

P13-2020-6

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

**О ПРЕДЕЛАХ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ  
ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ  
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

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

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

P13-2020-6

О пределах колебательной неустойчивости импульсных реакторов периодического действия

На основе экспериментальных и модельных исследований, проведенных на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М, показано, что импульсные реакторы периодического действия (ИРПД) имеют принципиальные ограничения по устойчивости. При этом деградационные изменения в активной зоне ИРПД приводят к сильному ослаблению быстрой мощностной обратной связи, что вызывает появление колебательной неустойчивости. В целях безопасности мощность ИРПД даже для свежего топлива ограничена уровнем 2–3 МВт. Также отмечается сильная нестационарность параметров быстрой мощностной обратной связи с энерговыработкой, которая приводит к соответствующим изменениям динамики импульсного реактора. Для обеспечения безопасной работы ИБР-2М требуются всесторонние исследования.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2020

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

P13-2020-6

On the Limits of Oscillatory Instability of Pulsed Reactors of Periodic Operation

On the basis of experimental and model researches carried out at the IBR-2 and IBR-2M reactors, it has been shown that pulsed reactors of periodic operation (PRPO) have fundamental limitations on stability. At the same time degradation changes in the core of the PRPO lead to a strong weakening of the fast power feedback, which causes the appearance of oscillatory instability. For safety purposes, the PRPO power even for fresh fuel is limited to 2–3 MW. There is also a strong instability of fast power feedback parameters with energy production, which leads to corresponding changes in the dynamics of the pulsed reactor. Comprehensive research to ensure safe operation of the IBR-2M is required.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Высокопоточные импульсные источники нейтронов на основе импульсных реакторов периодического действия (ИРПД) ИБР-2 (работал с 80-х гг. прошлого века) и ИБР-2М (работает по сей день) используются в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований для проведения физических исследований на выведенных нейтронных пучках. Реактор ИБР-2М является модернизированной версией ИБР-2, пущен в эксплуатацию в конце 2011 г. при частоте повторения импульсов  $5 \text{ с}^{-1}$  и средней мощности 2 МВт. В процессе эксплуатации в реакторах ИБР-2 и ИБР-2М после достижения некоторой энерговыработки появляются элементы колебательной неустойчивости [1, 2]. Для их устранения проводят оптимизацию некоторых реакторных параметров. Процедуры оптимизации основаны на опыте эксплуатации ИБР-2 и ИБР-2М. Например, один из вариантов выхода из области неустойчивости состоит в снижении мощности. Авторами на основе разработанной модели динамики ИБР-2М и экспериментальных данных о параметрах быстрой мощностной обратной связи получены данные о границах колебательной неустойчивости на плоскости изменения параметров мощность–энерговыработка. Результаты исследований позволяют прогнозировать колебательную неустойчивость и заранее экстраполировать работу реактора в область устойчивости, т.е. повысить безопасность и надежность работы импульсного реактора.

### 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА ИБР-2М

Активная зона реактора имеет форму неправильной шестигранной призмы, расположенной вертикально (рис. 1). Мимо одной из граней проходят два соосно вращающихся подвижных отражателя, основной (ОПО) и дополнительный (ДПО), представляющих собой модулятор реактивности. К пяти остальным граням примыкают стационарные отражатели с блоками аварийной защиты и регулирования реактора. При вращении подвижные отражатели создают в ИБР-2М периодические импульсы реактивности. На короткое время реактивность реактора становится положительной на мгновенных нейтронах. В результате реактор генерирует короткие нейтронные импульсы

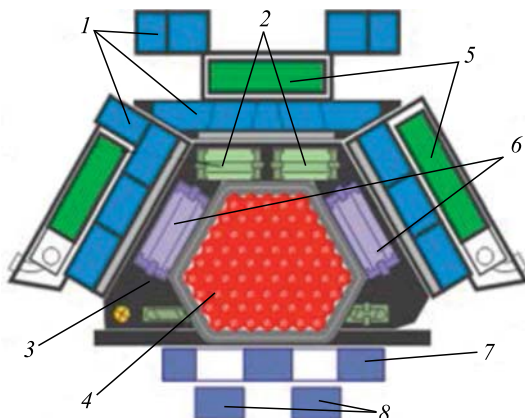


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М: 1 — водяные замедлители, 2 — блоки аварийной защиты (АЗ1 и АЗ2), 3 — стационарный отражатель, 4 — тепловыделяющие сборки, 5 — холодные замедлители, 6 — блоки компенсирующих органов (КО1 и КО2), 7 — основной подвижный отражатель (ОПО), 8 — дополнительный подвижный отражатель (ДПО)

**Таблица 1. Параметры ИБР-2М**

Средняя мощность, МВт	2
Тип топлива	PuO <sub>2</sub>
Количество ТВС	69
Теплоноситель	Na
Номинальный расход теплоносителя, м <sup>3</sup> /ч	100
Максимальное выгорание, %	9
Частота импульсов, Гц	5
Полуширина импульса, мкс:	
быстрые нейтроны	200
тепловые нейтроны	340
Скорость вращения, об/мин:	
основной отражатель	600
дополнительный отражатель	300
Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности замедлителя, см <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> :	
усредненная по времени	~ 10 <sup>13</sup>
максимум в импульсе	~ 10 <sup>16</sup>

(200 мкс на половине высоты) с периодом 0,2 с и амплитудой почти на 4 порядка больше мощности между импульсами. Практически вся энергия, выделяемая за период, генерируется в импульсе (~92 %). Основные характеристики ИБР-2М приведены в табл. 1 [3].

Активная зона (АЗ) рассчитана на загрузку 69 кассет (каждая из семи твэлов с таблетками из двуокиси плутония). Охлаждение активной зоны осуществляется жидким натрием с расходом через АЗ, равным  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В качестве органов систем управления и защиты используются подвижные части стационарного отражателя из вольфрама (блоки аварийной защиты, компенсирующие органы и промежуточный регулятор) и стержень автоматического регулятора из бериллия в матрице стационарного стального отражателя.

При аварийном сигнале на сброс мощности каждый из блоков аварийной защиты с большой скоростью перемещается вниз и за время между импульсами переводит реактор из состояния равновесной импульсной надкритичности в глубоко подкритическое состояние.

## **2. ТИПЫ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ В ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

В ИРПД в области штатного изменения средней мощности существует ряд нестабильностей, каждая из которых представляет самостоятельную проблему по ее устранению. Та или иная нестабильность связана с усилением колебаний энергии всплеск при штатном изменении состояния реактора в процессе его работы. Основные типы нестабильности ИРПД следующие:

- 1) стохастические колебания;
- 2) флуктуации реактивности;
- 3) динамическая нестабильность;
- 4) колебательная нестабильность.

Стохастические колебания энергии импульсов возникают при очень малой мощности порядка 1 Вт и меньше, когда в процессе генерации импульсов доминирует статистика деления и размножения нейтронов. При этом фон между импульсами определяется не только запаздывающими, но и спонтанными нейтронами. В этой области малой мощности относительная дисперсия колебаний энергии импульсов может быть близка к 100 %.

Второй тип нестабильности действует в штатном режиме работы реактора при любом уровне мощности. Нестабильность проявляется как случайные колебания энергии импульсов, вызванные флуктуациями реактивности. Нестабильность связана с высокой чувствительностью реактора к колебаниям реактивности в области штатного изменения мгновенной критичности. Чувствительность импульсного реактора к реактивности определяется не эффективной, а импульсной долей запаздывающих нейтронов  $\beta_{\text{и}}$ , которая намного меньше эффективной. Повышение чувствительности реактора при переходе в импульсный режим определяется отношением  $\beta_{\text{эф}}/\beta_{\text{и}}$ , что приводит к тому, что флуктуации энергии импульсов велики. Например, для активной зоны на

**Таблица 2. Оцененные параметры кинетики и полные колебания энергии импульсов ИРПД с разным топливом при 2 МВт**

Характеристика	<sup>235</sup> U (19,8 %)	<sup>239</sup> Pu (95 %)	<sup>237</sup> Np
Топливо	UO <sub>2</sub>	PuO <sub>2</sub>	NpN
Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$	$7,49 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Импульсная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{и}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$(3,0 \div 3,3) \cdot 10^{-5}$
Источник информации по $\beta_{эф}$ и $\beta_{и}$	ОИЯИ+ANL (США)	ИБР-2М	Отчет НИКИЭТ
$\beta_{эф}/\beta_{и}$	12	14	33
Полная флуктуация энергии импульсов $\Delta Q/\bar{Q}$ , %	~ 40	50	> 200

основе плутония чувствительность реактора повышается в 14 раз при переходе реактора из режима непрерывной мощности в импульсный режим. Это свойство ИРПД наглядно представлено в табл.2 для реакторов с разными видами топлива: на основе урана, плутония и нептуния. Полные флуктуации энергии импульсов (размах колебаний)  $\Delta Q/\bar{Q}$  для урана и нептуния, приведенные в табл. 2, получены путем решения динамики соответствующих реакторов при воздействии случайной последовательности шумов реактивности, измеренной на реакторе ИБР-2М при мощности 2 МВт и расходе натрия через АЗ, равном 100 м<sup>3</sup>/ч. Как видно из табл. 2, для АЗ на основе урана получены наименьшие колебания энергии импульсов, для нептуния — наибольшие, для ИБР-2М они составляют ~ 50 %.

