

P13-2021-29

Ю. Н. Пепелышев, Ц. Цогтсайхан

ДИНАМИКА
КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
РЕАКТОРА **ИБР-2М**.
АНАЛИЗ ШУМОВ

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.

P13-2021-29

Динамика колебательной неустойчивости реактора ИБР-2М.
Анализ шумов

Представлены результаты исследования динамики шумов энергии импульсов в ИБР-2М с момента ввода реактора в эксплуатацию в 2012 г. при мощности 2 МВт и до середины 2021 г. Показано, что с ростом энерговыработки спектр шумов энергии импульсов усложняется, амплитуда автоколебаний растет. Рост колебательной неустойчивости ИБР-2М был остановлен оптимизацией некоторых параметров реактора. На основе исследований составлена стратегия сдерживания колебательной неустойчивости ИБР-2М на будущее вплоть до выработки его ресурса в 2036 г. Показана необходимость продолжения исследований по динамике шумов для корректировки колебательной неустойчивости реактора.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2021

Pepelyshev Yu. N., Tsogtsaikhan Ts.

P13-2021-29

The Dynamics of Oscillation Instability of the IBR-2M Reactor.
The Noise Analysis

The results of the study on noise dynamics and self-oscillations of the pulse energy in the IBR-2M for period from 2012 at the power of 2 MW until the middle of 2021 are presented. It is shown that with an increase in fuel burnup, the power spectral density of the pulse energy noise becomes more complicated and the amplitude of self-oscillations grows. Based on the data obtained, a strategy was developed to suppress the oscillatory instability of the IBR-2M, up to the life of the reactor in 2036. The need to continue research on the noise dynamics and oscillatory instability of the IBR-2M reactor was shown.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы импульсного реактора периодического действия ИБР-2М в активной зоне (а.з.) реактора развиваются процессы, приводящие к низкочастотным с периодом 10 с колебаниям энергии импульсов (автоколебаниям). Наряду с автоколебаниями, полные колебания мощности ИБР-2М, достигающие $\pm 25\%$, обусловлены еще и действием множества случайных возмущений реактивности [1, 2]. Цель работы состояла в том, чтобы, используя безопасные методы исследования, в данном случае исследование шумов энергии импульсов, «увидеть», как развивается колебательная нестабильность ИБР-2М и как можно «уйти» от нее в безопасную область реакторных параметров. Работа входит в цикл исследований колебательной и других типов неустойчивостей ИБР-2М [2, 3].

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИБР-2М

Импульсный реактор ИБР-2М эксплуатируется в Дубне с 2012 г. при проектной мощности 2 МВт и частоте повторения импульсов 5 с^{-1} . Реактор работает циклами: работа на мощности от 10 до 18 сут, затем перерыв на 7 сут. Импульс мощности длительностью 200 мкс развивается с помощью двух подвижных отражателей, вращающихся вблизи одной из граней шестигранного корпуса активной зоны. Подвижные отражатели выполняют роль модулятора реактивности, который на короткое время переводит реактор из глубокоподкритического состояния в равновесное надкритическое. Активная зона с двуокисью плутония охлаждается жидким натрием с расходом $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Полная загрузка а.з. составляет 69 кассет с семью твэлами в каждой. На 2019 г. топливная загрузка а.з. составила 66 кассет.

Основным средством оперативного управления мощностью являются вольфрамовые блоки отражателей, перемещающиеся в матрице стационарного стального отражателя. К блокам управления СУЗ (рис.1) относятся два компенсирующих органа (КО1, 2), два блока аварийной защиты (АЗ1, 2), промежуточный (ручной) регулятор (ПР) и автоматический регулятор (АР). Регулирование уровня нейтронной мощности ИБР-2М осуществляется с помощью автоматического регулятора. При аварийном сигнале на сброс мощности каждый из блоков аварийной защиты АЗ1, 2 с большой скоростью перемещается вниз и за время между импульсами

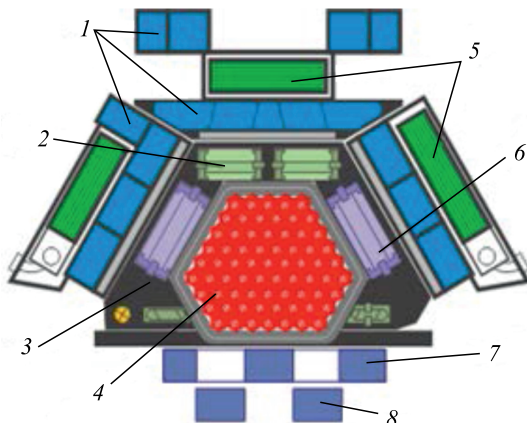


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М. 1 — водяные замедлители; 2 — стационарный отражатель; 3 — блоки АЗ; 4 — тепловыделяющие сборки; 5 — холодные замедлители; 6 — блоки управления; 7 — основной подвижный отражатель; 8 — дополнительный подвижный отражатель

