

P13-2021-11

Ю. Н. Пепельшев, Д. Сумхуу

О ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ДИНАМИКИ  
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА **ИБР-2М**

Направлено в журнал «Nuclear Engineering and Design»

Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.

P13-2021-11

### О циклическом изменении динамики импульсного реактора ИБР-2М

Показано, что в реакторе ИБР-2М к концу реакторного цикла наблюдаются изменения динамики, связанные с сильным ослаблением быстрой мощностной обратной связи (МОС), в результате чего реактор становится колебательно-неустойчивым. При останове реактора отрицательные изменения в динамике исчезают и стабильность реактора восстанавливается. Таким образом, в реакторе происходят циклические изменения колебательной неустойчивости. Экспериментально отмечена взаимосвязь быстрой МОС с медленной, что позволяет практически полностью устранить циклический компонент неустойчивости путем изменения режима управления органами системы управления и защиты.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2021

Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.

P13-2021-11

### The Cycle Changing of Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor

It is shown that in the IBR-2M reactor by the end of the reactor cycle, changes in dynamics are observed associated with a strong weakening of the fast power feedback (PFB), as a result of which the reactor becomes oscillatory unstable. When the reactor is shut down, negative changes in dynamics disappear and the stability of the reactor is restored. Thus, the reactor undergoes cyclic changes in the oscillatory instability. The correlation between a fast PFB and a slow PFB is experimentally observed, which makes it possible to almost completely eliminate the cyclic component of instability by changing the control mode of rods of the control system.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор ИБР-2М периодического действия работает с 2012 г. в ОИЯИ (Дубна) при частоте импульсов  $5 \text{ с}^{-1}$  и средней мощности 2 МВт. Режим работы реактора организован так называемым циклическим образом: две недели работа на мощности с последующим перерывом на неделю при нулевой мощности. Оказалось, что при таком циклическом режиме динамика ИБР-2М также испытывает циклические изменения. Эти изменения проявляются в том, что стабильность реактора к концу цикла ухудшается, а к началу следующего — восстанавливается. Нарушение стабильности проявляется в виде роста амплитуды низкочастотных (с периодом 10 с) колебаний энергии импульсов. Явление циклического изменения динамики и соответствующего ему циклического изменения колебательной неустойчивости импульсного реактора дает совершенно новое представление о его динамике. В связи с важностью понимания природы автоколебаний вообще и автоколебаний циклического характера в особенности и были проведены исследования. На основе разработанной модели динамики ИБР-2М и экспериментальных данных по параметрам быстрой мощностной обратной связи оценена структура колебательной неустойчивости реактора и определены факторы, влияющие на неустойчивость. Показаны способы ухода от циклической неустойчивости, и определены направления дальнейших исследований.

### 1. ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ

В литературных источниках 1950–1960-х гг. описаны случаи проявления автоколебаний в реакторах непрерывного действия. В некоторых случаях автоколебания приводили к расплавлению активной зоны [1]. В импульсных реакторах периодического действия автоколебательные эффекты должны проявляться гораздо сильнее, чем в стационарных. Во-первых, из-за более высокой чувствительности импульсного реактора к изменению реактивности, во-вторых, сама «импульсность» при некоторых условиях может резонансно усиливать автоколебания. Для ИБР-2М характерно следующее. С ростом энерговыработки быстрая мощностная обратная связь (МОС) ослабевает, и на каком-то этапе работы в реакторе возникают низкочастотные колебания энергии импульсов [2]. Мощностную обратную связь для ИБР-2М, постоянные времени которой менее 2 мин, принято считать быстрой обратной связью. Физическая природа автоколебаний импульсных реакторов недостаточно изучена, но есть некоторые экспериментальные данные. Например, несмотря на различия, в проявлениях автоколебаний обоих реакторов (ИБР-2 и ИБР-2М) имеются некоторые

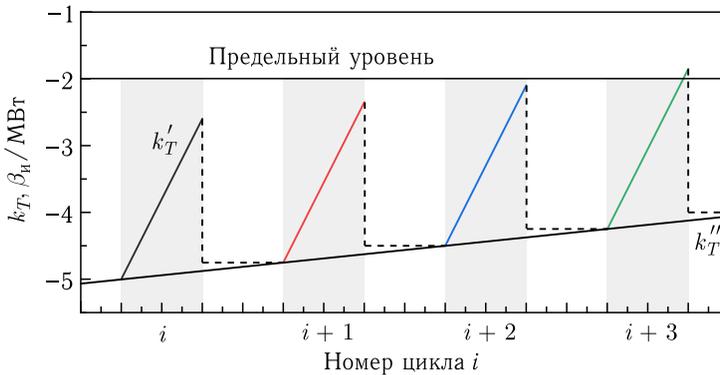


Рис. 1. Схема ослабления быстрой МОС ИБР-2М в зависимости от времени:  $k_T$  — полный коэффициент передачи быстрой МОС;  $k_T'$  — циклический компонент коэффициента передачи быстрой МОС;  $k_T''$  — накопительный компонент коэффициента передачи быстрой МОС

общие закономерности. Основная из них заключается в том, что в процессе роста полной энерговыработки (от начала кампании) происходит усиление (накопление) неустойчивости [2]. Можно предположить, что накопительный эффект неустойчивости связан с деградиционными процессами, происходящими в активной зоне или ее ближайшем окружении.

Существует и другой эффект колебательной неустойчивости — циклический. Более четко циклический эффект проявился на ИБР-2М. Заключается он в следующем: за короткое время при достаточно малой энерговыработке ( $\sim 20\text{--}30$  МВт·сут) реактор переходит в колебательное состояние. Практически за две недели работы реактор из устойчивого состояния может перейти в неустойчивое. После останова реактора накопленные за цикл отрицательные изменения в динамике исчезают, и в следующем цикле усиление колебательной неустойчивости происходит вновь. Такой эффект можно назвать циклическим, поскольку он повторяется от цикла к циклу. Для понимания вышесказанного на рис. 1 представлена схема ослабления быстрой МОС в процессе работы ИБР-2М. Показано изменение накопительного  $k_T''$  и циклического  $k_T'$  компонентов коэффициента передачи быстрой МОС. Видно, что с течением времени реактор может подойти к области неустойчивости, отмеченной на рис. 1 коэффициентом  $k_T = k_T'' + k_T' = -2\beta_n/\text{МВт}$ .