Третий вид нестабильности — так называемая динамическая нестабильность. Указанная нестабильность есть очень редкое (приблизительно один раз за двое суток) появление немотивированной короткой 1 с пачки последовательных импульсов с энергией, на 20–30 % превышающей средний уровень. Это факт, требующий исследований.

Четвертый вид нестабильности — колебательная нестабильность. Колебательная нестабильность проявляется на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М после некоторой энерговыработки. В качестве пояснения к понятию колебательной нестабильности ИРПД на рис. 2 приведена иллюстрация такой нестабильности. Система считается стабильной (устойчивой), если после придания ей некоторого возмущения она вновь переходит в исходное состояние. Если после возмущения амплитуда колебаний растет — система неустойчива. Если ее колебательное состояние не меняется — система нейтральна. На рис. 3, а в качестве примера представлены проявления колебательной нестабильности затухающего типа после введения некоторой возму-

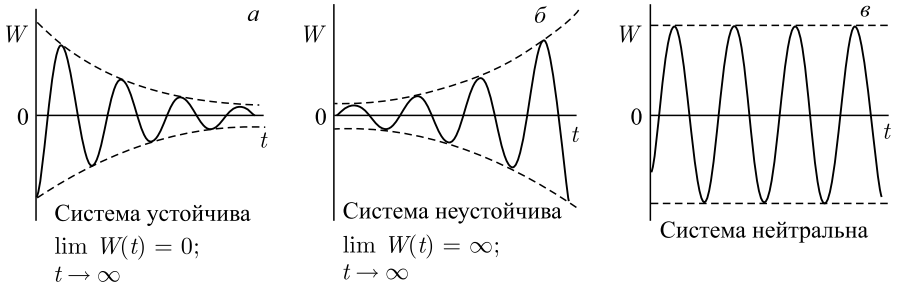


Рис. 2. Виды колебаний в определении понятия колебательной неустойчивости ИРПД

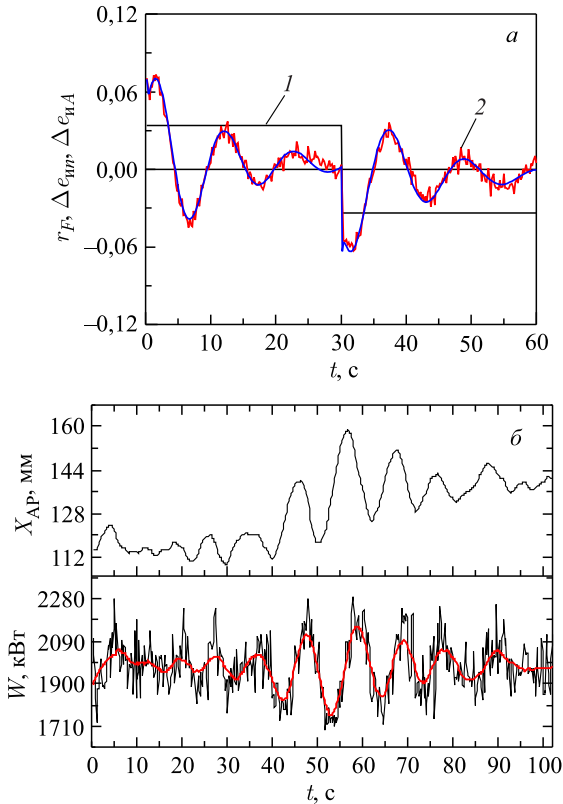


Рис. 3. Примеры проявления низкочастотных колебаний энергии импульсов ИБР-2М при мощности 2 МВт: *a*) в режиме саморегулирования при прямоугольных возмущениях реактивности при энерговыработке 740 МВт · сут; *б*) в режиме с автоматическим регулированием при энерговыработке 1200 МВт · сут

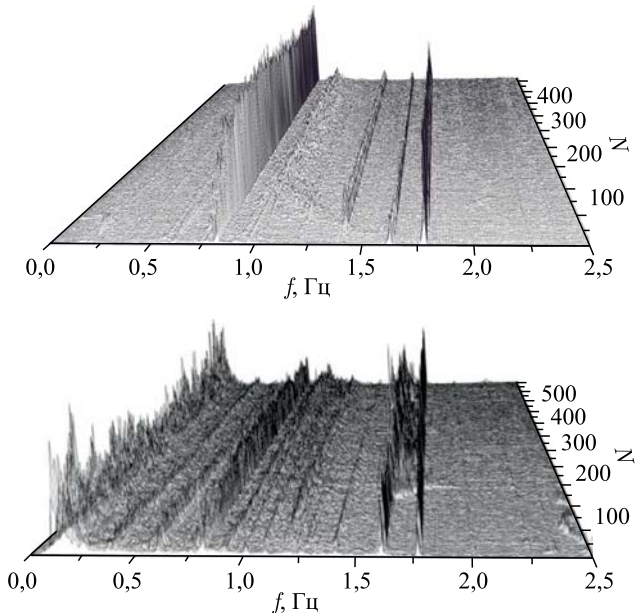


Рис. 4. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М в отдельных реакторных циклах в конце 2011 г. и в 2016 г. при энерговыработке 1200 МВт·сут при мощности 2 МВт

щающей реактивности в ИБР-2М в режиме саморегулирования и самопроизвольное возникновение колебаний в режиме автоматического регулирования при мощности 2 МВт (см. рис. 3, б). Появление низкочастотной колебательной неустойчивости отчетливо видно в спектральной плотности колебаний энергии импульсов (см. рис. 4). Видно наличие низкочастотных колебаний 0,10 Гц при энерговыработке 1200 МВт·сут и отсутствие низкочастотных колебаний в начальный период работы реактора при малой энерговыработке 740 МВт·сут.

### 3. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИРПД КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Расчетно-экспериментальное исследование неустойчивости ИРПД и получение прогнозной экстраполяции в область устойчивости можно выполнить разными путями. Одно из направлений — построение модели динамики реактора с получением оценки запаса устойчивости. Второе направление — прямое исследование шумов энергии импульсов, в котором изучается поведе-



ние низкочастотной компоненты колебательной неустойчивости. Оба метода взаимно дополняют друг друга и дают близкие по прогнозной ценности результаты. Отличие состоит в том, что при построении модели динамики реактора необходимо выполнить ряд трудоемких экспериментов по определению параметров быстрой мощностной обратной связи (МОС). В исследовании шумов эта процедура необязательна, поскольку анализ шумов по своей сути является пассивной процедурой и не требует никакого вмешательства в работу реактора. С другой стороны, ценность использования модели динамики в исследовании неустойчивости по сравнению с пассивными измерениями реакторных шумов состоит в том, что она позволяет смоделировать различные динамические состояния реактора, недоступные для их получения никакими экспериментальными способами.

Для понимания некоторых особенностей работы импульсного реактора периодического действия (ИРПД) рассмотрим работу реактора по его структурной блок-схеме. На рис. 5–8 в блочном виде представлены некоторые характерные состояния реактора как динамической системы автоматического регулирования (АР).