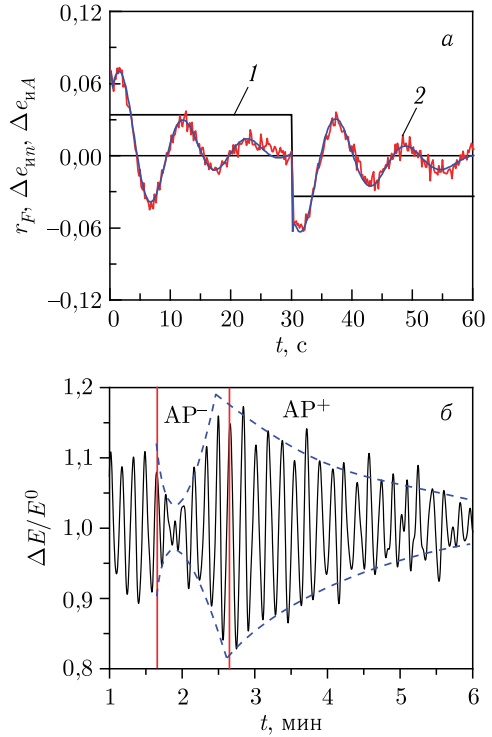
переводит реактор из состояния равновесной импульсной надкритичности в подкритическое состояние. Развитие следующего импульса практически прекращается.

2. НЕКОТОРЫЕ ПОЯСНЕНИЯ К ПРОБЛЕМЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИБР-2М

Согласно теории, система устойчива, если при выведении ее внешними воздействиями из состояния равновесия она возвращается в него после их прекращения [4, 5]. Если система не возвращается к состоянию равновесия, то система неустойчивая. В неустойчивой системе возникшее возмущение усиливается, вызывая колебания возрастающей амплитуды. Усиление происходит до тех пор, пока эти колебания не натолкнутся на нелинейные ограничивающие факторы.

Для безопасной работы реактора необходимо обеспечить его устойчивость во всех рабочих режимах, таких как подъем и снижение мощности, работа на заданном уровне мощности, а также работа в режиме саморегулирования. Пример устойчивого колебательного состояния ИБР-2М при прямоугольных колебаниях возмущающей реактивности в режиме саморегулирования показан на рис. 2, а. Реактор в указанном случае можно считать устойчивым, поскольку его переходная характеристика имеет вид затухающих колебаний. На рис. 2, б приведен другой пример — пример неустойчивого состояния ИБР-2 в режиме саморегулирования [4]. Амплитуда автоколебаний после отключения автоматического регулятора растет экспоненциально, и ее рост прерывается только после перевода реактора в режим АР.

Рис. 2. а) Пример устойчивого колебательного состояния ИБР-2М в режиме саморегулирования при мощности 1,75 МВт при воздействии прямоугольных колебаний задающей реактивности r_F (1); $\Delta e_{и}$ — относительное отклонение энергии импульсов (2), t — время после скачка положительной реактивности; б) Пример неустойчивого колебательного состояния ИБР-2 в режиме саморегулирования при отключении системы АР при мощности 1,5 МВт. Наблюдается экспоненциальный рост амплитуды колебаний энергии импульсов ($\Delta E/E^0$) после отключения АР⁻ и ее снижение после включения АР⁺



Расчетно-экспериментальное исследование неустойчивости ИБР-2М в основном выполняется двумя путями: с использованием математической модели динамики реактора [5, 15] и путем исследования шумов энергии импульсов. Оба метода взаимно дополняют друг друга и дают близкие по прогнозной ценности результаты. Ниже даны основные результаты исследования неустойчивости по шумам энергии импульсов ИБР-2М.

3. МЕТОДИКА НАКОПЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ШУМАМ ИБР-2М

Для ИБР-2М реакторный шум понимается как случайное изменение энергии импульсов. Для исследования структуры шумов ИБР-2М в каждом реакторном цикле, начиная с 2012 и до середины 2021 г., измерялась последовательность значений энергии импульсов (временной ряд). Длина временного ряда за цикл достигала $\sim 4 \cdot 10^6$ значений. Импульсы регистрировались с помощью трех независимых детекторов нейтронов (ионизационных камер деления), расположенных вокруг активной зоны. Непосредственно на выходе каждой ионизационной камеры измерялся ток в максимуме импульса и заряд в импульсе. Параллельно энергии импульсов измерялись расход и температура натрия на входе в а.з., а также

положение всех органов регулирования относительно активной зоны. Для удобства анализа использовались данные как по энергии импульсов, так и по мощности. Реактор генерирует узкий импульс энергии длительностью 200 мкс с периодом 0,2 с. В импульсе выделяется ~91,4% генерируемой реактором энергии, между импульсами — 8,6%. Уровень фоновой мощности определялся в независимых измерениях [6], уровень средней мощности был откалиброван по тепловыделению в а. з. При обработке данных использовался общий статистический и спектральный анализ временных рядов [7].