## 2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2М

Активная зона реактора имеет форму вертикальной шестигранной призмы (рис. 2). Все грани призмы, кроме одной, окружены отражателями, которые могут перемещаться в вертикальном направлении, в той или иной степени приоткрывая активную зону и тем самым меняя плотность

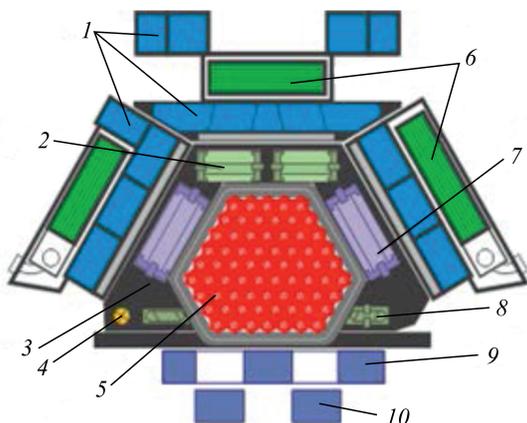


Рис. 2. Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М: 1 — водяные замедлители; 2 — блоки аварийной защиты (АЗ<sub>1</sub> и АЗ<sub>2</sub>); 3 — стационарный отражатель; 4 — автоматический регулятор (АР); 5 — тепловыделяющие сборки; 6 — холодные замедлители; 7 — блоки компенсирующих органов (КО<sub>1</sub> и КО<sub>2</sub>); 8 — ручной регулятор (РР); 9 — основной подвижный отражатель (ОПО); 10 — дополнительный подвижный отражатель (ДПО)

нейтронов в активной зоне вследствие изменения утечки нейтронов из нее. Эти отражатели выполняют функцию органов управления и защиты (ОУЗ): компенсирующих органов (КО<sub>1</sub>, КО<sub>2</sub>), автоматического регулятора (АР), промежуточного регулятора (ПР) и аварийной защиты (АЗ<sub>1</sub>, АЗ<sub>2</sub>), обеспечивающей прекращение цепной реакции. Компенсирующие органы компенсируют выгорание топлива и отрицательную реактивность обратной связи, обусловленную разогревом реактора. Автоматический регулятор поддерживает мощность на заданном уровне. Промежуточный регулятор включается оператором для компенсации медленного ухода реактивности, с тем чтобы автоматический регулятор не выходил из средней зоны, в которой его реактивность зависит от перемещения практически линейно. Мимо свободной грани проходит подвижный отражатель (ПО), который состоит из двух стальных лопастей. Лопасти вращаются в противоположных направлениях с разными скоростями в кожухе, заполненном гелием. Скорость основного подвижного отражателя — 600 об/мин, дополнительного — 300 об/мин. Когда лопасти проходят мимо активной зоны одновременно, создается импульс реактивности. В штатном режиме положение органов управления таково, что реактор в течение ~ 400 мкс находится в надкритическом состоянии на мгновенных нейтронах. В течение этого времени происходит стремительный рост мощности.

Когда лопасти отходят от активной зоны, реактивность резко уменьшается, реактор становится глубокоподкритическим, мощность реактора стремительно падает. Эффективность подвижного отражателя  $\Delta k_{\text{ПО}}$  (т. е. обусловленное ПО изменение реактивности от максимума до минимума) очень

большая:  $\Delta k_{\text{ПО}} = 0,03$ , т. е. 3%. Поэтому между импульсами мощности состояние реактора глубокоподкритическое. В результате реактор генерирует очень узкие импульсы мощности с шириной, на половине высоты равной  $\sim 200$  мкс, и периодом 0,2 с. В импульсах выделяется 92% генерируемой реактором энергии, между импульсами — 8%.

### 3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ИБР-2М ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ РЕАКТОРА В ЦИКЛЕ

Для исследования ИБР-2М была создана математическая модель реактора [3–7]. С помощью этой модели можно анализировать частотные передаточные характеристики реактора и по ним оценивать запас устойчивости. Модель построена на основе модульной структуры с блоками кинетики, возмущающей реактивности, автоматического регулирования и мощностной обратной связи [3–5] (рис. 3).

В блок возмущающей реактивности входят данные по дифференциальной эффективности всех органов регулирования, а также по различным моделированным процессам изменения реактивности. Блоку кинетики соответствует система уравнений импульсного реактора, полученная из уравнений одноточечной модели кинетики [3, 4]. Блок автоматического регулирования представлен блоком фильтров и блоком управления [5]. Нелинейная система кинетики в модели представлена в линеаризованном виде дискретных частотных передаточных функций реактора. Линеаризованным уравнениям кинетики и МОС ИБР-2М соответствует структурная схема, представленная на рис. 4. Параметры быстрой МОС (коэффициенты передачи и постоянные времени) определялись экспериментально. Медленные эффекты МОС достаточно полно компенсируются системой автоматической стабилизации мощности и в модели устойчивости ИБР-2М не учитываются. Для оценки запаса устойчивости использовался частотный критерий Найквиста.