### 3.1. Динамика ИРПД с автоматическим регулированием мощности.

Исходная блок-схема динамики ИРПД как системы автоматического регулирования показана на рис. 5. В общем виде система состоит из блока кинетики, блока мощностной обратной связи, блока возмущающей реактивности и блока автоматического регулирования. Описание модели каждого из блоков приведено ниже. Здесь только нужно отметить, что в блок возмущающей реактивности входят данные по дифференциальной эффективности всех органов регулирования, а также вычисленные и смоделированные детерминированные и случайные процессы изменения реактивности, необходимые для анализа.

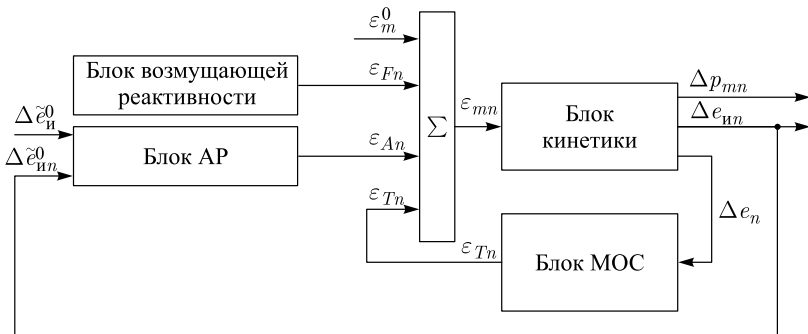


Рис. 5. Схема автоматического регулирования ИРПД

**3.2. Динамика ИРПД в режиме саморегулирования.** Рис. 6 иллюстрирует случай, когда система АР реактора отключена и мощность реактора поддерживается исключительно за счет действия МОС. Чтобы реактор работал стабильно, мощностная обратная связь должна быть отрицательной и достаточно глубокой. В противном случае реактор перейдет в аварийный режим, показанный на рис. 7.

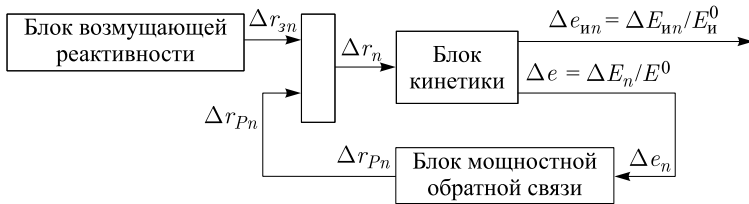


Рис. 6. Структурная схема модели динамики ИРПД в режиме саморегулирования с учетом только мощностной обратной связи

**3.3. Динамика ИРПД при отсутствии мощностной обратной связи и системы АР.** Случай, представленный на рис. 7, — один из вариантов динамики реактора, когда быстрая мощностная обратная связь в процессе работы реактора значительно ослабевает, что наблюдается на практике, а система АР по каким-то причинам отключена или вышла из строя. В этом случае первый же импульс возмущающей реактивности выведет реактор из стабильного равновесного состояния с разгоном или с затуханием энергии импульсов. Система аварийного сброса мощности должна быть в этом случае безотказной.

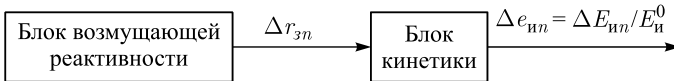


Рис. 7. Структурная схема динамики ИРПД при очень слабой МОС или ее отсутствии и выключенной системе АР

**3.4. Динамика ИРПД с автоматическим регулированием мощности при крайне слабой МОС или ее отсутствии.** Ситуация, представленная на рис. 8, достаточно тривиальная. Реактор стабильно и надежно работает уже достаточно длительное время. Получена значительная энергосыработка. Считается, что динамика реактора соответствует случаю, представленному на рис. 5, т.е. параметры МОС от момента начала кампании не изменились, а если и изменились, то незначительно. На самом деле, МОС стала практически нулевой, и реактор стабилизируется только за счет действия АР. Реактор в режиме саморегулирования уже неустойчив и при любом отключении системы АР может перейти в разгон. Система аварийного сброса мощности,

как и в предыдущем случае, должна быть безотказной. В этой ситуации для обеспечения безопасной работы импульсного реактора необходим контроль за параметрами МОС в процессе его работы.

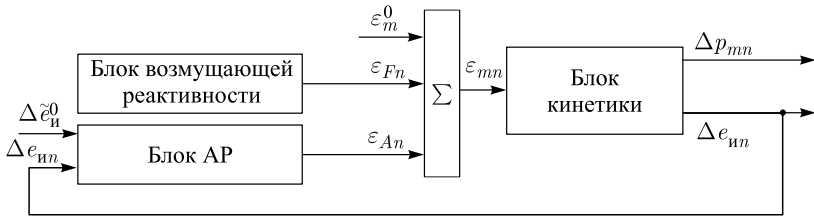


Рис. 8. Структурная схема динамики ИРПД при очень слабой МОС или ее отсутствии, но с включенной системой АР

**3.5. Требования к устойчивости ИРПД.** Из всего сказанного в настоящем разделе следует, что реактор должен удовлетворять важнейшему требованию — устойчивости в режиме саморегулирования.

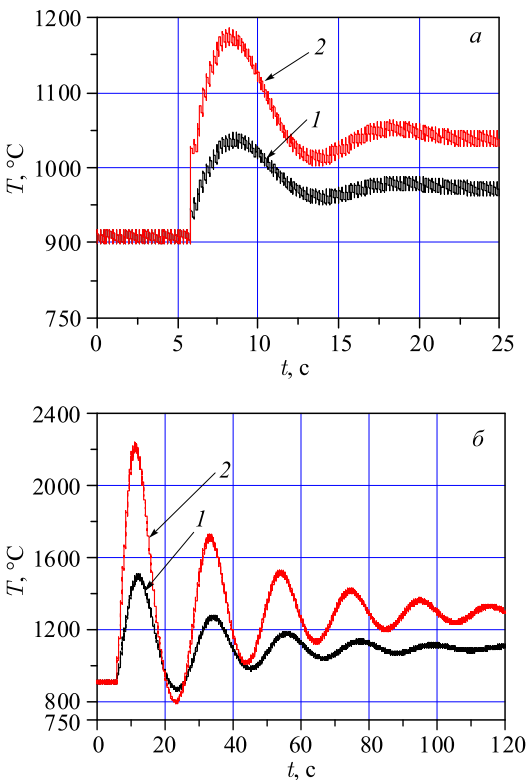


Рис. 9. Расчетное изменение температур на внутренней поверхности топлива в виде втулок в максимально нагруженном ТВЭЛе ИБР-2 при скачке реактивности  $1\beta_n$  (1) и  $2\beta_n$  (2) в начале (а) и конце (б) кампании реактора

В качестве иллюстрации соответствия этому требованию на рис. 9 показано расчетное изменение температуры топлива в реакторе ИБР-2, находящемся в режиме саморегулирования, при воздействии скачка реактивности в начале и конце кампании. Видно, что в конце кампании при существенно ослабленной МОС температура топлива через короткое время после скачка реактивности 5–10 с может быть близка к точке плавления (2400 °С). «Гребенка» на рис. 9 есть подогрев в импульсе, равный 18 °С.

#### **4. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ КАК СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Кратко рассмотрим содержание блочной структуры динамики, представленной на рис. 5. Динамика реактора может рассматриваться в двух аспектах: 1) для вычисления переходных процессов при воздействии задающей реактивности; 2) для получения передаточных функций реактора с последующей оценкой запаса устойчивости по частотному критерию. В нашем случае использовались оба подхода. Частотный метод анализа устойчивости был выбран как наиболее наглядный и удобный в инженерных расчетах. Динамику реактора рассмотрим на примере импульсных реакторов ИБР-2 [6, 7] и его модернизированной версии ИБР-2М [4, 5]. Основные сведения о построении модели динамики импульсного реактора достаточно подробно изложены в [4–7]. В данном разделе динамика реактора рассмотрена в объеме, необходимом для оценки запаса устойчивости.

В целом, динамика ИРПД, как динамика системы с автоматическим регулированием мощности (АР) определяется следующими характеристиками:

- нелинейной;
- нестационарной;
- дискретной (импульсной);
- стохастической.

