 9 приведены обобщенные данные по изменению суммарного коэффициента передачи быстрой МОС при изменении мощности и энерговыработки реактора. Соответствующее изменение запаса устойчивости ИБР-2М, оцененное с помощью критерия Найквиста для низкочастотных колебаний в области 0,1 Гц, приведено на рис. 10.

4. ДИНАМИКА ИБР-2М С УЧЕТОМ РАСХОДНЫХ ЭФФЕКТОВ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ВБЛИЗИ НОМИНАЛЬНОГО УРОВНЯ РАСХОДА $100 \text{ м}^3/\text{ч}$

Исследования влияния расходного эффекта реактивности на динамику реактора проводились при небольшом изменении расхода в пределах

12 м³/ч вблизи номинального уровня 100 м³/ч при мощности 1450 кВт. Измерялась импульсная характеристика обратной связи в зависимости от расхода натрия.

В работах [2, 5, 7] довольно подробно было показано, что математическая экспоненциальная форма отдельных компонентов импульсной характеристики соответствует наблюдаемой на практике такой же экспоненциальной зависимости. Три компонента импульсной характеристики МОС, регистрируемых на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М после действия импульса мощности, соответствуют следующим деформациям кассет и твэлов: первый основной отрицательный компонент — аксиальное расширение кассет (твэлов), второй положительный — изгиб кассет к центру активной зоны за счет градиента энерговыделения по радиусу зоны и третий отрицательный — изгиб кассет от центра активной зоны к периферии за счет ударного толчка натрия при его импульсном нагреве. Это наиболее вероятный сценарий развития быстрых обратных связей после действия импульса мощности. Вид отдельных компонентов импульсной характеристики, измеренных при некоторых уровнях расхода натрия через активную зону, представлен на рис. 11.

Из рис. 11 видно, что суммарное воздействие второго и третьего компонентов быстрой мощностной обратной связи всегда положительно (или равно нулю). Таким образом, основным фактором стабилизации работы реактора остается эффект линейного расширения зоны после воздействия импульса мощности.

С помощью модели динамики определялись суммарный коэффициент передачи МОС, запас устойчивости по амплитуде (по критерию Найквиста) и показатель колебательности реактора на частоте ~ 0,1 Гц (превышение амплитуды резонанса в АЧХ реактора над единицей) в зависимости от расхода теплоносителя. Все указанные эффекты представлены на рис. 12,

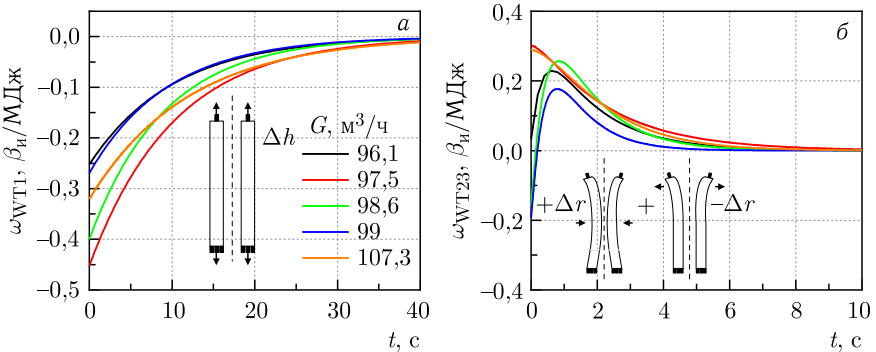


Рис. 11. Первый основной компонент импульсной характеристики МОС ИБР-2М, вызванный аксиальным расширением топлива (а), и сумма второго и третьего компонентов (б) при некоторых уровнях расхода натрия при постоянной мощности 1,45 МВт

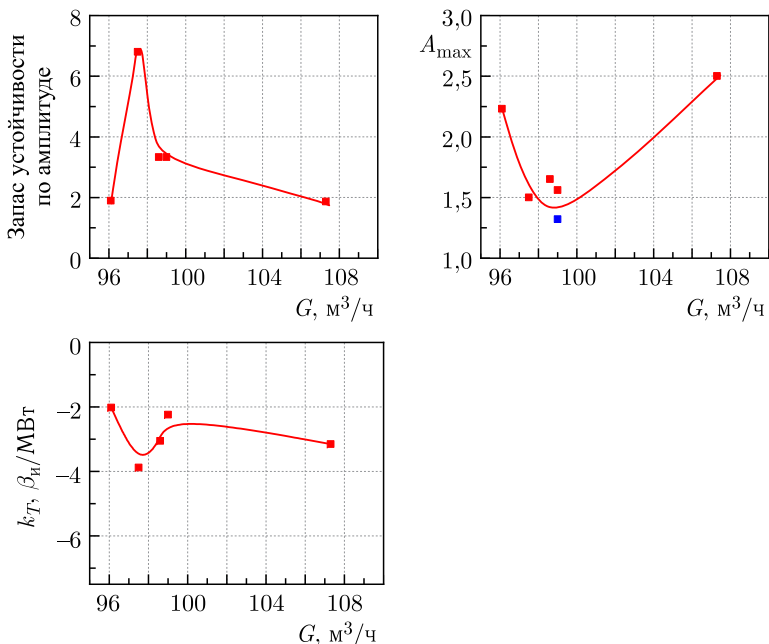


Рис. 12. Запас устойчивости по амплитуде, показатель колебательности и суммарный коэффициент передачи МОС ИБР-2М в зависимости от расхода теплоносителя через активную зону при мощности 1,45 МВт в режиме саморегулирования