Выражения для частотных дискретных передаточных функций кинетики ( $W_S^*(j\bar{\omega})$ ,  $W_E^*(j\bar{\omega})$ ) и МОС ( $W_{T\Delta E}^*(j\bar{\omega})$ ) в общем виде следующие:

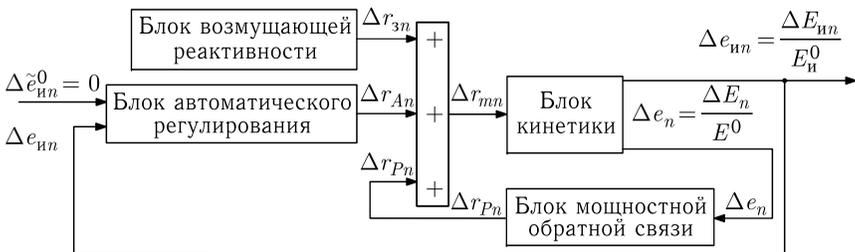


Рис. 3. Блок-схема модели динамики реактора ИБР-2М для режима автоматического управления мощностью



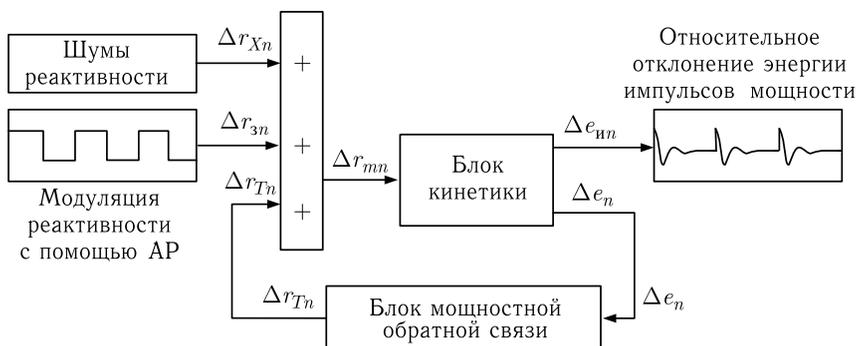


Рис. 5. Модель динамики реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования при экспериментальной оценке параметров быстрой МОС

Реактор между импульсами находится в глубокоподкритическом состоянии и введенную реактивность воспринимает в момент развития импульса мощности как мгновенный скачок. Однако из-за больших флуктуаций энергии импульсов ( $\pm 25\%$ ) получить статистически достоверные оценки амплитуд и временных параметров всех компонентов обратной связи, вплоть до самых коротких, действующих в пределах нескольких импульсов (доли секунды), можно только при анализе переходных процессов, вызванных достаточной длинной серией периодических колебаний реактивности небольшой амплитуды [9]. Периодическая модуляция реактивности осуществлялась путем перемещения за время между вспышками стержня АР. Блок автоматического регулятора в эксперименте был выведен из контура автоматического регулирования и использовался в качестве задатчика возмущающей реактивности. Величина вносимой стержнем АР реактивности определялась по зависимости «перемещение–реактивность», измеренной во время физического пуска реактора [8]. Для оценки МОС измерялись энергия каждого импульса, положение автоматического регулятора и других блоков регулирования относительно активной зоны, а также температура и расход натрия на входе в активную зону. Измерения проводились с 2019 по 2020 г. во всех циклах при мощности 1,75, 1,65 и 1,55 МВт и расходе натрия через активную зону  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Интервал общей энерговыработки от начала кампании реактора во время измерений составлял 1400–1670 МВт·сут.

Быструю МОС ИБР-2М можно описать в виде суммы трех параллельных звеньев [9]:

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

$$r_{Tjn} = \left( r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \right) \exp \left( -\frac{T_n}{T_{Tj}} \right), \quad (4)$$

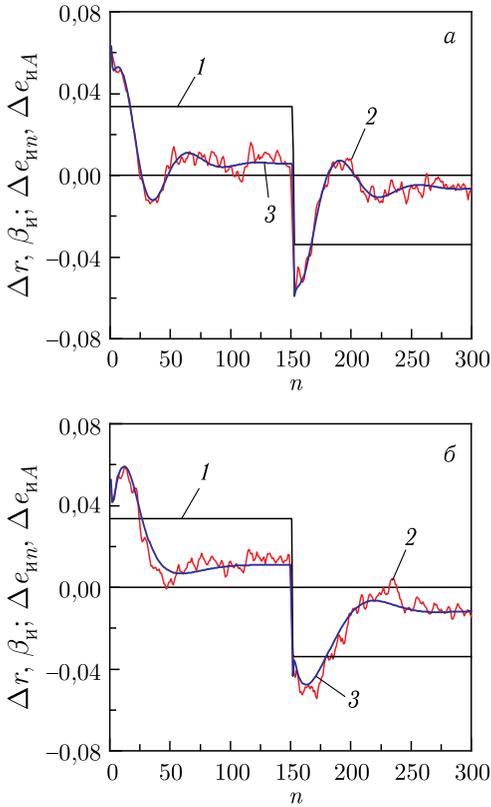


Рис. 6. Переходные процессы изменения энергии импульсов при прямоугольных колебаниях задающей реактивности  $\Delta r_z = \pm 0,034\beta_n$  (1) при мощности реактора 1,75 МВт в начале (а) и конце (б) цикла:  $\Delta e_{ин}$ ,  $\Delta e_{иА}$  — относительное отклонение энергии импульсов, зарегистрированное (2) и вычисленное (3) соответственно,  $n$  — номер импульса мощности

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. Коэффициенты передачи МОС в общем случае были приняты нелинейными,  $\Delta E_{n-1}$  — отклонение полной энергии за период  $n$ -го импульса мощности от базового значения.

На рис. 6 для примера показаны переходные процессы изменения энергии импульсов в начале (рис. 6, а) и в конце (рис. 6, б) одного из реакторных циклов при мощности 1,75 МВт. В таблице приведены значения параметров МОС ИБР-2М, соответствующие переходным процессам (см. рис. 6). Величина  $k_T$  представлена в так называемой импульсной доле

Параметры быстрой МОС ИБР-2М, представленной тремя аperiodическими звеньями, при мощности 1,75 МВт и расходе теплоносителя через активную зону 100 м<sup>3</sup>/ч в начале и в конце реакторного цикла ( $c_{Tj}$  — коэффициент нелинейности,  $j$  — номер составляющей МОС)

Изменение энерговыработки от начала цикла $\Delta B$ , МВт·сут	Параметр	$j$		
		1	2	3
3	$k_T = \sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	—	-3,37	—
	$k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-3,96	1,24	-0,65
	$T_{Tj}, \text{с}$	8,80	1,31	0,45
	$c_{Tj}$	0	0	0
16	$k_T = \sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	—	-1,82	—
	$k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-1,83	1,95	-1,94
	$T_{Tj}, \text{с}$	11,08	0,59	0,38
	$c_{Tj}$	0,82	2,03	0,06

запаздывающих нейтронов  $\beta_n$ , которая позволяет при переходе реактора в импульсный режим использовать известные уравнения кинетики. Для ИБР-2М  $\beta_n = 1,57 \cdot 10^{-4}$ .