**4.1. Уравнения кинетики.** На рис. 10 показана блок-схема кинетики ИБР-2М.

Уравнения кинетики импульсного реактора периодического действия сводятся к следующей системе уравнений [4–7]:

$$\frac{\tau}{\beta} \frac{dP}{dt} = \frac{\varepsilon}{\beta} P + S, \quad (1)$$

$$S = \sum_i^{N_i} S_i, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} \frac{dS_i}{dt} + S_i = \mu_i P. \quad (3)$$

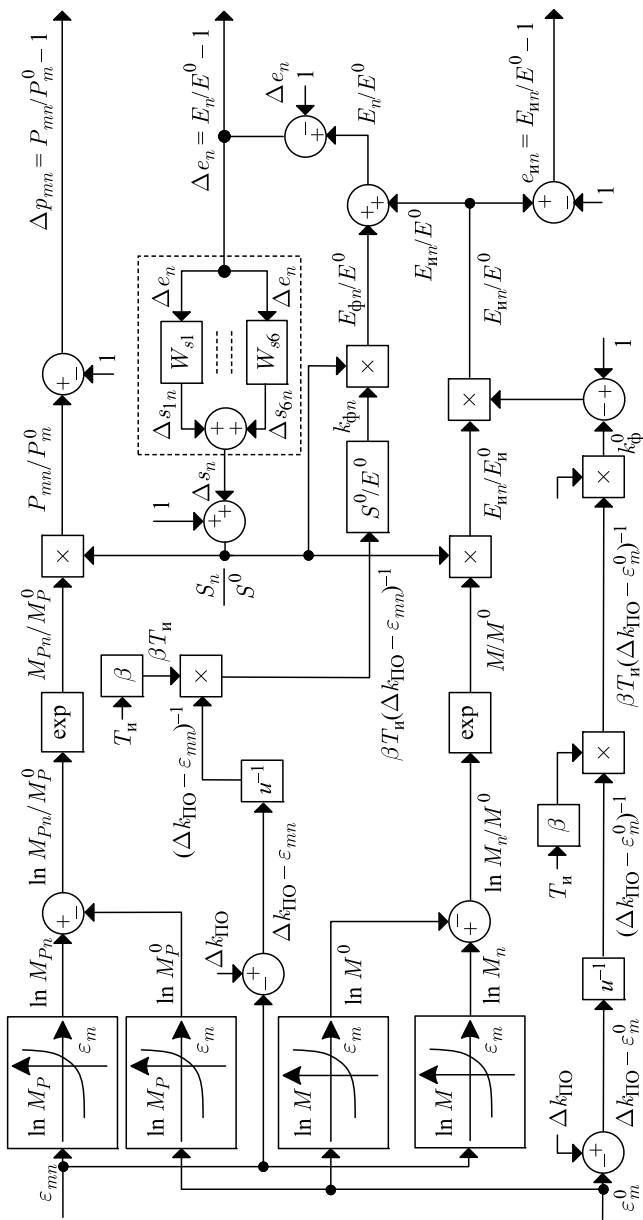


Рис. 10. Блок кинетики импульсного реактора ИБР-2М

Здесь  $\tau$  — эффективное время жизни мгновенных нейтронов;  $P = k_n n$  — мощность реактора ( $k_n$  — коэффициент пропорциональности между мощностью и плотностью нейтронов  $n$ );  $\beta_i, \beta$  — соответственно доля запаздывающих нейтронов группы  $i$  и суммарная;  $\varepsilon = \rho - \beta$  — реактивность на мгновенных нейтронах,  $\rho$  — реактивность;  $S_i = k_n \tau \lambda_i C_i / \beta$ ,  $S = \sum_i S_i$  — соответственно нормированная интенсивность источников запаздывающих нейтронов группы  $i$  и суммарная;  $C_i, \lambda_i$  — концентрация и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы  $i$ ;  $\mu_i = \beta_i / \beta$  — относительная доля запаздывающих нейтронов группы  $i$ ;  $t$  — время. В работе использованы шесть групп запаздывающих нейтронов ( $N_i = 6$ ). Значения параметров запаздывающих нейтронов при делениях  $^{239}\text{Pu}$  быстрыми нейтронами взяты из [7].

Импульсы мощности рассматриваются как идеальные бесконечно узкие импульсы с энергией  $E_n$ . Поскольку между импульсами выделяется лишь 8,6% от всей энергии реактора, то для удобства принято, что энергия фона  $E_\phi$  выделяется не непрерывно, а также в виде бесконечно узких импульсов, совмещенных с импульсами мощности. Такое представление мощности позволяет от уравнений кинетики (1)–(3) перейти к алгебраическим уравнениям (4), связывающим значения безразмерных переменных в дискретные моменты времени, соответствующие текущему импульсу мощности (с индексом  $n$ ) и предшествующему импульсу мощности (с индексом  $n - 1$ ) [4–6]. Параметры с верхним индексом 0 соответствуют базовым значениям параметров.

Энергия импульса мощности пропорциональна интенсивности запаздывающих нейтронов перед началом импульса мощности  $S$  и импульсному коэффициенту передачи  $M$ :  $E_{nn} = M_n S_n$ . Импульсный коэффициент  $M$  есть нелинейная функция максимального значения реактивности в импульсе  $\varepsilon_m$ , вычислена по уравнениям кинетики (1)–(3).

Применительно к параметрам, выраженным в относительных единицах, уравнения кинетики приведены к следующему виду:

$$\frac{E_n}{E^0} = \frac{E_{nn}}{E^0} + \frac{E_{\phi n}}{E^0}; \quad \frac{E_{nn}}{E^0} = \frac{E_{nn}}{E_n^0} \frac{E_n^0}{E^0};$$

$$k_{\phi n} = \frac{E_{\phi n}}{E^0} = \frac{\beta T_n}{\Delta k_{\text{ПО}} - \varepsilon_{mn}} \frac{S^0}{E^0}; \quad (4)$$

$$\frac{E_{nn}}{E_n^0} = \frac{S_n M_n}{S^0 M^0} = \frac{S_n}{S^0} \exp\left(\ln \frac{M_n}{M^0}\right);$$

$$\frac{E_{\phi n}}{E^0} = k_{\phi n} \frac{S_n}{S^0}; \quad \frac{S_n}{S^0} = \sum_i \frac{S_{in}}{S^0}; \quad \frac{S_{in}}{S^0} = \left( \frac{S_{in-1}}{S^0} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \frac{E_{n-1}}{E^0} \right) e^{-\lambda_i T_n};$$

Постоянные величины  $S^0/E^0$  и  $E_n^0/E^0$  в (6) вычисляются по формулам

$$\frac{S^0}{E^0} = \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{1}{e^{\lambda_i T_n} - 1},$$

$$k_{\Phi}^0 = \frac{E_{\Phi}^0}{E^0} = \frac{\beta T_n}{\Delta k_{\text{ПО}} - \varepsilon_m^0} \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{1}{e^{\lambda_i T_n} - 1}, \quad (5)$$

$$\frac{E_n^0}{E^0} = 1 - k_{\Phi}^0.$$

В уравнениях (4) и (5)  $E_n$ ,  $E_{\Phi}$ ,  $E = E_n + E_{\Phi}$  — энергия, выделяемая соответственно в импульсе мощности, в интервале между импульсами (энергия фона) и полная за период импульсов  $T_n$ ;  $E_{nn}/E_n^0$  — отношение энергии импульса мощности к ее базовому значению  $E_n^0$ ;  $M$ ,  $M^0$  — импульсный коэффициент передачи и его базовое значение;  $k_{\Phi}$  — доля энергии фона за период от полной энергии за этот же период;  $k_{\text{ПО}}$  — эффективность подвижного отражателя;  $\varepsilon_m$  — максимальная реактивность (надкритичность) в импульсе.

Реактивность в модели для удобства выражена как в абсолютных единицах ( $\rho$ ), так и в долях  $\beta_n$  ( $r = \varepsilon/\beta_n$ ). Импульсная доля запаздывающих нейтронов  $\beta_n$  [8] вычисляется по следующей формуле:

$$\beta_n = \frac{1}{d \ln \left( \frac{M}{M^0} \right) / d\varepsilon_m |_{\varepsilon_m^0}} = \frac{M^0}{dM/d\varepsilon_m |_{\varepsilon_m^0}}. \quad (6)$$

Для реактора ИБР-2М  $\beta_n = 1,54 \cdot 10^{-4}$ .

