

P13-2022-44

Ю. Н. Пепелышев, Ц. Цогтсайхан

ВИБРАЦИИ И КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ  
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ИМПУЛЬСНОГО  
РЕАКТОРА **ИБР-2М**

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

Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.

P13-2022-44

Вибрации и колебательная неустойчивость импульсного реактора ИБР-2М

В результате исследований статистических характеристик колебаний энергии импульсов и колебаний подвижных отражателей модулятора реактивности ПО-3 на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М, а также исследований колебаний мощности при изменении расхода натрия через активные зоны обоих реакторов показано, что появление низкочастотной неустойчивости не связано с вибрациями модулятора реактивности или вибрациями внутри зонных элементов.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2022

Pepelyshev Yu. N., Tsogtsaikhan Ts.

P13-2022-44

Vibrations and Oscillation Instability of the IBR-2M Pulsed Reactor

As a result of the studies on the statistical characteristics of pulse energy fluctuations and vibrations of the blades of the movable reflectors PO-3 at the IBR-2 and IBR-2M reactors, as well as studies of pulse energy fluctuations with a change in the sodium flow through the cores of these reactors, it has been shown that the appearance of low-frequency oscillations in both reactors is not related with vibrations of the reactivity modulator or reactor core elements.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2022

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы импульсных реакторов ИБР-2 и ИБР-2М в шумах энергии импульсов возникают различного рода неустойчивости. Основная из них — низкочастотные колебания с периодом, близким к  $\sim 10$  с. Физическая природа таких колебаний недостаточно изучена. Есть ряд модельных представлений, основанных на динамике реактора с учетом измеренных параметров быстрой мощностной обратной связи (МОС) [1]. Модель динамики адекватно отражает колебательную неустойчивость, но не дает прямого ответа на вопрос о физической природе МОС. Поэтому в условиях некоторой неопределенности появляются попытки дать другое объяснение колебательной неустойчивости, например через вибрации модулятора реактивности (МР) или вибрации топливных кассет. Фактически, предлагается представить колебательную нестабильность реактора некоторым прямым вибрационным воздействием отдельных элементов реактора. В статье приведены результаты экспериментального исследования нестабильностей, вызванных вибрациями подвижных отражателей (ПО) и косвенно — вибрациями топливных элементов. Оценены статистические характеристики вибрационных параметров ПО, и определена их связь с шумами энергии импульсов. Также показано влияние расхода натрия через активную зону на шумы мощности. Задача исследований состояла в том, чтобы подтвердить или опровергнуть вибрационное происхождение колебательной неустойчивости реакторов. В целом исследования направлены на обеспечение надежной и безопасной работы действующего в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ реактора ИБР-2М.

### 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА И ПО

На ИБР-2М с самого начала его работы с 2012 г. в качестве модулятора реактивности используется модулятор ПО-3: это два соосных ПО — основной (ОПО) и дополнительный (ДПО) (см. рис.1) [2]. Ротор ОПО представляет собой лопасть с тремя «зубьями» и противовесом, а ДПО — лопасть с двумя «зубьями». Модулятор реактивности вместе с приводом и защитой смонтирован на откатывающейся тележке, роторы заключены в герметичный кожух и вращаются в среде гелия. Частота вращения ОПО — 10 Гц, ДПО — 5 Гц. Когда лопасти отражателей проходят мимо активной зоны одновременно, создается импульс реактивности.

В штатном режиме положение органов управления таково, что реактор большую часть времени находится в подкритическом состоянии. Один раз за цикл длительностью 0,2 с реактор на короткое время в течение  $\sim 400$  мкс переводится из состояния глубокой подкритичности ( $k_{эф} \approx 0,97$ ) в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам. В течение этого времени происходит стремительный рост и спад мощности с формированием импульса длительностью 200 мкс. Средняя мощность реактора равна 2 МВт. Охлаждение активной зоны (а. з.) осуществляется жидким натрием с расходом  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

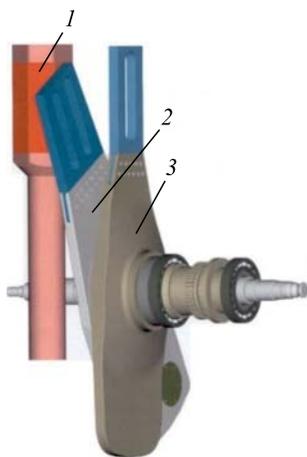


Рис. 1. Схема ИБР-2М с подвижным отражателем ПО-3: 1 — активная зона; 2, 3 — ОПО и ДПО соответственно