## 5. ОЦЕНКА ГРАНИЦЫ УСТОЙЧИВОСТИ ИБР-2М ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОЙ МОС В ЦИКЛЕ

Поскольку колебательная неустойчивость в любых ядерно опасных установках должна быть устранена, рассмотрим этот эффект на ИБР-2М подробнее, чтобы не повторять его при проектировании будущих импульсных систем.

Наиболее информативный параметр МОС, зависящий от уровня мощности и энерговыработки, который можно использовать для анализа динамики реактора в циклах, — суммарный коэффициент передачи быстрой МОС  $k_T$  [2]. В процессе работы ИБР-2М наблюдаются три вида реакторных циклов: 1) цикл с постоянной мощностью; 2) цикл, в котором может быть один или даже несколько сбросов мощности; 3) цикл, в котором мощность к его концу была снижена.

На рис. 7 показаны результаты изменения суммарного коэффициента  $k_T$  в зависимости от изменения энерговыработки в циклах при постоянной мощности 1,75, 1,65 и 1,55 МВт. Также показано изменение  $k_T$  в зависимости от средней мощности при некоторых значениях энерговыработки. Предельный уровень быстрой МОС  $k_T = -2\beta_n/\text{МВт}$  на рис. 7 соответствует расчетной границе колебательного состояния реактора в режиме

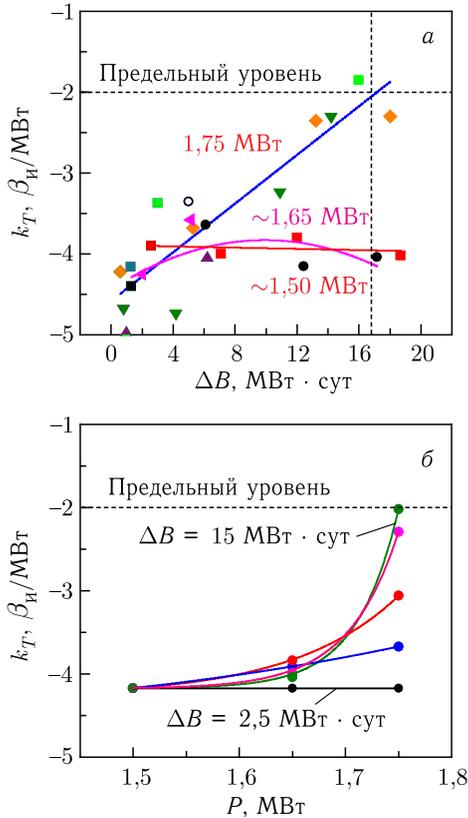


Рис. 7. Результаты изменения суммарного коэффициента передачи быстрой МОС ИБР-2М в зависимости от энерговыработки (а) и средней мощности (б) в отдельных реакторных циклах при мощности 1,75, 1,65 и 1,55 МВт. Уровень  $k_T = -2\beta_n/\text{МВт}$  — расчетная граница устойчивости реактора в режиме АР

автоматического регулирования мощности. В режиме саморегулирования (при отключенной системе АР) реактор при таком значении  $k_T$  уже колебательно неустойчив.

Из рис.7 видно, что суммарный коэффициент МОС  $k_T$  в процессе работы реактора в циклах при мощности 1,75 МВт уменьшается по модулю вплоть до границы колебательной неустойчивости, но к началу следующего цикла принимает в среднем исходное значение. Усредненное изменение коэффициента  $k_T$  в циклах при мощности 1,75 МВт до энерговыработки 17 МВт · сут можно представить линейной зависимостью

$$k_T = (-4,63 \pm 0,19) + (0,15 \pm 0,02)\Delta B,$$

в которой  $k_T$  выражен в единицах  $\beta_n/\text{МВт}$ ;  $\Delta B$  — изменение энерговыработки в единицах МВт · сут. Таким образом, при мощности 1,75 МВт

зависимость  $k_T$  от энерговыработки достигает границы устойчивости при энерговыработке, равной 17 МВт·сут.

Соответствующие зависимости, полученные при пониженной мощности (1,65 и 1,55 МВт), кардинально отличаются от зависимости при 1,75 МВт. Из рис. 7, а видно, что зависимость  $k_T$  от энерговыработки слабо меняется и имеет большой запас до границы устойчивости. При этом мощностная зависимость  $k_T$  вблизи 1,70–1,75 МВт (см. рис. 7, б) при энерговыработке вблизи 17 МВт·сут имеет явный пороговый характер, при мощности 1,75 МВт реактор находится на границе устойчивости, а при небольшом снижении мощности (до 1,70 МВт) — вдали от неустойчивости ( $k_T = -3,5\beta_{и}/\text{МВт}$ ).

Исследования динамики реактора были проведены также в циклах со сбросом и снижением мощности (рис. 8). Сброс мощности был обуслов-

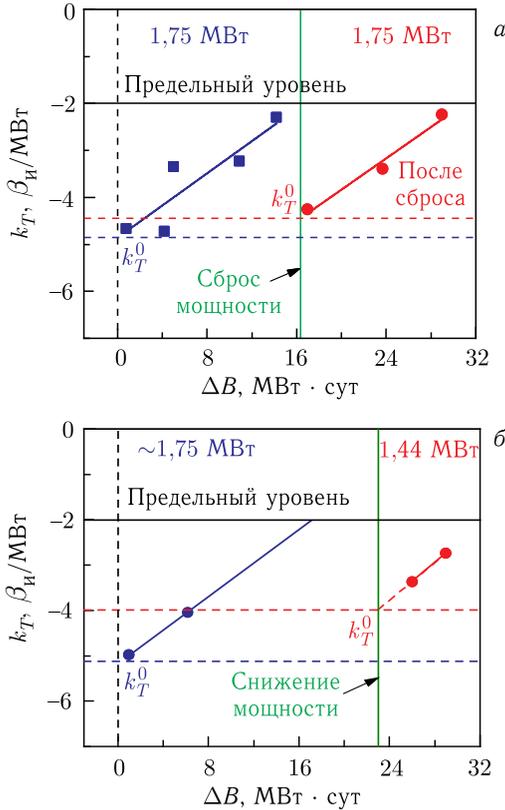


Рис. 8. Результаты изменения суммарного коэффициента передачи быстрой МОС ИБР-2М  $k_T$  при средней мощности 1,75 МВт в зависимости от энерговыработки в циклах: а) со сбросом мощности; б) с уменьшением средней мощности до 1,44 МВт