**4.2. Уравнения мощностной обратной связи.** В моделях динамики реакторов ИБР-2 и ИБР-2М использовали параметры быстрой МОС, определенные экспериментальным путем. Непосредственно измерялась переходная характеристика реактора при воздействии периодических прямоугольных колебаний реактивности [9]. Ввод–вывод реактивности задавался между импульсами за время менее 0,15 с. По переходной характеристике вычислялась импульсная характеристика МОС — изменение реактивности обратной связи от единичного импульса с энергией 1 МДж

$$\rho_{T_j} = \sum_j (k_{T_j} / T_{T_j}) \cdot e^{-t/T_{T_j}};$$

$T_{T_j}$  — постоянные времени;  $k_{T_j}$  — коэффициенты передачи обратной связи;  $j = 1, 2, 3$ ,  $k_T = \sum_j k_{T_j}$  — асимптотическое значение быстрого мощностного коэффициента реактивности. На рис. 11 показан характерный вид переходной

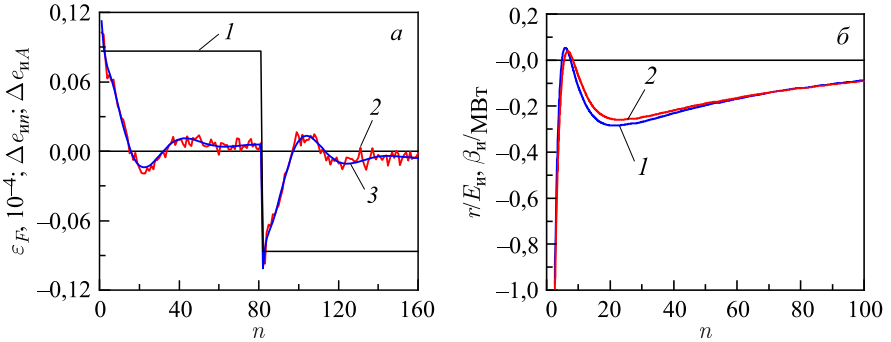


Рис. 11. Пример переходной характеристики ИБР-2М (а) и импульсной характеристики МОС (б), полученные при прямоугольных колебаниях реактивности и мощности 2 МВт в начале кампании реактора: 1 — задающая реактивность  $\varepsilon_F$ ; 2 — относительное отклонение энергии импульса мощности: зарегистрированное  $\Delta e_{ин}$ ; 3 — вычисленное  $\Delta e_{иА}$ . По оси абсцисс отложен номер импульсов

характеристики ИБР-2М в режиме саморегулирования и импульсной характеристики быстрой МОС при мощности 2 МВт и расходе натрия через АЗ 100 м<sup>3</sup>/ч.

По экспериментальным данным была принята модель быстрой МОС в виде трех параллельных аperiодических звеньев [9]:

$$r_{Tjn} = \sum_{j=1}^3 r_{Tjn} \quad (7)$$

$$r_{Tjn} = \left( r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \right) \exp \left( -\frac{T_{и}}{T_{Tj}} \right), \quad (8)$$

где  $r_{Tn}$  и  $r_{Tjn}$  — суммарная реактивность МОС и ее  $j$ -е составляющие, соответствующие  $n$ -му импульсу мощности;  $k_{Tj}$ ,  $T_{Tj}$  — коэффициент передачи и постоянная времени  $j$ -й составляющей МОС ( $j = 1, 2, 3$ ) соответственно.

Поскольку симметричным колебаниям реактивности соответствуют несимметричные колебания энергии импульсов, коэффициенты передачи МОС были приняты нелинейными. Наилучшее результаты были получены следующим образом.

При  $j = 1$

$$r_{Tjn} = \left( r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}(1 + c_j r_{Tjn-1})}{T_{Tj}} \right) \exp \left( -\frac{T_{и}}{T_{Tj}} \right), \quad (9)$$



при  $j = 23$

$$r_{Tjn} = \left( r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}(1 + c_j r_{Tn-1})}{T_{Tj}} \right) \exp \left( -\frac{T_n}{T_{Tj}} \right). \quad (10)$$

Отметим, что в начальный период работы ИБР-2М симметричные колебания реактивности вызывали симметричные колебания энергии импульсов, т. е. этому периоду соответствовали нулевые значения параметров нелинейности ( $c_1 = 0$ ,  $c_2 = 0$  и  $c_3 = 0$ ). Значения параметров быстрой МОС ИБР-2М в разные периоды работы реактора приведены в табл. 3.

**Таблица 3. Параметры быстрой МОС ИБР-2М в разные периоды работы реактора**

Параметр	2015 г.			2019 г.		
	1	2	3	1	2	3
Номер компонентов МОС $j$	1	2	3	1	2	3
Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,91	1,59	-0,82	-3,57	1,90	- 1,56
Постоянная времени $T_{Tj}$ , с	7,60	1,02	0,46	13,42	0,74	0,4
Коэффициент нелинейности $c_j, \beta_n^{-1}$	-	-	-	-9,04	1,72	6,17
Суммарный коэффициент передачи $k_T = \sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,14			-3,23		

**4.3. Дискретные передаточные функции ИРПД для моделирования переходных процессов.** Импульсы мощности в модели динамики представлены в виде дельта-функций, умноженных на относительные отклонения энергии импульсов от базового значения. Что касается других переменных, то в уравнениях динамики используются лишь их значения в дискретные моменты времени (в моменты появления импульсов мощности). Это дает возможность охарактеризовать каждый линейный элемент модели соответствующей дискретной передаточной функцией. При оценке переходных процессов реактора удобно использовать дискретные передаточные функции, представленные в виде  $z$ -преобразования входных и выходных сигналов и уравнений, входящих в блок-схему. Здесь  $z$  — переменная,

$$z = \exp(j\omega T_n),$$

где  $\omega$  — круговая частота в  $\text{с}^{-1}$ ,  $\omega T_n$  изменяется в пределах от 0 до  $\pi$ . Сомножитель  $j = \sqrt{-1}$  (в отличие от индекса  $j$ ).

Для отдельных компонентов блочной структуры динамики передаточные функции в  $z$ -преобразовании выглядят следующим образом:

- запаздывающие нейтроны —

$$W_s(z) = \frac{\Delta s(z)}{\Delta e(z)} = \sum_{i=1}^6 \frac{\Delta s_i(z)}{\Delta e(z)} = \sum_{i=1}^6 \frac{\mu_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_n)}{1 - \exp(-\lambda_i T_n)}} \frac{z^{-1}}{\exp(\lambda_i T_n) - z^{-1}};$$

- мощностная обратная связь —

$$W_{Tj}(z) = \frac{\varepsilon_{Tj}(z)}{\Delta E(z)} = \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \frac{z^{-1}}{\exp(T_n/T_{Tj}) - z^{-1}}, \quad j = 1, 2, 3;$$

- блок сглаживания автоматического регулятора —

$$W_{A1}(z) = \frac{\Delta \tilde{e}_n(z)}{\Delta e_n(z)} = \frac{1/(q-1)}{q/(q-1) - z^{-1}}.$$

- автоматический регулятор (блок управления) —

$$W_{A2}(z) = \frac{\varepsilon_A(z)}{\delta \tilde{e}_n(z)} = k_A T_n \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}.$$

**4.4. Дискретные частотные передаточные функции ИРПД для частотного анализа устойчивости.** Дискретные частотные передаточные функции реактора необходимы при использовании частотных критериев устойчивости, в нашем случае частотного критерия Найквиста [7, 10, 11]. Передаточная функция линеаризованных уравнений динамики определяется как отношение преобразований Лапласа выходного и входного сигналов и равна преобразованию Лапласа импульсной характеристики. Передаточные функции отдельных компонентов блочной структуры динамики в  $p$ -преобразовании (Лапласа) после перевода этих функций в частотную область выглядят следующим образом:

- дискретная частотная передаточная функция быстрой МОС

$$W_{T\Delta E}^*(j\omega) = \frac{\Delta r_T^*(j\omega)}{\Delta E^*(j\omega)} = \sum_{j=1}^3 \left( \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \frac{e^{-j\omega}}{e^{T_n/T_{Tj}} - e^{-j\omega}} \right); \quad (11)$$

- дискретная частотная передаточная функция для запаздывающих нейтронов

$$W_S^*(j\omega) = \frac{\Delta s^*(j\omega)}{\Delta e^*(j\omega)} = \frac{1}{\sum_i \mu_i \lambda_i \frac{1}{e^{\lambda_i T_n} - 1}} \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{e^{-j\omega}}{e^{\lambda_i T_n} - e^{-j\omega}}; \quad (12)$$

- дискретная частотная передаточная функция  $W_E^*(j\omega)$  блока AP

$$W_E^*(j\omega) = \frac{\Delta e^*(j\omega)}{\Delta e_n^*(j\omega)} = \frac{1 - k_\Phi^0}{1 - k_\Phi^0 W_S^*(j\omega)}. \quad (13)$$

## 5. ЧАСТОТНЫЙ КРИТЕРИЙ НАЙКВИСТА

Для оценки запаса устойчивости используем частотный критерий Найквиста. Исследуем годограф передаточной амплитудно-фазовой частотной характеристики ИБР-2М (АФЧХ) на комплексной плоскости. Пояснение к использованию критерия устойчивости Найквиста дано на рис. 12.

