

P13-2017-4

Ю. Н. Пепельшев¹, Ц. Цогтсайхан^{1,2}

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ШУМОВ
ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ РЕАКТОРА ИБР-2М
В ПРОЦЕССЕ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА**

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт физики и технологии Академии наук Монголии,
Улан-Батор

Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.

P13-2017-4

Исследование динамики шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М в процессе выгорания топлива

Представлены результаты исследования динамики шумового состояния реактора в зависимости от выгорания топлива за значительный период работы реактора — с момента ввода ИБР-2М в эксплуатацию в 2011 г. и до конца 2016 г. Показано, что шумы энергии импульсов в процессе работы ИБР-2М при энерговыработке до ~ 1100 МВт·сут существенно меняются как по спектральному составу, так и по уровню колебаний. Относительные стандартные отклонения случайных колебаний мощности не превышали 5 %, т. е. были на уровне значительно меньше допустимого. Кроме того, малый уровень низкочастотных шумов ($\sim 1,6$ %) свидетельствует об отсутствии признаков колебательной неустойчивости реактора и значительном запасе по энерговыработке до появления нестабильности.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Pepelyshev Yu. N., Tsogtsaikhan Ts.

P13-2017-4

Investigation of the Dynamics of Pulse Energy Noise at the IBR-2M Reactor in the Fuel Burnup

In this paper, we present the results of a study on pulse energy noise dynamics of the IBR-2M in the fuel burnup for a significant period of the reactor operation, starting from the date of its commissioning in 2011 and until the end of 2016. It is shown that the pulse energy noise during operation of the IBR-2M with burnup to about 1100 MW·day changes significantly by both the spectral component and the level. The standard deviation of the random power fluctuations did not exceed 5% and was less than allowable. In addition, the low level of low-frequency noise ($\sim 1.6\%$) indicates the absence of sign of vibrational instability of the reactor and a substantial margin of burnup until instability.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации реактора ИБР-2М статистические свойства случайных колебаний реакторных параметров, влияющих на реактивность, таких как температура и расход натрия на входе в активную зону, вибрации подвижных отражателей (ПО) и т.д., меняются. Параллельно этим изменениям в активной зоне реактора происходят различные процессы деградиационного типа, изменяющие динамические свойства реактора. Все это в целом приводит к изменению случайных колебаний энергии импульсов. Исследование реакторных шумов в зависимости от времени работы реактора, т.е. энерговыработки и, соответственно, выгорания топлива, представляется одним из важных элементов в обосновании его безопасной и надежной работы. Кроме оценки текущего шумового состояния реактора динамика шумов позволяет прогнозировать аномальные (нетипичные) состояния и источники их появления. Теоретически описать шумовые свойства реактора ввиду сложных процессов, происходящих в активной зоне и ее ближайшем окружении, невозможно. Надежную информацию по шумам ИБР-2М для целей их практического использования можно получить только экспериментальным путем. В работе приводятся результаты измерений колебаний энергии импульсов за значительный период работы реактора — с момента ввода ИБР-2М в эксплуатацию в 2011 г. и до конца 2016 г. вплоть до энерговыработки ~ 1100 МВт·сут.

МЕТОДИКА НАКОПЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

При штатной работе ИБР-2М средняя мощность реактора поддерживается на постоянном (в среднем) уровне с помощью системы автоматического регулирования (АР). Система АР компенсирует медленные изменения мощности с частотой менее $\sim 0,3$ Гц. На более высокие частоты система АР практически не реагирует. В то же время при нормальной работе реактора основной вклад в случайные колебания мощности вносит именно высокочастотная группа шумов. При этом медленные колебания мощности, компенсируемые

системой АР, частично остаются в спектре колебаний энергии импульсов и могут служить показателем колебательной неустойчивости реактора. ИБР-2М работает при мощности 2 МВт в циклическом режиме: 10–18 сут на мощности с последующей остановкой на 7–10 сут.