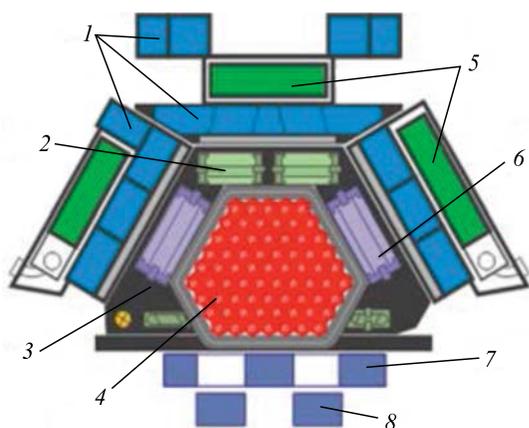


Рис. 2. Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М: 1 — водяные замедлители; 2 — стационарный отражатель; 3 — блоки АЗ; 4 — тепловыделяющие сборки; 5 — холодные замедлители; 6 — органы регулирования; 7 — ОПО; 8 — ДПО

Основным средством оперативного управления мощностью являются вольфрамовые блоки отражателей, перемещающиеся в матрице стационарного стального отражателя (рис. 2). К блокам управления СУЗ 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 АР. При аварийном сигнале на сброс мощности каждый из блоков аварийной защиты АЗ1, 2 с большой скоростью перемещается вниз и за время между импульсами переводит реактор из состояния равновесной импульсной надкритичности в подкритическое состояние. Развитие следующего импульса практически прекращается.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ПОЯСНЕНИЯ К ИЗУЧАЕМОЙ ПРОБЛЕМЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Пример возникновения колебательной неустойчивости ИБР-2М на частоте 0,1 Гц при мощности 2 МВт в режиме автоматического регулирования приведен на рис. 3.

Рассмотрим две потенциально возможные причины появления низкочастотной колебательной неустойчивости реакторов ИБР-2 и ИБР-2М, вызванные вибрациями отдельных элементов реактора. Первая — вибрации ПО. Вращение ПО и связанные с этим вибрации вызывают колебания реактивности и, соответственно, мощности. При этом в колебаниях мощности может присутствовать практически весь вибрационный спектр отражателей: случайные колебания, резонансы, устойчивые возмущения в кинематике привода и т. д. [3, 4]. Из-за высокой чувствительности

импульсного реактора к реактивности заметные возмущения мощности могут возникнуть уже при очень малых, микронных, отклонениях ПО. Гипотетически в вибрациях ПО могут присутствовать и устойчивые низкочастотные колебания. На реакторе ИБР-2, введенном в эксплуатацию в 1984 г., использовалось несколько типов модуляторов, но низкочастотная неустойчивость реактора развивалась независимо от вибрационного состояния того или иного модулятора. Этот факт практически исключает гипотезу о связи колебательной неустойчивости реакторов с работой МР. Тем не менее необходимы объективные данные, позволяющие исключить вибрации МР из списка возможных причин низкочастотной неустойчивости реактора.

Вторая причина — вибрации топливных элементов (твэлов) и топливных кассет, которые могут вызвать колебания мощности. В турбулентном потоке натриевого теплоносителя твэлы и кассеты колеблются. При номинальном расходе натрия через а. з., равном  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ , скорость натрия в а. з. ИБР-2М составляет 2,6 м/с. Поток натрия через а. з. способен индуцировать вынужденные или резонансные колебания топливных элементов. Есть и другие факторы, способствующие появлению вибраций кассет, например ударные явления при развитии импульса мощности. При таких условиях становится потенциально возможным появление и низкочастотных шумов мощности. Конечно, колебания внутри зонных элементов могут реализо-

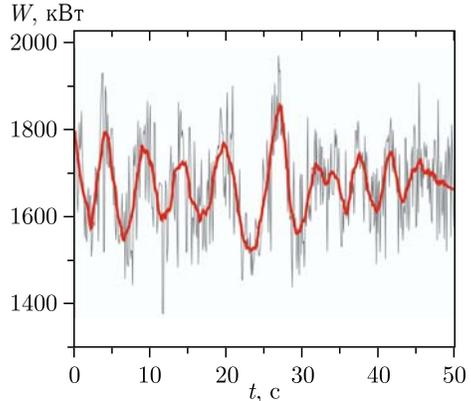


Рис. 3. Пример проявления колебательной неустойчивости ИБР-2М при мощности 1,7 МВт

ываться только в пределах технологически допустимых и очень малых зазоров (доли миллиметра). Но опять же из-за высокой чувствительности реактора вибрации внутри зонных элементов могут вызывать вполне заметные возмущения мощности (проценты от среднего значения). Нужно отметить, что напрямую вибрации топливных кассет измерить невозможно, но можно оценить косвенно — через зависимость спектральной плотности колебаний энергии импульсов от расхода натрия.