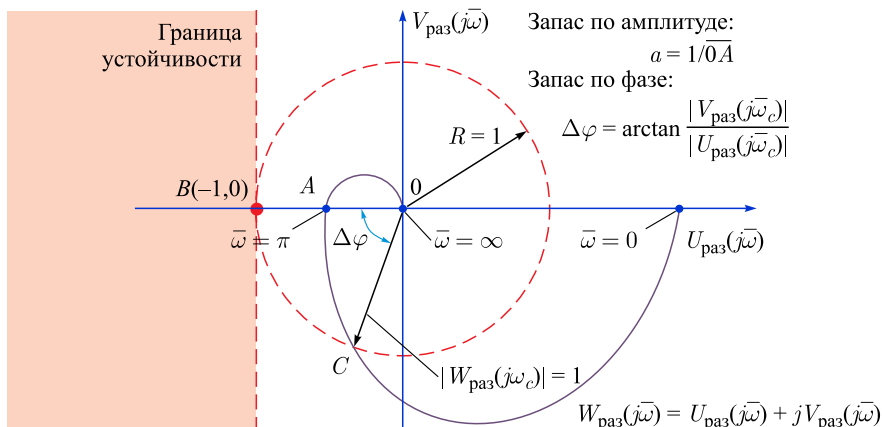


Рис. 12. Пояснение к критерию устойчивости Найквиста

Суть критерия Найквиста заключается в следующем:

- Если разомкнутая система устойчива, то замкнутая система устойчива при условии, что АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами  $(-1, j0)$ .
- Запас устойчивости по амплитуде ( $a = \overline{0B}/\overline{0A}$ ;  $\overline{0B} = 1$ ) показывает, во сколько раз надо увеличить коэффициент усиления, чтобы вывести систему на границу устойчивости  $(-1, j0)$ .
- Запас по фазе ( $\Delta\varphi$ ) определяют как угол, при повороте на который вектор единичной длины ( $|W_{RT\text{пaz}}^*(j\omega)| = 1$ ) окажется в точке  $(-1, j0)$ , т. е. когда замкнутая система выйдет на границу устойчивости.

На рис. 13 показан годограф амплитудно-фазовой частотной характеристики ИБР-2М (АФЧХ) на комплексной плоскости при разной мощности реактора и расходе натрия через АЗ, равном штатному значению  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

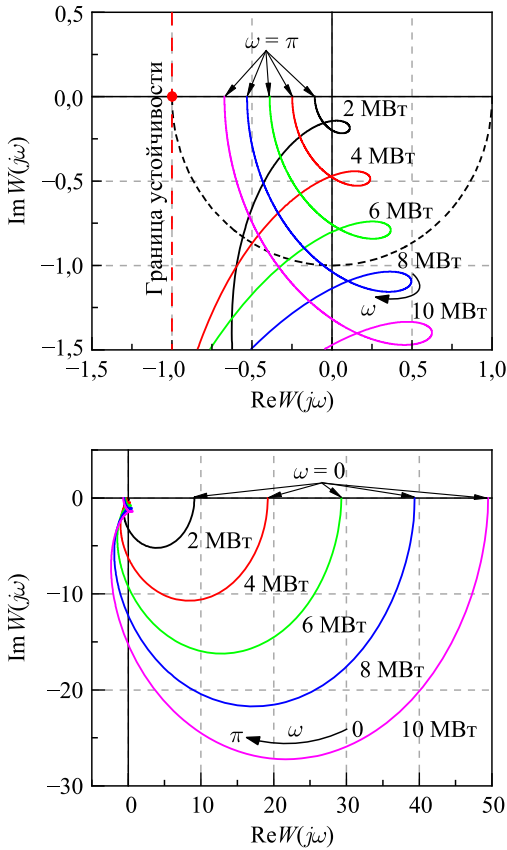


Рис. 13. Годограф амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой части системы  $W(j\omega)$  на комплексной плоскости реактора ИБР-2М в начале кампании. Реактор находится в режиме саморегулирования. На верхнем рисунке более детально представлен участок характеристики вблизи нуля

## 6. ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ ИБР-2М

Как показано в [7], для устойчивости ИРПД:

- 1) необходимое условие — полный коэффициент передачи быстрой МОС должен быть отрицательным;
- 2) достаточное условие — импульсная характеристика быстрой МОС не должна выходить в область положительных значений реактивности.
- 3) в качестве общей рекомендации для систем АР также считается, что запас устойчивости должен быть больше трех [12].

Анализ динамики ИБР-2 и ИБР-2М показал, что параметры МОС и, следовательно, запасы устойчивости импульсных реакторов существенно зависят от уровня средней мощности и значения энерговыработки.

Ниже приведены данные по исследованию устойчивости ИБР-2М в зависимости от мощности и энерговыработки. Расход натриевого теплоносителя через АЗ не менялся и был равен  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**6.1. Устойчивость ИБР-2М в режиме саморегулирования в зависимости от мощности. Оценка стохастической устойчивости.** Данные о параметрах МОС, полученные в разные периоды работы реактора в 2015 и 2019 гг. при энерговыработке 740 и 1520 МВт·сут соответственно приведены в табл. 3. Изменение полного коэффициента быстрой МОС в зависимости от мощности при указанных выше значениях энерговыработки показано на рис. 14. Там же приведена импульсная характеристика МОС.

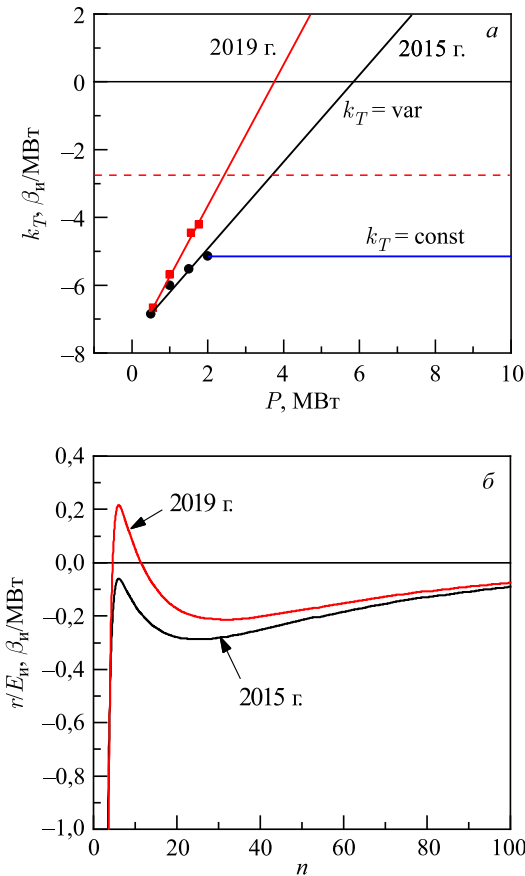


Рис. 14. Изменение полного коэффициента МОС в зависимости от мощности (а) и импульсная характеристика быстрой МОС ИБР-2М при некоторых значениях энерговыработки (б). Показано два способа экстраполяции суммарного коэффициента передачи МОС для мощности выше 2 МВт

В соответствии с параметрами быстрой МОС, полученными при мощности от 0,5 до номинальной 2 МВт, измеренный запас устойчивости ИБР-2М по амплитуде и фазе для свежего топлива (энерговыработка 740 МВт·сут) отвечает приведенному на рис. 15.