4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ШУМОВ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ ИБР-2М

На рис. 3 показана плотность распределения колебаний мощности и спектральная плотность колебаний энергии импульсов (здесь мощность — энергия, выделяющаяся за период импульсов, отнесенная к периоду).

Высокий уровень шумов ($\pm 25\%$ от среднего), в первую очередь, вызван высокой чувствительностью реактора к шумам реактивности. Это связано с особенностью кинетики реактора периодического действия, которая определяется не эффективной, а импульсной долей запаздывающих нейтронов. Импульсная β_n и эффективная $\beta_{эф}$ доли запаздывающих нейтронов ИБР-2М соответственно равны $1,57 \cdot 10^{-4}$ и $2,16 \cdot 10^{-3}$, поэтому шумы ИБР-2М в импульсном режиме в ~14 раз ($\beta_{эф}/\beta_n$) больше, чем в стационарном.

Шумы энергии импульсов рассматриваются как полные и парциальные. Под парциальными относительно среднеквадратическими отклонениями η_j понимались колебания в некотором выделенном частотном диапазоне Δf_j : $\eta_j = \left(\sqrt{\frac{\sigma_{f_j}^2}{\sigma_f^2}} \right) \cdot \frac{\sigma_t}{Q} \cdot 100\%$, где $\sigma_f^2 = \sum_{j=1}^z |S^{(i)}(f)|^2 \Delta f$ — дисперсия по спектру, σ_t^2 — дисперсия по временному ряду, $|S^{(i)}(f)|^2$ — спектральная плотность, $\sigma_{f_j}^2 = \sum_{\Delta f_j} |S^{(i)}(f)|^2 \Delta f$ — дисперсия на средней частоте f_j в диапазоне Δf_j , $z = 256$ — число дискретных значений спектральной плотности.

Полные колебания мощности ИБР-2М можно разделить на две большие группы: вынужденные и автоколебания. Вынужденные колебания возникают в результате периодического или случайного во времени воздействия реактивности. Большой вклад в эту компоненту шумов в начальный период работы реактора, до 60% в дисперсию полных колебаний, вносят вибрации лопастей подвижных отражателей (ПО) [8, 9]. Спектр осевых колебаний ПО (по направлению к активной зоне) в виде «замаскированных» частот отражается в спектре шумов энергии импульсов (см. рис. 3).

Другой тип колебаний — автоколебания. Они связаны с быстрой мощностной обратной связью «мощность–реактивность» (МОС), действующей в течение не более двух минут после возмущения мощности [10, 11]. В про-

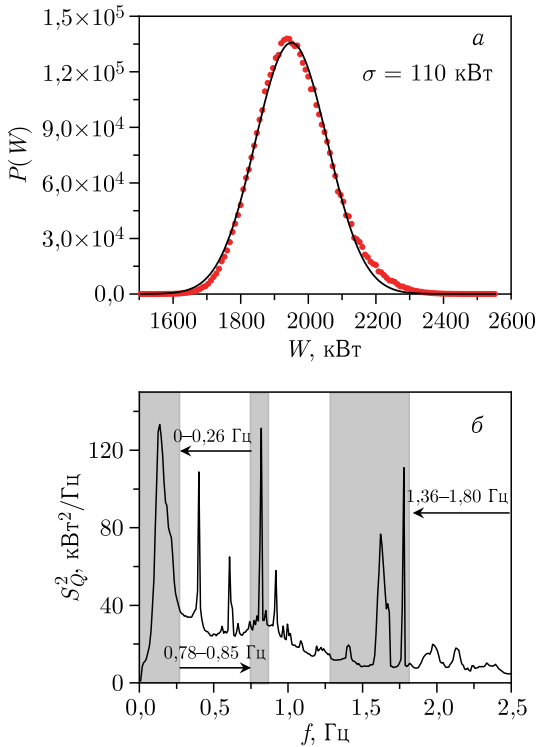


Рис. 3. Плотность распределения флуктуаций мощности с аппроксимацией по Гауссу (а) и спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М (S_Q^2) при мощности 2 МВт (б), f — частота. Область, обозначенная серым цветом в диапазоне 0–0,26 Гц — низкочастотная компонента шумов, в диапазоне 0,78–0,85 и 1,36–1,80 Гц — компонента, связанная с вибрациями подвижных отражателей

цессе работы происходит ослабление МОС, в результате чего появляются автоколебания и границы устойчивости смещаются в сторону меньшей мощности [12–14].

5. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КОЛЕБАТЕЛЬНУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ИБР-2М

Как показывают исследования, на флуктуации мощности и амплитуду автоколебаний существенное влияние оказывают следующие реакторные параметры (в скобках дано противодействие неустойчивости):

- расход натриевого теплоносителя через активную зону (повышение);
- уровень средней мощности (понижение);
- входная температура натрия в а. з. (понижение);
- энерговыработка в цикле (уменьшение);
- параметры системы автоматического регулирования мощности.

С помощью изменения указанных выше параметров в пределах их допустимых значений можно положительно повлиять на устойчивости и тем самым повысить безопасность и надежность работы реактора. Нужно отметить, что кроме автоколебаний спектр низкочастотных колебаний энергии импульсов содержит компоненту, вызванную возмущениями реактивности со стороны медленных мощностных, температурных и расходных эффектов [2, 11]. Система АР реактора направлена не только на уменьшение реакторных шумов, но и на динамическую стабилизацию мощности в различных переходных процессах. Поэтому в спектре колебаний энергии импульсов частично присутствуют так называемые «фоновые» низкочастотные шумы, вызванные медленными эффектами реактивности.

Случайные компоненты реактивности, вызванные вибрациями твэлов или топливных кассет в турбулентном потоке натрия или их термомеханическими перемещениями под действием импульсного энерговыделения, напрямую идентифицировать невозможно, поскольку в а. з. ИБР-2М отсутствуют какие-либо датчики контроля. Влияние внутризонных процессов на реактивность и низкочастотную нестабильность можно оценить в некоторой интегральной форме, например, через параметры быстрой мощностной обратной связи. Именно быстрые эффекты реактивности, как показывают модельные исследования, вызывают низкочастотные колебания энергии импульсов [11, 12].

6. ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛНЫХ И ПАРЦИАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ РЕАКТОРНОГО ШУМА В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ ИБР-2М

Характерное изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М в начале кампании реактора в 2012 г. при мощности 2 МВт и в 2020 г. при мощности 1,65 МВт показано на рис. 4.

На рис. 4 отчетливо видна картина «деградации» колебаний энергии импульсов в процессе работы реактора. Видно размытие и нестабильность

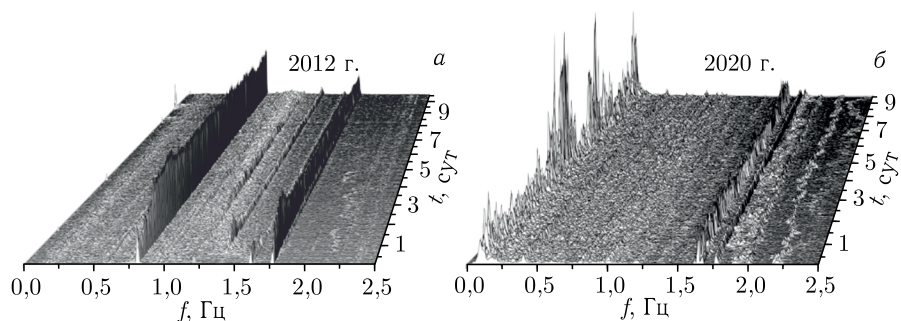


Рис. 4. Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М в отдельных реакторных циклах при мощности 2 МВт в 2012 г. (а) и 1,65 МВт в 2020 г. (б)

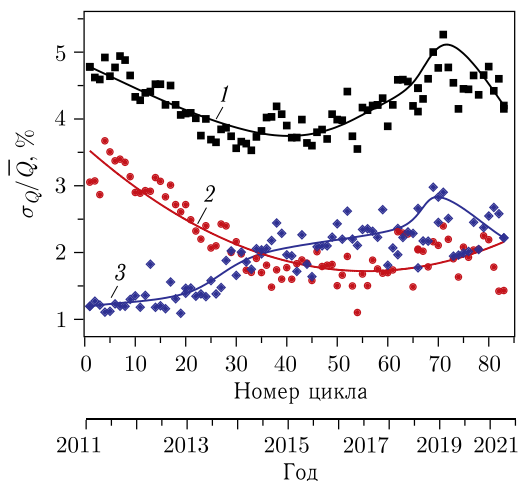


Рис. 5. Изменение величины относительного среднеквадратического отклонения колебаний энергии импульсов в отдельных реакторных циклах: 1 — полные шумы; 2 — шумы, обусловленные вибрациями ПО (0,78–0,85) + (1,36–1,80) Гц; 3 — низкочастотные шумы (~0–0,26 Гц). Сплошные линии есть результат сглаживания данных

амплитуды пиков (вызванных вибрациями ПО), а также появление интенсивной низкочастотной компоненты. Первое связано с износом подвижных отражателей, второе — с усилением колебательной неустойчивости. На рис. 5 показано изменение в процессе кампании реактора относительных среднеквадратических отклонений полных и парциальных колебаний энергии импульсов.