Данные об энергии импульсов ИБР-2М регистрировались с помощью штатных детекторов нейтронов, расположенных вокруг активной зоны (ионизационных камер в токовом режиме). Накопление данных осуществлялось с помощью системы измерения реакторных параметров. Измерения проводились при частоте импульсов, равной 5 с^{-1} , с меткой астрономического времени. Исходный временной ряд представлял собой массив последовательных значений энергии импульсов (Q), регистрируемых в течение каждого реакторного цикла начиная с конца 2011 г. и до конца 2016 г. Всего было исследовано 48 реакторных циклов. Длину временного ряда для каждого цикла составляли в среднем $6 \cdot 10^6$ значений энергии импульсов. По измеренным временным рядам проводилась статистическая обработка с вычислением относительного среднеквадратического отклонения (σ_Q/\bar{Q}), размаха ($\Delta_{Q_{\max}}/\bar{Q}$) и спектральной плотности (S_Q) энергии импульсов [1, 2]. Здесь \bar{Q} — среднее значение энергии импульсов. Также оценивались среднеквадратические парциальные колебания мощности, связанные с тем или иным диапазоном частоты. Оценки уровня парциальных колебаний полезны тем, что показывают, какие были бы полные колебания мощности, если бы все другие колебания отсутствовали. Здесь нужно отметить следующее. Система защиты реактора ориентирована на контроль за амплитудой импульсов, т. е. она анализирует полные колебания мощности. Различные парциальные составляющие полного

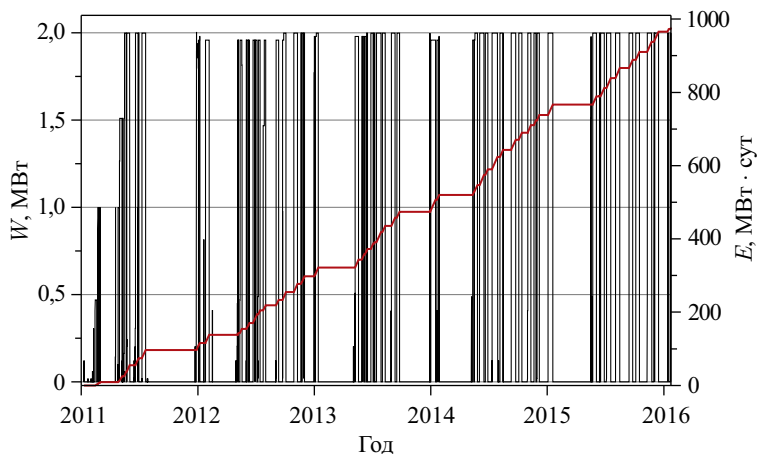


Рис. 1. Уровень средней мощности (W) и энерговыработки (E) в процессе работы ИБР-2М

Энерговыворотка и выгорание топлива в начальный период работы реактора ИБР-2М

Год	Число циклов в году	Энерговыворотка за текущий год, МВт · сут	Полная энерговыворотка, МВт · сут	Полное выгорание, $\beta_{эф}$
2011	2	96,6	96,6	0,520
2012	7	122	218,6	1,176
2013	12	217,1	435,7	2,431
2014	9	208	643,7	3,708
2015	9	168	811,7	5,070
2016	8	258	1069,7	6,140

спектра колебаний и их тренд в процессе работы реактора система защиты не учитывает. Поэтому изучение парциальных составляющих полных шумов энергии импульсов позволяет оценить влияние отдельных процессов на безопасность реактора и тем самым дает возможность выполнить коррекцию опасных изменений.

Режим работы реактора на мощности и изменение энерговыворотки за исследуемый период эксплуатации ИБР-2М приведены на рис. 1 и в таблице.

Режим номинальной стационарной мощности. На рис. 2 показано изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов в начале