Представляет интерес оценить уровень устойчивости при изменении мощности реактора выше номинальной 2 МВт, а также уровень средней мощности, при которой реактор выходит на границу устойчивости и в нем возникают незатухающие колебания.

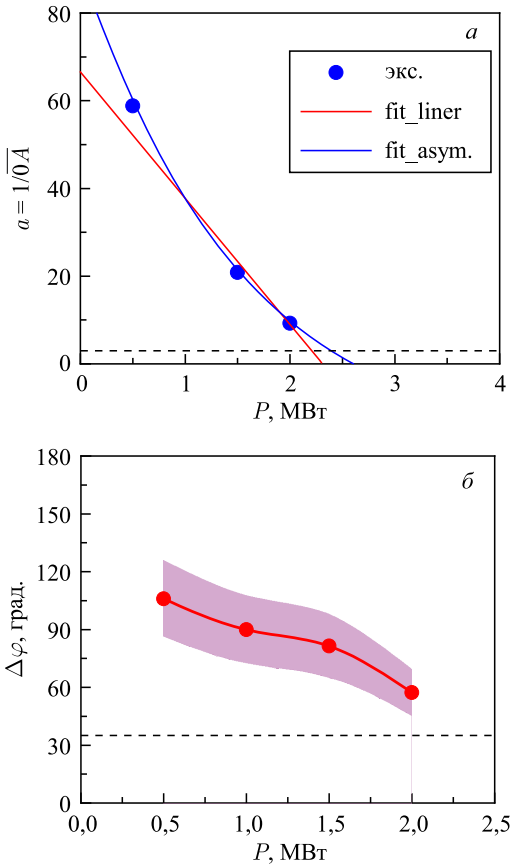


Рис. 15. Зависимость измеренного запаса устойчивости по амплитуде (а) и по фазе (б) от средней мощности ИБР-2М для свежего топлива. Пунктиром обозначена граница устойчивости

При оценке параметров МОС для мощности выше номинальной рассматривались два варианта (см. рис. 14).

1. Первый вариант — предполагалось, что параметры МОС, соответствующие средней мощности 2 МВт, с дальнейшим увеличением мощности не меняются ( $k_T = \text{const}$  на рис. 14).
2. Второй, более реалистичный, вариант — суммарный коэффициент передачи МОС при мощностях больше 2 МВт изменялся по линейному закону, определяемому по значениям суммарного коэффициента МОС, соответствующих мощностям до 2 МВт. При этом значения параметров МОС, кроме коэффициента передачи самой медленной составляющей МОС, те же, что и при мощности 2 МВт ( $k_T = \text{var}$  на рис. 14).

С использованием критерия Найквиста для каждого из приведенных выше вариантов (способов) экстраполяции суммарного коэффициента МОС оценены запасы устойчивости для мощности реактора выше 2 МВт (см. рис. 16).

На рис. 15 и 16 видно размытие запаса устойчивости как по амплитуде, так и по фазе. Здесь проявилась стохастическая природа входных параметров модели динамики ИРПД, характеризующаяся, прежде всего, флуктуациями реактивности и высокой чувствительностью реактора к этим флуктуациям. Чтобы показать, как флуктуации реактивности отражаются на запасе устойчивости, расчет запаса проводили следующим образом. Экспериментально были исследованы флуктуации энергии импульсов: их плотности распределения и спектральные характеристики. По ним с помощью решения инверсной модели динамики реактора были получены реальные флуктуации реактивности и определен их разброс. Далее для оценки запаса устойчивости использовали квазистатический подход, когда параметры МОС определялись в соответствии с разбросом мощности, значение которой в пределах разброса фиксировалось. Фиксировалось также и значение плотности вероятности флуктуаций энергии импульсов при данной мощности. Таким образом, реальный запас устойчивости, как и граница устойчивости, оказываются размытыми с некоторой плотностью вероятности. На практике это означает, что в процессе работы импульсного реактора его состояние при больших флуктуациях реактивности может случайным образом изменяться. Поэтому реактор, находясь, например, на границе устойчивости, может случайным образом самопроизвольно переходить из устойчивого состояния в неустойчивое. В данной работе для простоты изложения используем только средние оценки устойчивости. Изучение стохастического характера устойчивости ИРПД требует более внимательного и тщательного подхода.

Из рис. 16 можно сделать следующие выводы. С ростом мощности запас по амплитуде для обоих способов экстраполяции суммарного коэффициента передачи МОС уменьшается (рис. 16, *a*). При первом способе запас устой-

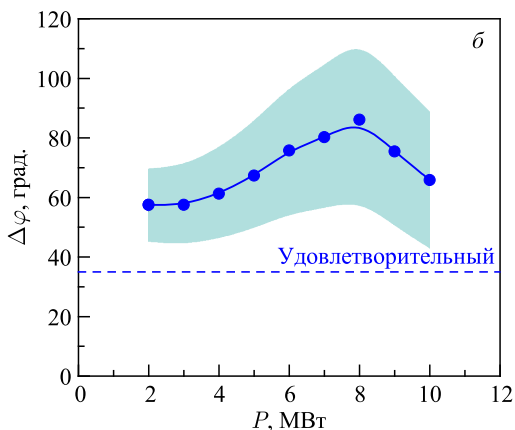
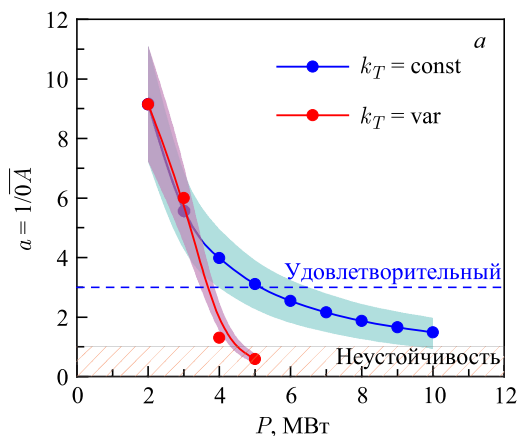


Рис. 16. Зависимости запасов устойчивости по амплитуде (а) и фазе (б) от средней мощности ИБР-2М в режиме саморегулирования:  $k_T = \text{const}$  и  $k_T = \text{var}$  — первый и второй способ экстраполяции суммарного коэффициента МОС на мощность выше 2 МВт

чивости по амплитуде можно считать удовлетворительным лишь до уровня средней мощности 5 МВт. В диапазоне средней мощности от 5 до 10 МВт реактор теоретически устойчив, но запас по амплитуде настолько мал, что не может считаться удовлетворительным.

При втором способе запас по амплитуде становится неудовлетворительным уже при 3,5 МВт, а при средней мощности примерно 4 МВт реактор в саморегулировании вообще теряет устойчивость.



Запас по фазе при первом способе сначала увеличивается, затем уменьшается, а при втором способе сразу уменьшается при увеличении мощности.

Поскольку второй способ экстраполяции суммарного коэффициента передачи МОС на уровень мощности выше номинального более реалистичен, его и используем в качестве основного метода экстраполяции.

**6.2. Влияние энерговыработки на устойчивость.** Характерной особенностью ИБР-2 и ИБР-2М является ослабление быстрой МОС в процессе работы реакторов. Этот процесс отчетливо виден по изменению суммарного коэффициента передачи быстрой МОС при разных уровнях энерговыработки (см. рис. 14).