7. СВЯЗЬ АМПЛИТУДЫ АВТОКОЛЕБАНИЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ НЕКОТОРЫХ РЕАКТОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Наиболее сильно автоколебания проявляются при снижении мощности. Как пример на рис. 6 показано проявление колебательной неустойчивости ИБР-2М при штатном снижении мощности от 2 МВт.

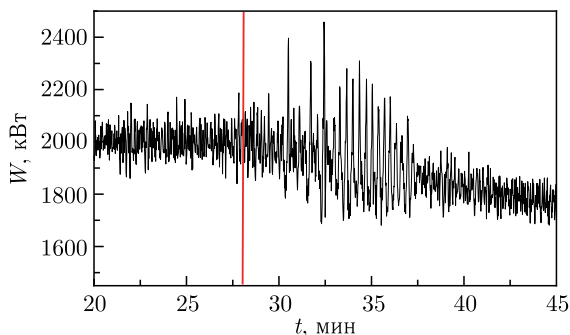


Рис. 6. Колебательная неустойчивость ИБР-2М при штатном снижении мощности от 2 МВт. Вертикальной чертой отмечено начало снижения мощности

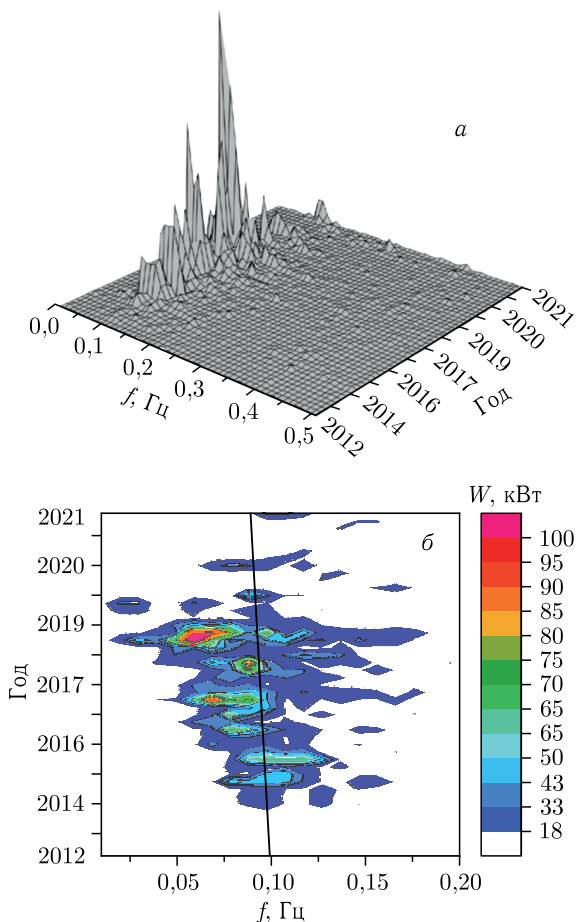


Рис. 7. Изменение низкочастотных колебаний энергии импульсов при снижении мощности в конце реакторных циклов. Линией показан тренд средней частоты автоколебаний

На рис.7 показано изменение низкочастотной компоненты спектра колебаний энергии импульсов при снижении мощности во всех циклах с 2012 по 2021 г. Видно, что с 2018 г. амплитуда автоколебаний существенно снизилась, что было следствием принятых мер, представленных ниже.

Зависимость амплитуды автоколебаний от мощности. На рис.8 показано изменение амплитуды автоколебаний при снижении мощности от 2,0; 1,8 и 1,7 МВт.

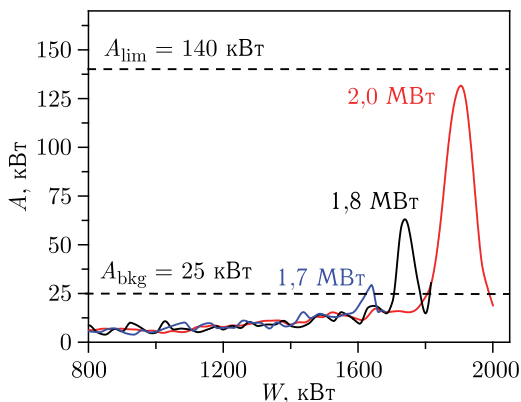


Рис. 8. Изменение амплитуды автоколебаний в частотном диапазоне $\sim 0-0,26$ Гц при снижении мощности от 1,7, 1,8 и 2,0 МВт: предельный уровень амплитуды составляет 140 кВТ