Для исследования шумов энергии импульсов и вибрационных характеристик ПО — осевых колебаний лопастей ОПО и ДПО (по нормали к корпусу реактора), периодов их вращения, угла рассинхронизации между отражателями и других параметров ПО и реактора в целом (температуры и расхода натрия через а.з.) — использовались данные, полученные на ИБР-2 до останова реактора в 2006 г., а с 2011 и до конца 2021 г. — на ИБР-2М. Измерялась последовательность значений параметров, и формировался многокомпонентный временной ряд. Погрешность измерений параметров была значительно меньше их разброса. Энергия импульсов измерялась с помощью трех независимых детекторов нейтронов (ионизационных камер деления), расположенных вокруг а.з. Осевые колебания отражателей измерялись с помощью емкостных (для ИБР-2) и токовихревых (для ИБР-2М) датчиков, установленных на кожухе ПО. Период измерения параметров ПО составлял 0,2 с, а технологических (температуры, расхода натрия через а.з. и т.д.) параметров — 0,1 с. При обработке данных использовался общий статистический и спектральный анализ временных рядов [5, 6].

Поскольку при исследовании шумов в реактор не вводятся дополнительные возмущения (метод исследования является пассивным, и поведение реактора изучается в его естественном состоянии), шумы реактора изучались также в различных переходных процессах и в состоянии с повышенным уровнем колебаний. Каждое шумовое состояние реактора измерялось в течение не менее 30 мин (это время необходимо для получения надежных статистических оценок). Для оценки парциальных вкладов от источников шумов различной природы их дисперсии принимались аддитивными. Все спектры, представленные в работе, для удобства сравнения их формы были нормированы с учетом дисперсии.

### **3. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ШУМАМ МОЩНОСТИ ИБР-2 И ИБР-2М ПРИ РАБОТЕ РЕАКТОРОВ С ОДНИМ И ТЕМ ЖЕ МОДУЛЯТОРОМ РЕАКТИВНОСТИ ПО-3**

Мы имеем уникальную возможность сравнить шумовые состояния реакторов ИБР-2 и ИБР-2М при работе с одним и тем же модулятором реактивности ПО-3 (рис.4–6). Сравнение позволяет напрямую оценить вклад вибраций модулятора в низкочастотную нестабильность реактора. Энерговывработка ИБР-2 к моменту установки модулятора в 2004 г. составляла около 3400 МВт·сут, а реактор ИБР-2М в начале эксплуатации

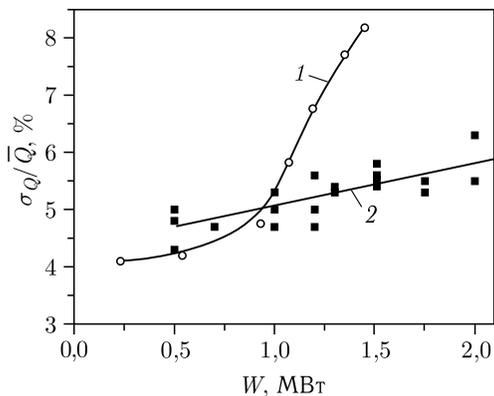


Рис. 4. Изменение величины относительных среднеквадратичных отклонений энергии импульсов ( $\sigma_Q/\sqrt{Q}$ ) от установившейся средней мощности реактора ИБР-2 перед его остановом в 2006 г. (1) и ИБР-2М при его пуске в 2011 г. (2) при работе реакторов с одним и тем же модулятором реактивности ПО-3 при расходе натрия через активную зону  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$

в 2012 г. при работе с тем же модулятором имел свежее (мало облученное) топливо.

Для сравнения шумовых состояний реакторов использовались данные, полученные при пуске ИБР-2 с ПО-3 в 2004 г., и данные, полученные при энергетическом пуске ИБР-2М в 2011 г.

**Осевые колебания отражателей (по нормали к боковой поверхности активной зоны).** На рис.5 приведены спектральные плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М и осевых колебаний лопасти ДПО

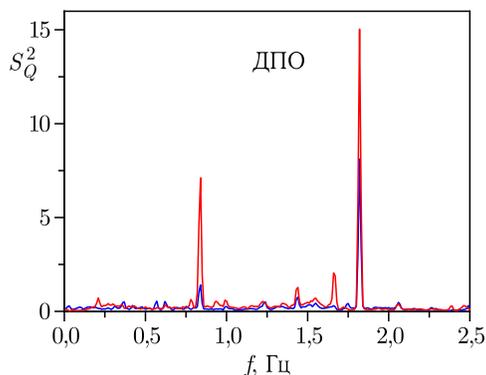


Рис. 5. Типичная форма спектральной плотности осевых колебаний лопасти ДПО (красная линия) и колебаний энергии импульсов ИБР-2М в 2011 г. со свежим топливом с модулятором реактивности ПО-3 при мощности 0,5 МВт и расходе натрия через активную зону  $40 \text{ м}^3/\text{ч}$

при пуске реактора в 2011 г. с модулятором ПО-3, т. е. представлен спектр колебаний мощности ИБР-2М со свежим топливом (при нулевой энерговыработке). Здесь и далее в статье термин «шумы энергии импульсов» эквивалентен термину «шумы мощности». Из рис. 5 видна четкая корреляция между осевыми колебаниями отражателей и колебаниями энергии импульсов. Колебания мощности, вызванные вибрациями отражателей, получены при частотах 0,82 и 1,77 Гц. Других компонентов в спектре колебаний мощности ИБР-2М нет. В спектрах полностью отсутствует низкочастотная компонента.