лен причинами, не связанными с проведением измерений. После сброса коэффициент  $k_T$ , как видно из рис. 8, *a*, увеличился по модулю более чем в 2,5 раза. После повторного выхода подъема мощности изменение  $k_T$  продолжилось в прежнем, как и до сброса, темпе.

Как бы парадоксально ни звучало, сброс мощности положительно повлиял на устойчивость ИБР-2М и позволил продолжить безопасную работу реактора вплоть до 30 МВт·сут (см. рис. 8, *a*). Суммарный коэффициент  $k_T$  после снижения мощности ведет себя так же, как и при сбросе. Однако положительный эффект от снижения мощности проявляется в меньшей степени, чем при сбросе. В целом при мощности 1,70–1,75 МВт устойчивая работа реактора может длиться не более 10–11 сут. Для продления безопасной работы реактора в цикле более 11 сут требуется применить один или сразу несколько способов ухода от неустойчивости, например снижение мощности.

Расчетные границы колебательной неустойчивости ИБР-2М в циклах оценены следующим образом (рис. 9): при  $k_T \leq |-2| \beta_n/\text{МВт}$  реактор неустойчив в режиме автоматического регулирования, при  $k_T \leq \leq |-2,75| \beta_n/\text{МВт}$  неустойчивость возникает уже в режиме саморегулирования, при  $k_T \geq |-4| \beta_n/\text{МВт}$  реактор всегда устойчив.

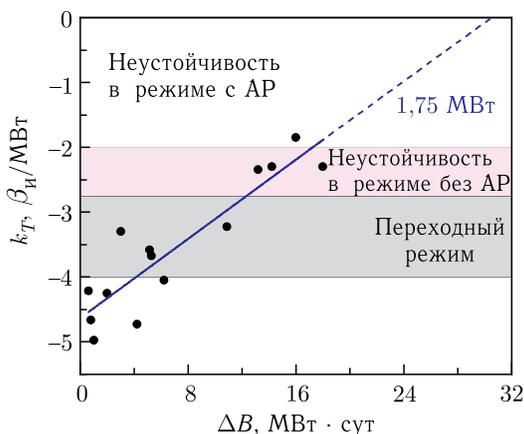


Рис. 9. Расчетные границы устойчивости ИБР-2М при мощности 1,75 МВт в зависимости от изменения энерговыработки в цикле

Нужно отметить, что приведенные на рис. 7–9 данные не раскрывают физической природы возникновения колебательной неустойчивости реактора, а только отражают некоторые ее проявления, связанные с экспериментально наблюдаемым ослаблением быстрой МОС.

## 6. ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ ИБР-2М В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ В ЦИКЛЕ

Оценку границы допустимой энерговыработки в цикле можно получить не только с помощью анализа коэффициента быстрой МОС  $k_T$ , но и с помощью расчетного изменения запаса устойчивости реактора в зависимости от энерговыработки в цикле (рис. 10). Для этого использовалась математическая модель динамики ИБР-2М с измеренными параметрами быстрой МОС. Получены расчетные изменения запаса колебательной устойчивости реактора по амплитуде и фазе возмущающей реактивности в зависимости от энерговыработки в цикле.

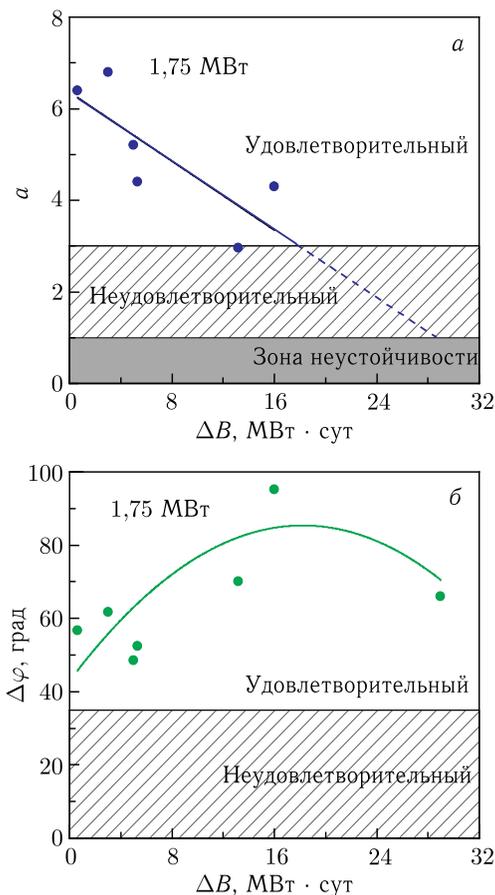


Рис. 10. Расчетные изменения запаса устойчивости ИБР-2М по амплитуде (а) и по фазе (б) в режиме саморегулирования в зависимости от энерговыработки в цикле при мощности 1,75 МВт

Как видно из рис. 10, а, запас по амплитуде к концу цикла уменьшается приблизительно в два раза и приближается к так называемой зоне неудовлетворительной работы реактора. Граница запаса, равная трем, принята рекомендательно как предельно допустимая для сложных систем [9]. Запас, равный единице, определяет границу устойчивости в режиме саморегулирования. Как видно из рис. 10, безопасное значение энерговыработки в цикле при мощности 1,75 МВт составляет 17 МВт·сут, а значение энерговыработки 30 МВт·сут соответствует экстраполированной границе устойчивости реактора в режиме саморегулирования. Запас по фазе, как видно из рис. 10, б, на протяжении всего цикла находится в области выше предельно допустимого значения, равного 35 град, т.е. реактор на протяжении всей работы в цикле находится в зоне фазовой устойчивости [10].