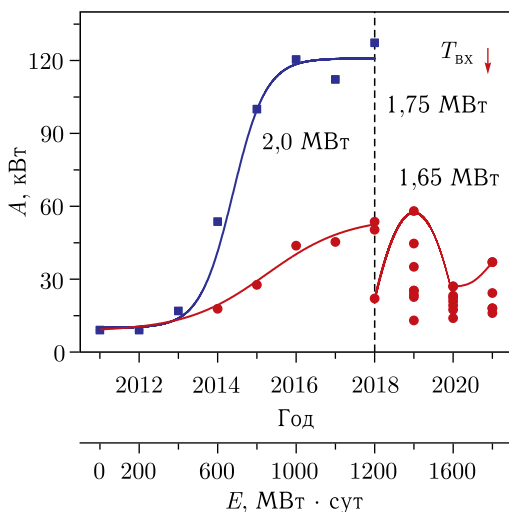


Рис. 9. Изменение максимальной амплитуды автоколебаний при снижении мощности ИБР-2М в конце реакторных циклов в зависимости от полной энерговыработки реактора (E)

По условиям безопасности предельное значение амплитуды низкочастотных колебаний составляет 140 кВТ. Фоновый уровень оценен равным 25 кВТ (см. рис. 8). Этот уровень определяется низкочастотными колебаниями реактивности со стороны системы охлаждения активной зоны — технологически обусловленными колебаниями температуры и расхода натрия на входе в активную зону. Изменение амплитуды низкочастотных колебаний при снижении мощности ИБР-2М в конце всех реакторных циклов с 2012 по 2021 г. показано на рис. 9.

Зависимость амплитуды автоколебаний от энерговыработки и мощности реактора в цикле. Рис. 10 иллюстрирует изменение амплитуды автоколебаний в конце отдельных реакторных циклов в зависимости от энерговыработки в цикле при разных уровнях мощности. Видно, что чем больше энерговыработка, тем больше амплитуда автоколебаний, но к началу нового реакторного цикла амплитуда автоколебаний «восстанавливается». Можно считать, что указанная закономерность есть проявление циклического характера колебательной неустойчивости реактора. Циклический характер неустойчивости ИБР-2М наглядно показан также и в исследованиях с применением математической модели реактора [14].

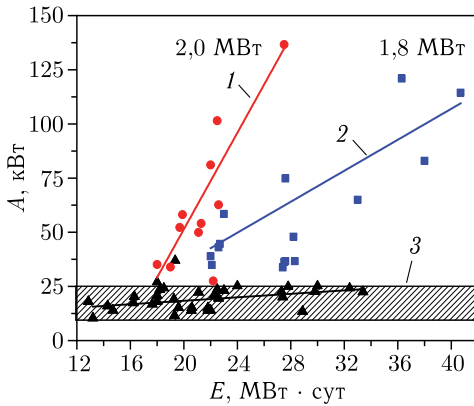


Рис. 10. Изменение максимальной амплитуды автоколебаний при снижении мощности ИБР-2М в зависимости от энерговыработки реактора в отдельных реакторных циклах. Состояния 1 и 2 — нестабильные, 3 — заштрихованная область — состояния стабильные, мощность менее 1,7 МВт

Зависимость амплитуды автоколебаний от температуры натрия-топлива на входе в активную зону. Отметим закономерность в колебательной неустойчивости ИБР-2М, связанную с температурой натрия на входе в активную зону. Небольшое снижение температуры теплоносителя на входе в а.з. (на 5–7 °С) уменьшает амплитуду автоколебаний практически вдвое (см. рис. 11).

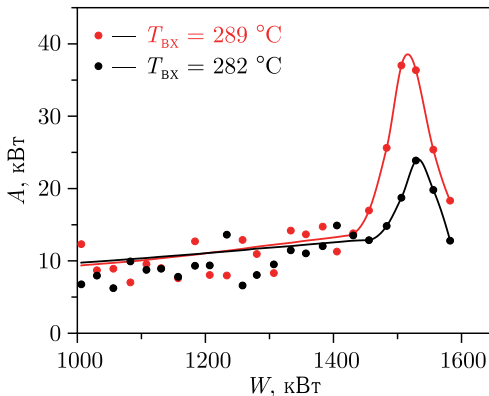


Рис. 11. Изменение амплитуды автоколебаний при частоте 0,1 Гц при снижении мощности от 1,65 МВт в реакторных циклах при разных значениях температуры натрия на входе в а.з.