Рассмотрим колебания энергии импульсов другого реактора — ИБР-2 — с тем же модулятором реактивности. В спектральном составе шумов энергии импульсов ИБР-2 (рис. 6) колебания отражателей проявляются достаточно сильно, но основная линия шумов — низкочастотная компонента:  $\sim 0,1$  Гц. Колебания мощности, вызванные вибрациями отражателей, получены при тех же, что и для ИБР-2, частотах — 0,82 и 1,77 Гц.

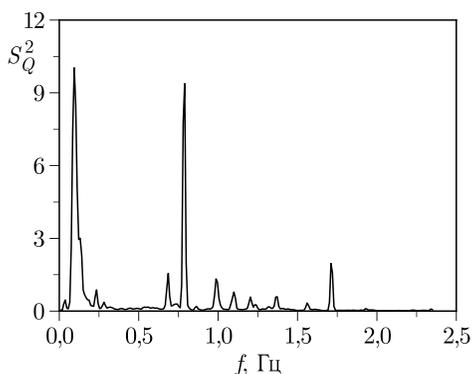


Рис. 6. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2 в 2005 г. при мощности 1,0 МВт при работе с модулятором реактивности ПО-3, установленным в 2004 г. Энерговыработка реактора составляла 3400 МВт · сут

Интенсивность колебаний мощности на частотах, действующих со стороны ПО, зависит от многих факторов, но частотный состав колебаний в процессе работы реакторов меняется незначительно. Из рис. 5 и 6 следует, что низкочастотные шумы ИБР-2 и шумы, обусловленные модулятором реактивности, независимы и не коррелируют друг с другом. Из опыта работы с реакторами ИБР-2 и ИБР-2М отметим следующее. Наблюдаемые проявления низкочастотной неустойчивости ИБР-2 и ИБР-2М близки по характеру, но разные: для ИБР-2 существуют некоторые зоны неустойчивости при мощности ниже номинальной, а на ИБР-2М неустойчивость проявляется при любом быстром изменении мощности. Общий факт: неустойчивость усиливается с ростом мощности и энерговыработки.

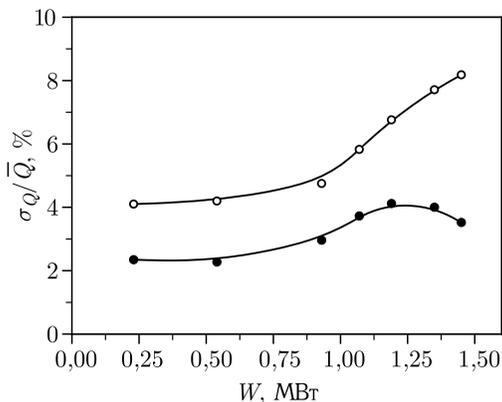


Рис. 7. Изменение величины относительных флуктуаций энергии импульсов при некоторых значениях установившейся средней мощности ИБР-2 в диапазоне от  $\sim 230$  до 1450 кВт в конце работы реактора при расходе натрия  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ :  $\circ$  — полные флуктуации;  $\bullet$  — флуктуации низкочастотной компоненты шумов

На рис. 7 показана зона неустойчивости ИБР-2 в конце 2005 г. при изменении мощности до 1,5 МВт. Спектр на рис. 6 измерен на нижней границе зоны неустойчивости при мощности 1,0 МВт.

#### 4. ЗАВИСИМОСТЬ ОСЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ ОПО И ДПО И ШУМОВ МОЩНОСТИ ИБР-2 ОТ ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ МОЩНОСТИ

Как было отмечено в предыдущем разделе, осевые колебания ПО наиболее полно проявляются в спектре колебаний энергии импульсов на частотах 0,82 и 1,77 Гц. На реакторе ИБР-2 была изучена зависимость осевых колебаний ОПО и ДПО от периодов вращения (частоты) отражателей. Цель исследований состояла в том, чтобы убедиться, что частота повторения импульсов 5 Гц не находится в области какого-либо резонанса. Для проведения исследований был реализован так называемый мягкий режим вращения отражателей, при котором вращение валов отражателей осуществлялось через электромагнитную муфту. Регулированием тока через муфту изменялся режим жесткости в связке двух валов, и вращение ведомого вала, на котором установлены ПО, осуществлялось с некоторым проскальзыванием, т. е. с изменением частоты вращения. Из рис. 8 наглядно видно, что при увеличении частоты вращения ПО осевые колебания отражателей растут. Максимальное изменение частоты вращения ПО в данных исследованиях составляло 0,13 Гц.