Таким образом, оценки безопасной энерговыработки в цикле, полученные двумя независимыми способами (по данным изменения коэффициента передачи быстрой МОС и расчетному изменению запаса устойчивости ИБР-2М при мощности 1,75 МВт) полностью совпали и равны 17 МВт·сут.

## **7. ОСОБЕННОСТИ МЕДЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ БЫСТРОЙ МОС ИБР-2М В ОТДЕЛЬНОМ РЕАКТОРНОМ ЦИКЛЕ**

Кроме внутризонных процессов, определяющих эффекты быстрой МОС, существенное влияние на реактивность обратной связи оказывают и медленные процессы. Полный мощностной эффект реактивности определяется суммой быстрого и медленного эффектов обратной связи. Как показали исследования на ИБР-2 и ИБР-2М [12], медленные эффекты реактивности во многом связаны с изменением состояния стационарных отражателей, тепловой и радиационной защиты и зависят от изменения температуры и расхода натрия на входе в активную зону и т.д. [11]. Здесь возникает вопрос: могут ли вышеназванные медленные эффекты реактивности влиять на величину коэффициента быстрой МОС и, соответственно, на динамику и устойчивость реактора? Рассмотрим возможную связь медленных эффектов реактивности с быстрыми.

Медленный ход реактивности определяли по балансу реактивности. В критическом состоянии сумма всех эффектов реактивности равна нулю, если система автоматического регулирования компенсирует эти эффекты [12]:

$$\rho_{СУЗ} + \rho_T + \rho_G + \rho_{\varepsilon} + \rho_P + \rho_M + \rho_x = 0, \quad (5)$$

где  $\rho_{СУЗ} = \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})]$  — эффект перемещения органов регулирования,  $k_i(z)$  — эффективность  $i$ -го блока системы управления и защиты;  $\rho_T = k_{тем}(T_{вх} - T_{вх0})$  — температурный эффект реактивности натрия на входе в активную зону (изотермический эффект реактивности),  $T_{вх}$  — температура натрия на входе в активную зону,  $k_{тем}$  — изотермический

коэффициент реактивности;  $\rho_G$  — эффект реактивности от расхода натрия;  $\rho_{\Xi} = k_{\Xi}(B - B_0)$  — эффект реактивности, связанный с энерговыработкой (выгорание топлива),  $k_{\Xi}$  — коэффициент реактивности, связанный с энерговыработкой  $B$ ;  $\rho_P = k_P(P - P_0)$ ,  $k_P$  — эффект и коэффициент передачи быстрой мощностной обратной связи соответственно,  $P$  — мощность реактора;  $\rho_M$  — эффект медленной мощностной обратной связи;  $\rho_x$  — прочие эффекты реактивности, не поддающиеся точной численной оценке. В работе [11] отмечено, что  $\rho_x$  для ИБР-2 можно рассматривать как некоторый случайный шум, поддающийся низкочастотной фильтрации и практически не влияющий на базовое изменение баланса реактивности. Нижний индекс 0 обозначает параметры, соответствующие состоянию импульсной критичности данного цикла. Температурные и расходные эффекты обратной связи оценивались с использованием изотермического  $k_{\text{тем}} = \Delta k / \Delta T = -1,19 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}$  и асимптотического расходного  $k_G = \Delta k / \Delta G_{\text{ac}} = -0,70 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / \text{м}^3/\text{ч}$  коэффициентов реактивности [11]. Все компоненты, входящие в уравнение (5), есть функции времени, по которым определяется ход изменения реактивности за цикл. Полную мощностную обратную связь ( $\rho_{\text{МОС}} = \rho_P + \rho_M$ ) можно представить в виде

$$\rho_{\text{МОС}} = \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{i0})] - \rho_x - (\rho_T + \rho_G + \rho_{\Xi}). \quad (6)$$

Для переменных, входящих в выражение (6), использовали показания исследовательской системы измерения реакторных параметров. Период опроса параметров, кроме мощности, составлял 0,1 с, для энергии импульсов определялся частотой повторения импульсов, т.е. был равен 0,2 с. На рис. 11 для примера приведены результаты типичного изменения медленного эффекта реактивности, вычисленного для циклов с постоянной мощностью, со сбросом и снижением мощности. Для простоты изложения МОС представлена с обратным знаком, т.е. в виде реактивности, компенсирующей эту связь.

Анализ показал, что медленную мощностную связь можно представить двумя инерционными звеньями [12]. С использованием такой модели можно определить изменение реактивности по любой форме изменения мощности, включая циклы со сбросом мощности. Здесь нужно отметить, что для случая сброса мощности понятия баланса реактивности не существует (реактор не находится в критическом состоянии), поэтому процесс сброса можно описать только путем моделирования. В работах [11, 12] показано, что МОС ИБР-2 и ИБР-2М в основном зависит от следующих изменений в ближайшем окружении активной зоны:

- теплового расширения стационарных отражателей;
- сдвига стационарных отражателей;
- изменения спектра нейтронов в биологической защите при ее прогреве;