Анализ эффективности мер по снижению амплитуды автоколебаний. Первые три реакторных параметра из числа приведенных выше в разд. 5: расход натриевого теплоносителя через активную зону, уровень средней мощности и температура натрия на входе в а.з. — можно объединить в некоторую общую зависимость — критерий устойчивости $T_{кр}$, который выглядит простым соотношением между измеряемыми значениями температуры теплоносителя на входе $T_{вх}$ и выходе $T_{вых}$ из активной зоны

$$T_{кр} = T_{вых} = T_{вх} + a \cdot W/G.$$

Здесь G — расход натрия через а.з., $a \cdot W/G$ — подогрев натрия, $a = 3,15$ — коэффициент пропорциональности. Чем меньше $T_{кр}$, тем реактор стабильнее. Величина $T_{вых}$ в зависимости от допустимых по безопасности значений W , G и $T_{вх}$ находится в диапазоне $329 \leq T_{вых} \leq 347$ °С.

Воспользуемся температурным критерием ($T_{кр} = T_{вых}$) для оценки эффективности того или иного способа уменьшения амплитуды автоколебаний. Эффективность в данном случае можно представить в виде отношения изменения амплитуды автоколебаний при изменении выходной температуры натрия ($\Delta A/\Delta T_{вых}$). На рис. 12 приведена зависимость амплитуды автоколебаний от температуры натрия на выходе из а.з. при изменении мощности и температуры натрия на входе в а.з. Там же отмечен эффект уменьшения амплитуды автоколебаний с ростом расхода теплоносителя через а.з. от 100 до 110 м³/ч при мощности 2 МВт. Обращает на себя внимание тот факт, что уменьшение амплитуды автоколебаний при уменьшении подогрева натрия в 5,8 раз эффективнее, чем от снижения входной температуры. Можно предположить, что с увеличением градиента

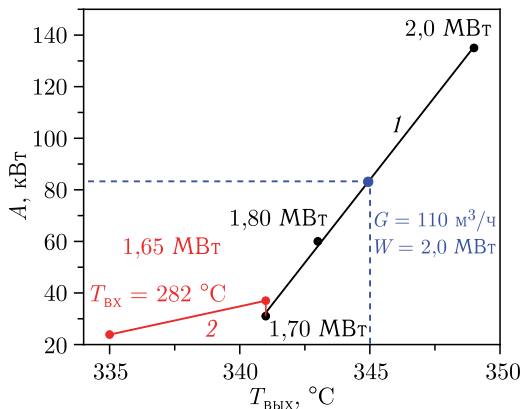


Рис. 12. Изменение амплитуды автоколебаний при снижении мощности в конце циклов при разных значениях температуры натрия на выходе из а.з.: 1 — снижение мощности от 2,0 до 1,8 и 1,7 МВт ($\Delta A/\Delta T = 12,8$ кВт/°C); 2 — снижение температуры натрия на входе в а.з. от 289 до 282 °C ($\Delta A/\Delta T = 2,2$ кВт/°C). Пунктиром отмечено уменьшение амплитуды при увеличении расхода натрия от 100 до 110 м³/ч при мощности 2 МВт

температур натрия по высоте а.з. верхняя часть активной зоны в большей степени влияет на колебательную неустойчивость реактора. Учитывая, что топливные кассеты ИБР-2М закреплены только внизу в цанговых захватах, а сверху свободны, а твэлы, наоборот, жестко закреплены в кассетах сверху, а внизу свободны, можно сказать, что на колебательную неустойчивость реактора в наибольшей степени влияют деформации верхней части топливных кассет, а не нижней части твэлов.

8. СТРАТЕГИЯ СДЕРЖИВАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ИБР-2М

На основе измеренных трендов шумового состояния ИБР-2М представим концепцию работы реактора в режимах, обеспечивающих его надежную и безопасную работу вплоть до выработки полного ресурса. В основу концепции заложено устранение колебательной неустойчивости реактора до безопасного уровня путем оптимального изменения некоторых реакторных параметров. Другие ограничения, например, ресурсные, здесь не рассматриваются. Не рассматриваются также коренные изменения конструкции твэла или активной зоны ИБР-2М, позволяющие уменьшить колебательную нестабильность реактора. Данный вариант видения работы реактора на перспективу использует существующие тенденции изменения шумового состояния реактора от начала его работы с 2012 по 2021 г. (см. рис.5 и 9). Например, на рис.8 показано, как устойчивость была повышена путем снижения мощности, на рис.9 и 10 — за счет снижения мощности и энерговыработки в цикле, а на рис.11 — за счет снижения температуры натрия на входе в а.з.

Рост колебательной неустойчивости ИБР-2М на первом этапе его работы при мощности 2 МВт с 2012 до конца 2018 г. был остановлен оптимизацией параметров системы АР. Оптимизация выполнена расчетно-экспериментальным путем с использованием данных о характере реакторных шумов и разработанной для этой цели модели динамики ИБР-2М [2, 15]. Далее в 2019 г. проявления колебательной неустойчивости реактора были подавлены путем снижения мощности до 1,75 МВт и уменьшения входной температуры натрия в среднем на пять градусов. До конца 2021 г. стабильность реактора обеспечивалась дополнительным снижением мощности до 1,55 МВт.