Изменение энергии импульсов  $\Delta Q/\bar{Q}$ , вызванное осевыми колебаниями лопастей ОПО и ДПО, оценивалось через соответствующие коэффициенты

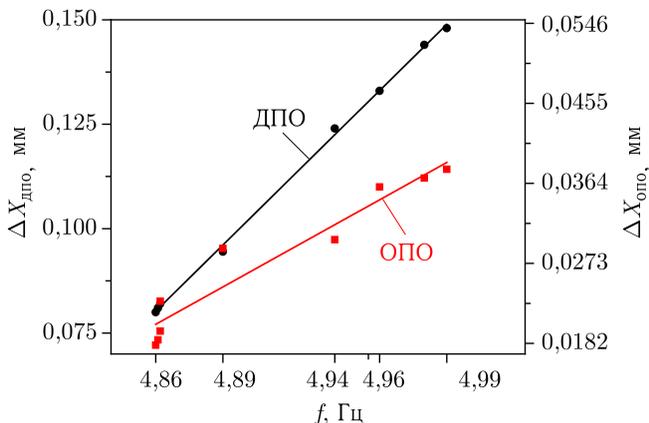


Рис. 8. Осевые колебания ОПО и ДПО реактора ИБР-2 в зависимости от частоты повторения импульсов мощности (частоты вращения ДПО): ● — ДПО; ■ — ОПО

реактивности  $K_{ОПО}$  и  $K_{ДПО}$  следующим образом:

$$\frac{\Delta Q}{\bar{Q}} \sim \sqrt{\sum \left( \frac{K_i \cdot \Delta X_i}{\beta_i} \right)^2}.$$

Здесь  $Q$  — энергия импульсов;  $\beta_i$  — импульсная доля запаздывающих нейтронов (для ИБР-2М  $1,57 \cdot 10^{-4}$ ). Коэффициенты  $K_{ОПО} = 3 \cdot 10^{-4} K_{эф}/мм$  и  $K_{ДПО} = 1 \cdot 10^{-4} K_{эф}/мм$ ,  $i = ОПО, ДПО$ , были определены в независимых экспериментах.

С ростом частоты повторения импульсов колебания мощности возрастают (см. таблицу). Относительные колебания мощности при изменении частоты ДПО от 4,86 до 4,99 Гц за счет роста колебаний лопасти ОПО

**Значения относительного отклонения колебаний энергии импульсов  $\Delta Q/\bar{Q}$  (в процентах) при повышении частоты повторения импульсов на 0,13 Гц. Оценки даны за счет колебаний лопастей ОПО и ДПО по отдельности и за счет их независимого суммарного воздействия**

Параметр	Значение $\Delta Q/\bar{Q}$	
	min	max
Частота, Гц	4,86	4,99
$\frac{\Delta Q}{\bar{Q}}$ ОПО, %	3,5	7,4
$\frac{\Delta Q}{\bar{Q}}$ ДПО, %	5,1	9,6
Суммарное значение для ОПО + ДПО $\frac{\Delta Q}{\bar{Q}}$ , %	6,1	11,4

возрастают от 3,5 до 7,4% и за счет роста колебаний ДПО — от 5,1 до 9,6%. Суммарные колебания мощности увеличиваются практически вдвое: до 11,4%.

Таким образом, при увеличении частоты повторения импульсов всего на 0,13 Гц, которое максимально позволили экспериментальные условия, полное возмущение мощности увеличивалось практически вдвое. Отсюда ясно, что в режиме 5 Гц для более устойчивой работы реактора необходимо не увеличивать, а наоборот, уменьшать частоту повторения импульсов, например до 4,89 Гц.

## 5. ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ КОЛЕБАНИЙ ПЕРИОДОВ ВРАЩЕНИЯ ОПО И ДПО НА ИБР-2М

В разделе рассматривается следующий вопрос: влияют ли медленное изменение частоты вращения отражателей и разброс частоты на колебания мощности ИБР-2М? Есть ли вблизи рабочей частоты повторения импульсов 5 Гц какие-либо резонансы? На ИБР-2М с помощью исследовательской системы измерения реакторных параметров был проведен анализ медленного изменения и разброса значений периодов вращения отражателей ПО-3 в течение всего времени работы реактора. Плотности распределения колебаний периодов ОПО и ДПО приведены на рис. 9. Видно, что распределения симметричны, а средняя частота вращения отражателей практически постоянна: 9,99 и 4,99 Гц. Полный размах колебаний периодов вращения ПО в отдельных реакторных циклах составляет для ОПО — 0,2 мс, для ДПО — 0,4 мс. Также отметим, что средний размах отклонений периодов вращения отражателей равен 0,2% и не превышает 0,3%.