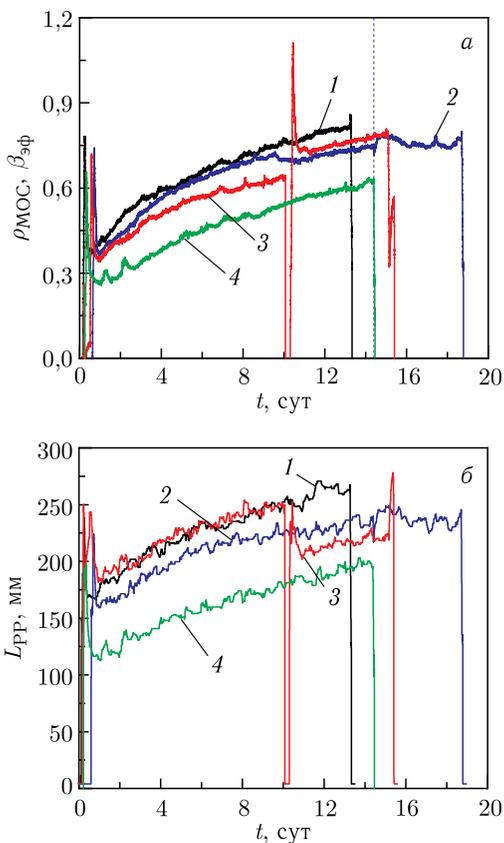


Рис. 11. Результаты изменения полной реактивности МОС  $\rho_{\text{МОС}}(t)$  (а) и перемещения РР (б) в отдельном реакторном цикле после вывода реактора на мощность 1,75 МВт в зависимости от времени ( $t$ , сут): 1 — при постоянной мощности; 2 и 3 — при снижении и сбросе мощности соответственно; 4 — при мощности 1,5 МВт. Пунктирной линией обозначено начало снижения мощности

- сдвига откатных защит с водяными замедлителями и опорных конструкций в биологической защите и подвижном отражателе;
- выгорания топлива.

На рис. 12 показаны результаты изменения суммарного коэффициента передачи быстрой МОС  $k_T$  в зависимости от изменения вводимой органами регулирования компенсирующей медленной реактивности и от положения РР относительно активной зоны в циклах при разных уровнях мощности.

Отметим важные особенности изменения коэффициента быстрой МОС  $k_T$  и его связь с коэффициентом медленной МОС. Как видно из рис. 12, уменьшение коэффициента  $k_T$  по модулю с ростом реактивности медленной компоненты обратной связи имеет четкую корреляционную связь. Физическая причина возникновения медленной МОС, как показали иссле-

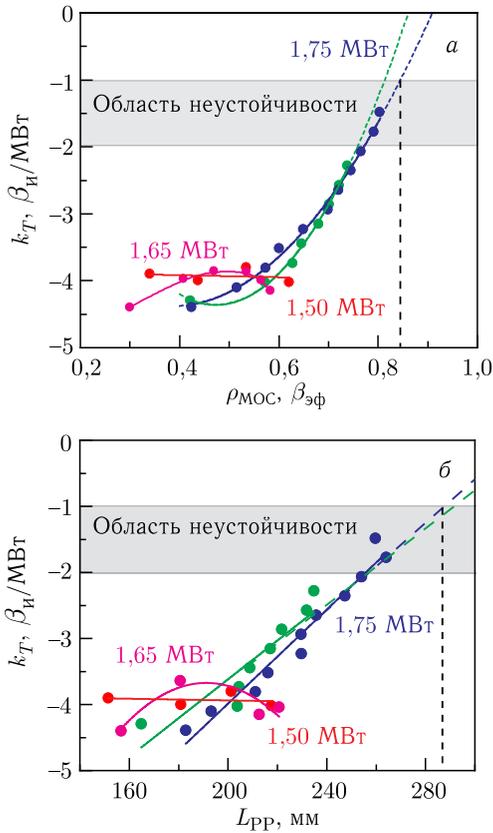


Рис. 12. Результаты изменения суммарного коэффициента передачи быстрой МОС ИБР-2М  $k_T$  в зависимости от изменения реактивности медленной МОС  $\rho_{\text{МОС}}$  (а) и положения РР (б) в циклах при мощности 1,75 1,65 и 1,55 МВт. Серым цветом обозначена область  $k_T$  на границе колебательной неустойчивости реактора в режиме АР мощности

дования этого эффекта на ИБР-2 и ИБР-2М, сложна для интерпретации. Медленные эффекты зависят от многих факторов [11, 12]. Здесь можно только предположить, что быстрый эффект реактивности физически как-то связан с медленным. В этом случае можно принять, что индикатором начала колебательной неустойчивости реактора, как видно из рис. 12, является значение компенсирующей реактивности медленной МОС, равное  $0,84\beta_{\text{эф}}$ .

Приведем некоторые пояснения к рис. 11 и 12. Видно, что во всех циклах компенсация реактивности происходит только с помощью блока РР. Можно предположить, что на изменение  $k_T$  в цикле влияет положение блока РР, т.е. каждой позиции блока РР относительно активной зоны соответствует свой набор параметров быстрой МОС. В эксперименте при

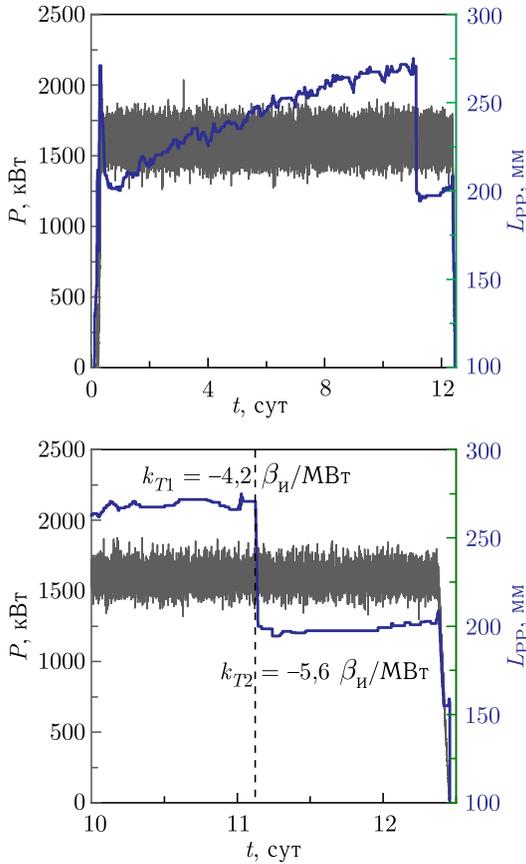


Рис. 13. Эффект усиления быстрой МОС при перемещении РР в более низкое положение относительно активной зоны при мощности  $P = 1,65$  МВт. Снизу перемещение РР показано более подробно

работе реактора при мощности 1,65 МВт блок РР был выведен в фиксированное положение на уровне 200 мм относительно активной зоны (рис. 13), а компенсация реактивности медленной МОС осуществлялась с помощью блока  $\text{KO}_2$ , находящегося на противоположной стороне активной зоны (см. рис. 2). Как видно из рис. 13, такой режим управления реактора существенно повысил глубину быстрой обратной связи ИБР-2М, что привело к устранению колебательной неустойчивости.