из которого отчетливо видна область устойчивого состояния реактора при изменении расхода от 95 до 99 $\text{м}^3/\text{ч}$.

ВЫВОДЫ

В результате расчетно-экспериментальных исследований влияния расходных эффектов реактивности на динамику реактора ИБР-2М и его устойчивость к колебаниям энергии импульсов было показано следующее. Быстрые натриевые эффекты реактивности ($\Delta K/\Delta G$) линейно зависят от мощности реактора и квадрата обратного расхода натрия через активную зону (W/G^2), т.е. определяются не только уровнем подогрева натрия в зоне, но и непосредственно уровнем расхода натрия через зону. Эти данные позволяют найти оптимальные значения мощности и расхода, при которых реактор имеет малые колебания энергии импульсов, что повышает надежность и безопасность работы реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Estimation of of the IBR-2M reactor power feedback parameters evaluation using square reactivity oscillations // *At. Energy.* 2017. V. 122, Issue 2. P. 63–67; DOI: 10.1007/s10512-017-0238-8
3. *Pepelyshev Y. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Stability analysis of the IBR-2M pulsed reactor in an automatic regulating regime at the different level of average power // *Eur. Phys. J.* 2018. No. 173. 04012; DOI: 10.1051/epjconf/201817304012
4. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Investigation of dynamics of the IBR-2M pulsed reactor with energy-production up to 1200 MW·day // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1391. 012099; DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012099
5. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Rogov A. D.* On the limits of oscillatory instability of pulsed reactors of periodic operation // *Phys. At. Nucl.* 2021. V. 84, No. 8. P. 1445–1458; DOI: 10.1134/s1063778821080172
6. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.* On the cycle changing of dynamics of the IBR-2M pulsed reactor // *Nucl. Eng. Technol.* 2023. V. 55, Issue 5. P. 1665–1670; DOI: 10.1016/j.net.2023.01.004
7. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.* Dynamics of the IBR-2M reactor at a power pulse repetition frequency of 10 Hz // *Nucl. Eng. Technol.* 2023. V. 55, Issue 9. P. 3326–3333; DOI: 10.1016/j.net.2023.04.039
8. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Динамика колебательной неустойчивости реактора ИБР-2М. Анализ шумов. Препринт ОИЯИ Р13-2021-29. Дубна, 2021.
9. *Пепельшев Ю. Н., Дикусар Н. Д., Цогтсайхан Ц., Сумхуу Д.* Исследование колебаний энергии импульсов реактора ИБР-2М с использованием метода базисных элементов. Препринт ОИЯИ Р13-2025-49. Дубна, 2025.
10. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Sangaa D.* Dynamics model of the IBR-2M pulsed reactor for analysis of fast transition processes // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, Issue 3. P. 435–438; DOI: 10.1134/s1547477115030188
11. *Pepelyshev 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; DOI: 10.1016/j.anucene.2015.06.002
12. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.* Optimization of automatic power control system of the IBR-2M pulsed reactor in the presence of instability // *Nucl. Eng. Technol.* 2022. V. 54, Issue 8. P. 2877–2882; DOI: 10.1016/j.net.2022.03.017
13. *Marachev A. A., Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Analysis of dynamics of the IBR-2M reactor with statistically optimal automatic regulator // *At. Energy.* 2017. V. 123, Issue 3. P. 172–175; DOI: 10.1007/s10512-018- 0327-3
14. *Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.* Влияние автоматического регулятора мощности импульсного реактора ИБР-2М на его динамику. Препринт ОИЯИ Р13-2023-64. Дубна, 2023.
15. *Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д., Сумхуу Д., Цогтсайхан Ц., Магеррамова С.* О выборе оптимального режима работы реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2025-48. Дубна, 2025.
16. *Пепельшев Ю. Н., Виноградов А. В., Долгих А. В., Рогов А. Д., Сумхуу Д., Цогтсайхан Ц.* Пуск реактора ИБР-2М после длительного останова. Динамика реактора. Препринт ОИЯИ Р13-2025-51. Дубна, 2025.

Получено 3 июня 2026 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 3.07.2026.

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

Усл. печ. л. 0,88. Уч.-изд. л. 1,08. Тираж 100 экз. Заказ № 61330.

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

E-mail: publish@jinr.ru
publish.jinr.ru