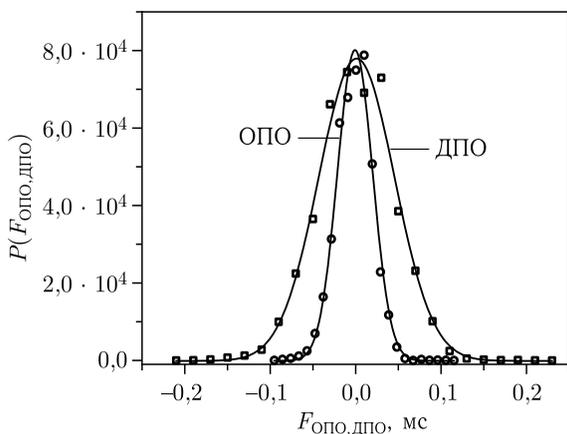


Рис. 9. Плотность распределения колебаний периодов вращения ОПО и ДПО с разбросом от среднего значения при работе ИБР-2М с 2012 по 2021 г. с модулятором реактивности ПО-3. Средняя частота ОПО и ДПО соответственно равна 9,99 и 4,99 Гц

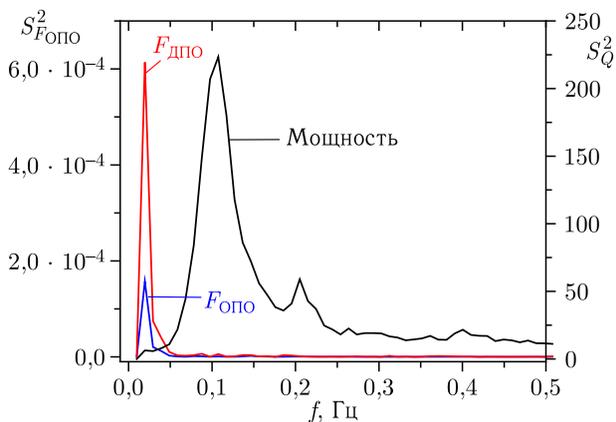


Рис. 10. Спектральные плотности колебаний периодов вращения ОПО ( $S_{F_{\text{ОПО}}}$ ), ДПО ( $S_{F_{\text{ДПО}}}$ ) и энергии импульсов ( $S_Q$ ) ИБР-2М при работе реактора с модулятором реактивности ПО-3

Спектральные плотности колебаний энергии импульсов и периодов вращения ОПО и ДПО приведены на рис. 10. Как видно из рисунка, максимальные амплитуды пиков в спектре колебаний периодов вращения ОПО и ДПО находятся на частоте 0,02 Гц, в то время как низкочастотная компонента энергии импульсов находится на  $\sim 0,1$  Гц. Таким образом, спектр колебаний периодов вращения отражателей не соответствует частоте колебательной неустойчивости реактора. Кроме того, колебания периодов вращения и связанных с ними фазовых колебаний отражателей (рассин-

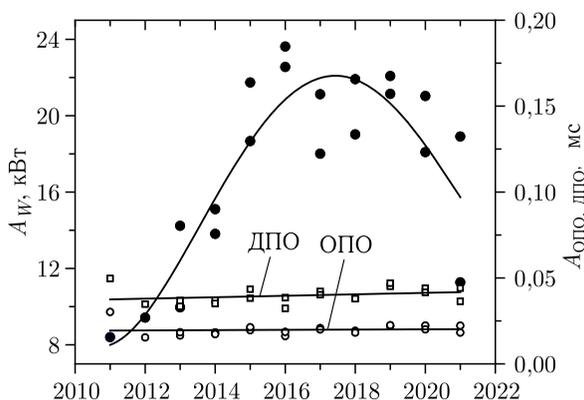


Рис. 11. Изменение амплитуды низкочастотных колебаний энергии импульсов ( $A_W$ ) на частоте 0,1 Гц и амплитуды колебаний периодов вращения ОПО ( $F_{\text{ОПО}}$ ) и ДПО ( $F_{\text{ДПО}}$ ) на частоте 0,02 Гц в процессе работы реактора ИБР-2М с 2011 по 2021 г.

хронизация отражателей) настолько малы, что практически не влияют на флуктуации мощности: полные фазовые колебания не превышают 125 мкс.

На рис. 11 приведено изменение амплитуды низкочастотных колебаний мощности ( $\sim 0,1$  Гц) и амплитуды колебаний периодов вращения ПО на частоте 0,02 Гц в зависимости от времени работы реактора ИБР-2М до 2021 г. при энерговыработке до  $\sim 1830$  Вт · сут. Относительное среднеквадратичное отклонение амплитуды колебаний периодов в среднем составляет 0,02 % и не превышает 0,035 %.

Из сказанного в данном разделе следует, что корреляционная связь между колебаниями периодов вращения ОПО, ДПО и энергии импульсов на частотах 0,02 и 0,1 Гц отсутствует (функция когерентности менее 0,1). Можно считать, что указанные процессы не взаимосвязаны между собой и при нормальной работе реактора колебания периодов вращения ОПО и ДПО и, соответственно, колебания частоты повторения импульсов не влияют на низкочастотную нестабильность реактора.