Поэтому, исходя из данных, представленных на рис. 13, была сделана попытка «разорвать» связь  $k_T$  с медленной МОС с помощью фиксации положения блока РР в разных циклах на уровне менее 200 мм относительно активной зоны. На рис. 14 показаны результаты изменения  $k_T$  в циклах в зависимости от энерговыработки и от величины медленной МОС при

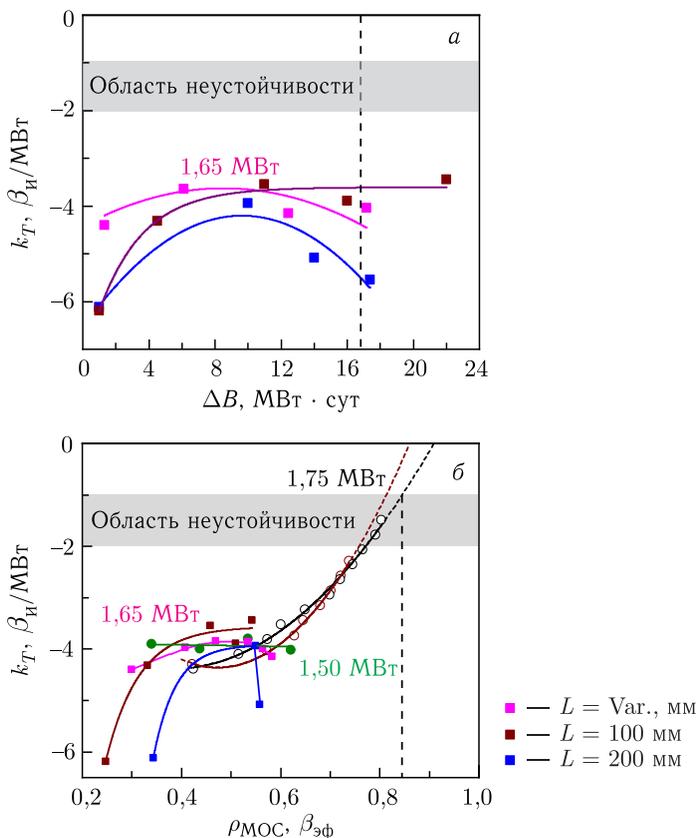


Рис. 14. а) Результаты изменения полного коэффициента быстрой МОС ИБР-2М ( $k_T$ ) в зависимости от энерговыработки в циклах ( $\Delta B$ ) при мощности 1,65 МВт и разном положении РР; б) результаты изменения ( $k_T$ ) в зависимости от реактивности медленной МОС в циклах при мощности 1,75, 1,65 и 1,5 МВт. Серым цветом обозначено значение  $k_T$  на границе колебательной неустойчивости реактора в режиме АР

некоторых уровнях мощности и положениях РР. Из рис. 14 видно, что при определенном положении РР относительно активной зоны в динамическом состоянии реактора появляется существенный запас по величине  $k_T$  до начала развития колебательной неустойчивости реактора.

## ВЫВОДЫ

Исследования показали, что причина циклического изменения динамики ИБР-2М в отдельных реакторных циклах при мощности выше 1,75 МВт связана с сильным ослаблением быстрой мощностной обратной связи. При сравнительно небольшой энерговыработке ( $\sim 17 \text{ МВт} \cdot \text{сут}$ ) суммарный ко-

эффицент передачи МОС к концу цикла уменьшается примерно в 2,5 раза и реактор становится колебательно-неустойчивым. При останове реактора накопленные за цикл отрицательные изменения в динамике исчезают и стабильность реактора восстанавливается. В новом реакторном цикле процесс усиления колебательной неустойчивости повторяется. Фазовая стабильность реактора сохраняется на протяжении всего цикла. Экспериментально отмечена взаимосвязь быстрой МОС с медленной. Показана возможность устранения циклической колебательной неустойчивости путем изменения режима управления органами СУЗ.

Приведенные данные не раскрывают физической природы возникновения циклической колебательной неустойчивости реактора, а только отражают некоторые ее проявления, связанные с экспериментально наблюдаемым эффектом ослабления быстрой МОС и ее связи с медленной МОС. Для изучения природы циклического эффекта неустойчивости необходимы дополнительные исследования.

Авторы выражают благодарность персоналу установки ИБР-2М за помощь в проведении экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ расплавления активной зоны реактора EBR-1. Докл. №2156 (США), представленный на Вторую междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958.
2. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д., Рогов А. Д.* О пределах колебательной неустойчивости импульсных реакторов периодического действия. Препринт ОИЯИ Р13-2020-6. Дубна, 2020.
3. *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.
4. *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, No. 3. P. 435–438.
5. *Marachev A. A., Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Analysis of Dynamics of the IBR-2M Reactor with Statistically Optimal Automatic Regulator // *Atom. Energy.* 2017. V. 123, No. 3. P. 172–175.
6. *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 of Conf.* 2018. V. 173. P. 04012.
7. *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. P. 012099.
8. *Dragunov Yu. G., Tretiakov 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.
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.

10. *Шульц М. А.* Регулирование энергетических ядерных реакторов. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. С. 120.
11. *Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.* Медленные эффекты мощностной обратной связи реактора ИБР-2М. Сообщ. ОИЯИ Р13-2013-7. Дубна, 2013.
12. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.* Модель динамики мощностной обратной связи ИБР-2 с учетом медленных составляющих // АЭ. 2008. Т. 104, вып. 4. С. 197–204.

Получено 10 марта 2021 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 16.04.2021.

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

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,39. Тираж 200 экз. Заказ № 60123.

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/)