На рис. 17 приведены данные по изменению запаса устойчивости ИБР-2М в зависимости от энерговыработки при некоторых значениях средней мощности реактора. Точки, соответствующие значениям запаса устойчивости для 2023 г., получены путем линейной экстраполяции параметров МОС в зависимости от энерговыработки. Жирной точкой отмечено состояние реактора в конце 2019 г. при мощности 1,75 МВт. Кратко поясним, что следует из рис. 17. Граница удовлетворительного запаса устойчивости, обозначенного на рис. 17 светло-серым тоном, равна трем. Крайне нежелательно находиться ниже этого значения. Полная энерговыработка при достижении предельных ресурсных значений параметров, например, реактора ИБР-2, равна

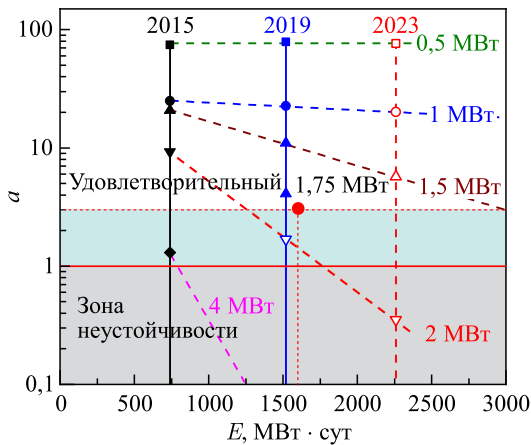


Рис. 17. Зависимость запаса устойчивости ИБР-2М от энерговыработки при некоторых значениях средней мощности. Показана также расчетная оценка запаса устойчивости на 2023 г., полученная с использованием экстраполированных значений параметров МОС. Жирной точкой обозначен запас устойчивости на конец 2019 г. при энерговыработке 1520 МВт·сут

3600 МВт · сут. Такую энергоспроизводство, как видно из рис. 17, можно обеспечить только, если эксплуатировать реактор при мощности не выше 1,4 МВт с расходом натрия через АЗ, равным 100 м<sup>3</sup>/ч. Реально, реактор ИБР-2 до его останова работал при мощности 1,5 МВт, но с несколько большим расходом натрия 114 м<sup>3</sup>/ч. Это полностью согласуется с данными, приведенными на рис. 17, поскольку повышение расхода вводит отрицательную реактивность, которая в данном случае компенсировала ослабление мощностной обратной связи, наблюдаемое в ИБР-2 в конце кампании.

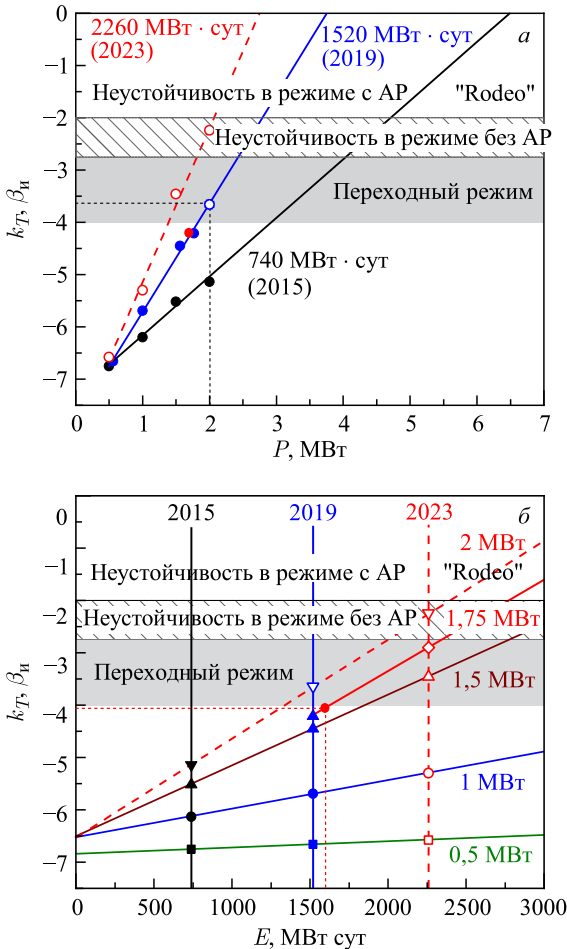


Рис. 18. Границы устойчивости ИБР-2М в зависимости от мощности реактора (а) и энергоспроизводства (б)

И еще одна важная особенность, которая следует из анализа рис. 17 и которая может быть использована при проектировании ИРПД в будущем. Изначально реактор ИБР-2 проектировался при мощности 4 МВт, но в процессе энергетического пуска среднюю мощность ограничили 2 МВт. Если бы мощность реактора оставили на уровне проектной 4 МВт, то, как следует из рис. 17, через удовлетворительную границу стабильности реактор перешел бы уже при энерговыработке всего 500 МВт · сут, т. е. через 125 эффективных суток. Дальнейшая работа реактора была бы возможна только при существенно пониженной мощности, например, 2 МВт и ниже.

**6.3. Иллюстрация к границам устойчивости ИБР-2М.** Как видно из сказанного, нестационарная динамика ИРПД определяется изменением в процессе работы реактора параметров быстрой МОС, т. е. решающим фактором нестационарности является энерговыработка. Некоторым обобщенным и наиболее информативным параметром МОС можно считать полный коэффициент быстрой МОС  $k_T$ . Этот коэффициент изменяется в зависимости от мощности и энерговыработки. Поэтому его можно использовать для оперативной оценки удаленности или, наоборот, близости состояния реактора к границе устойчивости. На рис. 18 показаны две зависимости коэффициента  $k_T$ : от мощности и энерговыработки, приведены также границы устойчивости реактора. Первая граница — «неустойчивость в режиме с АР» получена по модели динамики путем варьирования  $k_T$  при замкнутой системе АР. В этой области при значении  $k_T$  по модулю меньше двух реактор становится неустойчивым даже при работе системы АР. Этот режим по аналогии назван как режим «Rodeo». Вторая граница — «неустойчивость в режиме без АР» соответствует состоянию реактора при  $k_T$  по модулю менее 2,75. В этой области, обозначенной на рис. 18 (заштрихованным участком), реактор неустойчив в режиме саморегулирования. Далее до значения  $k_T$  менее четырех действует переходная область, в которой реактор в режиме саморегулирования может какое-то короткое время находиться в неустойчивом состоянии, например, за счет стохастического разброса мощности или резкого ослабления МОС. Ниже по рисунку реактор устойчив во всех режимах.

## ВЫВОДЫ

- Деградационные изменения в активной зоне ИРПД в процессе работы реактора приводят к сильному ослаблению быстрой МОС, что вызывает появление низкочастотной колебательной неустойчивости.
- Колебательная неустойчивость в ИРПД включает элементы стохастической неустойчивости и усиливается с ростом флуктуаций реактивности и энерговыработки.

- В целях безопасности мощность ИРПД из-за неустойчивости ограничена 2–3 МВт.
- Для понимания физической природы нестабильности и ее нестационарности необходимы дополнительные исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.* Safe External Reactivity Perturbation Limits in IBR-2 // *Ann. Nucl. Energy.* 2011. V. 38(5). P. 1109–1114.
2. *Ли Эн Чхан, Пенельшиев Ю. Н.* Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-1. Дубна, 2008.
3. *Dragunov Yu. G., Tretyakov I. T., Lopatkin A. V. et al.* Modernization of the IBR-2 Pulsed Research Reactor // *At. Energy.* 2012. V. 113(1). P. 29–34.
4. *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.
5. *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(3). P. 435–438.
6. *Bondarchenko E. A., Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.* Experimental and Model Investigations of the Dynamic Features of the IBR-2 Pulsed Reactor of Periodic Operation // *Phys. Part. Nucl.* 2004. V. 35(4). P. 928–983.
7. *Понов А. К.* Основы контроля ядерного реактора. Руководство. М.: Изд-во МГУ, 2012.
8. *Bondarenko I. I., Stavisskii Yu. Ya.* Pulsed Operating Regime of a Fast Reactor // *At. Energy.* 1959. V. 7(5). P. 417–420.
9. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* IBR-2M Reactor Power Feedback Parameters Evaluation Using Square Reactivity Oscillations // *At. Energy.* 2017. V. 122(2). P. 75–80.
10. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Stability Analysis of the IBR-2M Pulsed Reactor of Periodic Operation at Self-Regulating Regime // *Proc. of Intern. Conf. on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering.* Jeju, Korea, April 16–20, 2017.
11. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Stability Analysis of the IBR-2M Pulsed Reactor in Automatic Regulated Regime at Various Levels of Average Power // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2018. V. 173. P. 04012.
12. *Schultz M. A.* Control of Nuclear Reactors and Power Plants. Westinghouse electric corporation Pittsburgh, Pennsylvania, 1955.

Получено 28 января 2020 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 03.03.2020.

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

Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,06. Тираж 215 экз. Заказ № 59898.

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/)