## 6. ВЛИЯНИЕ ПРОТЕКАНИЯ НАТРИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ШУМЫ МОЩНОСТИ ИБР-2 И ИБР-2М

Вибрации твэлов и топливных кассет в пределах допустимых зазоров могут давать вполне заметные возмущения мощности. Энергетической подпиткой вибраций могут быть турбулентный поток натрия в а.з. плюс импульсное энерговыделение. За счет гидродинамического эффекта реактивности флуктуации расхода натрия вызывают схождение и расталкивание топливных кассет, их дрожание и, соответственно, возмущение мощности. Спектральная плотность колебаний расхода натрия через а.з. и энергии импульсов ИБР-2М при появлении колебательной нестабильности реактора при мощности 1,5 МВт и расходе натрия 100 м<sup>3</sup>/ч приведена на рис. 12. Для расхода натрия на рис. 12 показана низкочастотная часть спектра,

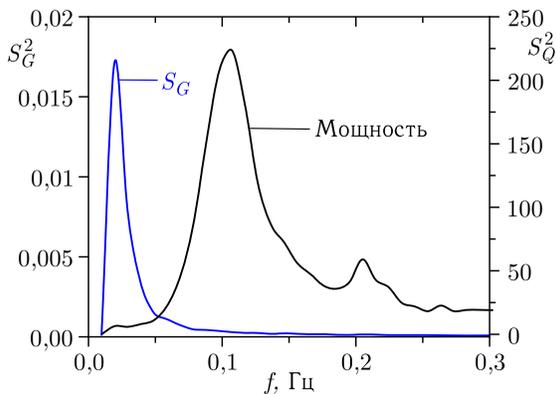


Рис. 12. Спектральная плотность колебаний расхода натрия через а.з. и энергии импульсов ИБР-2М при частоте дискретизации 5 Гц при мощности 1,5 МВт и расходе натрия через активную зону 100 м<sup>3</sup>/ч (2021 г.)

измеренного при частоте дискретизации, равной частоте повторения импульсов мощности 5 Гц. На этой частоте а. з. реактора «видит» колебания расхода натрия как колебания реактивности. Это говорит о том, что спектральный состав гидродинамических эффектов реактивности, связанных с быстрыми флуктуациями расхода натрия, находится вне области колебательной неустойчивости реактора. Здесь важно подчеркнуть следующее: влияние быстрого расходного эффекта на низкочастотные колебания мощности мало. Колебания расхода натрия через а. з. составляют  $\pm 0,15 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Быстрый расходный эффект реактивности  $\Delta\rho/\Delta G$ , т. е. изменение реактивности после скачкообразного изменения расхода натрия составляет  $\Delta\rho/\Delta G = -(0,44 \pm 0,05) \cdot 10^{-2} \beta \text{ эф}/(\text{м}^3/\text{ч})$ . Отсюда видно, что быстрые колебания расхода вызывают около 1% колебаний энергии импульсов. Влияние медленных колебаний расхода теплоносителя через а. з. (часы, сутки) полностью устраняется системой автоматического регулирования мощности.

Спектральные плотности флуктуаций энергии импульсов ИБР-2М при мощности 0,5 МВт при некоторых значениях расхода натрия через а. з. 40, 60, 80 и 100  $\text{м}^3/\text{ч}$  и спектральные плотности флуктуаций энергии импульсов ИБР-2 при мощности 2,0 МВт и расходе натрия 90 и 100  $\text{м}^3/\text{ч}$  представлены на рис. 13 и 14 соответственно. Как следует из рис. 13 и 14, предположение о вибрации внутри зонных элементов вполне оправданно, но никак не объясняет низкочастотную неустойчивость реактора. Например, на рис. 13 в колебаниях мощности ИБР-2М со свежим топливом расходная компонента шумов практически отсутствует. С ростом расхода натрия от 40 до 100  $\text{м}^3/\text{ч}$  интенсивность шумов энергии импульсов увеличивается незначительно и только в узкой частотной области: 0,76–1,25 Гц. Это, как видно, далеко от частоты  $\sim 0,1$  Гц.