Стратегия сдерживания автоколебаний с 2022 по 2027 г. не требует особых комментариев. Отметим только, что на этом этапе работы реактора планируется использовать стабилизирующее действие от дальнейшей оптимизации параметров системы АР и уменьшения мощности до 1,50 МВт. Целесообразность продолжения работы реактора при малой мощности, например, 1,0 МВт, в принятой здесь концепции сдерживания не рассматривается.

Далее, запас воздействий со стороны регулируемых параметров реактора на автоколебания может быть исчерпан, и тогда возникнет необходимость перехода на пониженный уровень мощности до 1,3 МВт и по-

вышение расхода натрия через а.з. до 110 м³/ч. Существует и другой вариант сдерживания автоколебаний – перезагрузка всей а.з. на свежее топливо. Перезагрузка топлива позволит реактору ИБР-2М проработать при мощности 2,0–1,6 МВт до 2036 г. Но, очевидно, что эта мера имеет риторический характер.

9. ВЫВОДЫ

Получены экспериментальные данные по изменению шумового состояния ИБР-2М и развитию автоколебаний в реакторе за период от ввода ИБР-2М в эксплуатацию в конце 2011 г. и до 2021 г. включительно. Исследования показали, что в процессе работы реактора структура шумов энергии импульсов усложняется, а общий уровень шумов и амплитуда автоколебаний растут. Рост колебательной неустойчивости ИБР-2М был остановлен оптимизацией параметров системы АР, снижением мощности до 1,50 МВт и некоторым снижением температуры натриевого теплоносителя на входе в активную зону. На основе полученных данных разработана стратегия снижения колебательной неустойчивости ИБР-2М на будущее, вплоть до выработки ресурса реактора в 2036 г. Показана необходимость продолжения исследований по динамике реакторных шумов для корректировки пределов устойчивости ИБР-2М.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ввиду уникальности реактора все изменения в колебательной неустойчивости ИБР-2М необходимо мониторировать и в случае необходимости корректировать концепцию ухода от нестабильности [14, 15]. Решение проблемы устойчивости ИБР-2М в настоящее время ведется в нескольких взаимосвязанных направлениях: это изучение статистически значимых трендов в структуре реакторных шумов, изучение изменений в динамике реактора, вызванных ослаблением быстрой мощностной обратной связи, и расчетным путем с помощью моделирования термомеханических и гидродинамических проявлений ударных последствий в активной зоне, вызванных импульсным выделением энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.* Safe External Reactivity Perturbation Limits in IBR-2M // *Ann. Nucl. Energy.* 2011. V.38. P.1109–1114; Препринт ОИЯИ P13-2010-21. Дубна, 2010.
2. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности. *Сообщ. ОИЯИ* P13-2014-61. Дубна, 2014.
3. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Исследование динамики шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М в процессе выгорания топлива. Препринт ОИЯИ P13-2017-4. Дубна, 2017.

4. *Бесекекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.
5. *Попов А. К.* Основы управления ядерным реактором: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012.
6. *Ананьев В. Д. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщ. ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012.
7. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2012-131. Дубна, 2012.
8. *Пепельшев Ю. Н.* Исследование колебаний подвижных отражателей (энергетический пуск реактора ИБР-2). Сообщ. ОИЯИ 13-87-564. Дубна, 1987.
9. *Pepelyshev Yu. N., Tsogtsaikhan Ts.* Investigation of the Pulse Energy Noise Dynamics at IBR-2M Using Cluster Analysis // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 83. P. 50–56.
10. *Пепельшев Ю. Н., Rogov A. D.* Энергетический пуск реактора ИБР-2М. Параметры расходного эффекта реактивности обратной связи. Препринт ОИЯИ Р13-2013-6. Дубна, 2013.
11. *Пепельшев Ю. Н., Rogov A. D.* Энергетический пуск реактора ИБР-2М. Параметры быстрой мощностной обратной связи. Препринт ОИЯИ Р13-2013-4. Дубна, 2013.
12. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.* Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности // АЭ. 2017. Т. 122, № 2. С. 63–67.
13. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д., Rogov A. D.* О пределах колебательной неустойчивости импульсных реакторов периодического действия // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 2020. Вып. 5. С. 4–18.
14. *Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.* О циклическом изменении динамики импульсного реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2021-11. Дубна, 2021.
15. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // ЭЧАЯ. 2004, Т. 35, вып. 4. С. 928.

Получено 5 июля 2021 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 18.08.2021.

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

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,10. Тираж 200 экз. Заказ № 60228.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/