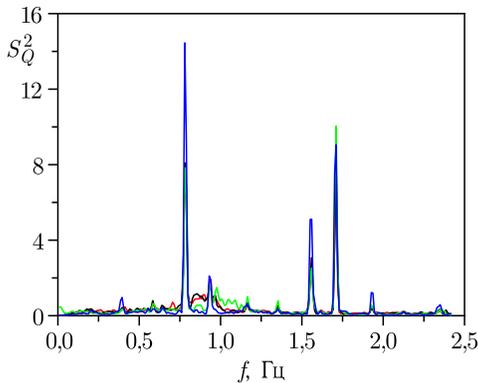


Рис. 13. Спектральные плотности флуктуаций энергии импульсов ИБР-2М ( $S_Q$ ) при мощности 0,5 МВт при различных значениях расхода натрия через активную зону: 40, 60, 80 и 100  $\text{м}^3/\text{ч}$ . С ростом расхода интенсивность шумов в области 0,76–1,25 Гц возрастает, но незначительно

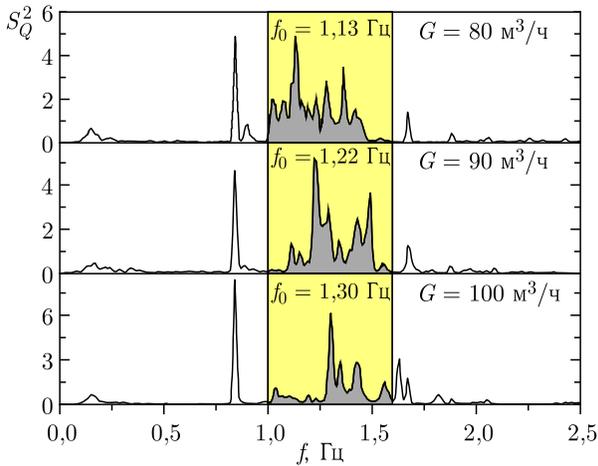


Рис. 14. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2 при мощности 2 МВт при некоторых значениях расхода натрия в первом контуре (80, 90, 100 м<sup>3</sup>/ч). Выделен участок спектра, корреляционно не связанный с вибрациями ПО. Четко видно смещение основного пика в сторону больших частот при повышении расхода натрия. Измерения выполнены в начале 1996 г.

Исследования расходной компоненты шумов, проведенные ранее на другом реакторе ИБР-2 при мощности 2 МВт, показали, что расходная компонента достаточно велика, имеет частотную зависимость от расхода и так же, как и на ИБР-2М, наблюдается в узком частотном диапазоне 1,0–1,51 Гц, т. е. вдали от области колебательной неустойчивости реактора. При этом основной пик в указанном выше частотном диапазоне линейно связан с ростом расхода натрия (см. рис. 14).

Как влияет уровень расхода натрия на колебательную нестабильность ИБР-2, иллюстрирует рис. 15. Аналогичную картину наблюдаем и на

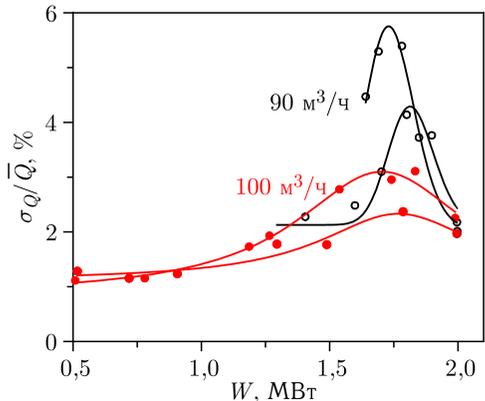


Рис. 15. Изменение среднеквадратичных отклонений энергии импульсов ИБР-2 в низкочастотной области спектра ( $\sim 0-0,20$  Гц) при штатном подъеме и снижении мощности с 2 МВт при двух значениях расхода натрия в первом контуре: 90 (○) и 100 м<sup>3</sup>/ч (●). Измерения выполнены в конце 1996 г. Нижние кривые — подъем мощности

ИБР-2М. В целом видно, что повышение расхода натрия через а.з. снижает, но не устраняет колебательную неустойчивость реактора, и говорить о вибрациях твэлов и топливных кассет в ИБР-2 и ИБР-2М как о причине колебательной низкочастотной неустойчивости реакторов не приходится.

## ВЫВОДЫ

В результате исследований статистических характеристик колебаний энергии импульсов и колебаний подвижных отражателей модулятора реактивности на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М, а также исследований колебаний мощности при изменении расхода натрия через активные зоны обоих реакторов показано, что появление низкочастотной неустойчивости не связано с вибрациями модулятора реактивности или вибрациями внутри зонных элементов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *Ананьев В. Д. и др.* Пуск и исследования основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа. Сообщ. ОИЯИ Р13-2004-156. Дубна, 2004.
3. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Динамика колебательной неустойчивости реактора ИБР-2М. Анализ шумов. Препринт ОИЯИ Р13-2021-29. Дубна, 2021.
4. *Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.* О циклическом изменении динамики импульсного реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2021-11. Дубна, 2021.
5. *Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.* Спектральный анализ статистических параметров импульсного реактора ИБР-2 (методика обработки). Сообщ. ОИЯИ Р13-84-73. Дубна, 1984.
6. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2012-131. Дубна, 2012.

Получено 19 октября 2022 г.

Редактор *А. И. Кудрявцева*

Подписано в печать 27.12.2022.

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

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 125 экз. Заказ № 60564.

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/)