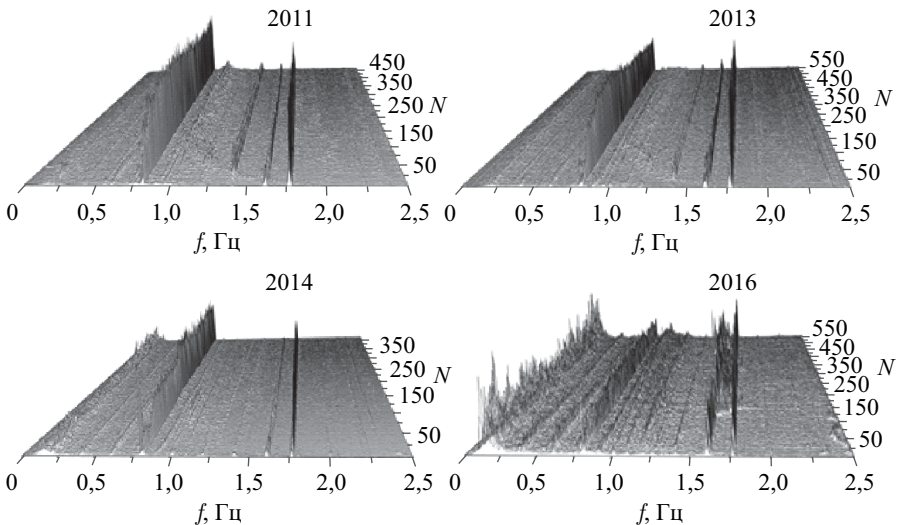


Рис. 2. Характерное изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М в отдельных циклах в разные годы работы реактора при мощности 2 МВт

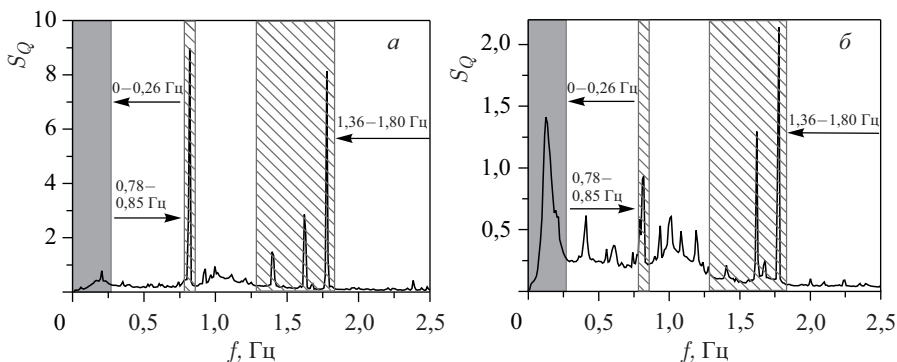


Рис. 3. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М (S_Q) при мощности 2 МВт в 2014 г. (а) и 2016 г. (б). Заштрихованная область связана с вибрациями подвижных отражателей; область, обозначенная серым цветом, — с работой автоматического регулятора

(2011 г.), в середине (2013 г.) и в конце (2016 г.) указанного выше периода работы реактора. На рис. 3 приведена характерная форма спектральной плотности колебаний, усредненной по всем циклам за 2014 и 2016 г. Как видно из рис. 2 и 3, в спектре колебаний энергии импульсов имеются несколько пиков большой интенсивности на частотах 0,82 и 1,77 Гц. Эти пики, как и другие пики меньшей амплитуды, обусловлены осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей (ПО) [3–5]. Они видны в диапазонах частот 0,78–0,85 и 1,36–1,80 Гц (заштрихованные области на рис. 3), и это позволяет оценить парциальную мощность колебаний энергии импульсов, вызванных вибрациями ПО. Колебания в области низких частот ($\sim 0\text{--}0,26$ Гц) при нормальной работе реактора связаны с работой АР [6, 7]. С появлением динамической неустойчивости мощность низкочастотных колебаний усиливается, соответственно, растет и реакция АР.

Параллельно данным, представленным на рис. 2 и 3, шумы исследовались также на коротких интервалах времени работы ИБР-2М (~ 30 мин), регистрируемых в конце каждого цикла реактора. В этом случае все медленные эффекты реактивности, обусловленные прогревом конструкций реактора, в том числе и биологической защиты, стабилизируются, переходные процессы завершаются и шумы мощности становятся асимптотически стабильными. Изменение величины среднеквадратических колебаний энергии импульсов и колебаний, связанных с вибрациями лопастей подвижных отражателей в процессе работы ИБР-2М, приведено на рис. 4. На рис. 5 показано изменение относительного среднеквадратического отклонения и размаха колебаний мощности, а также значение одного из параметров системы АР в процессе работы реактора.

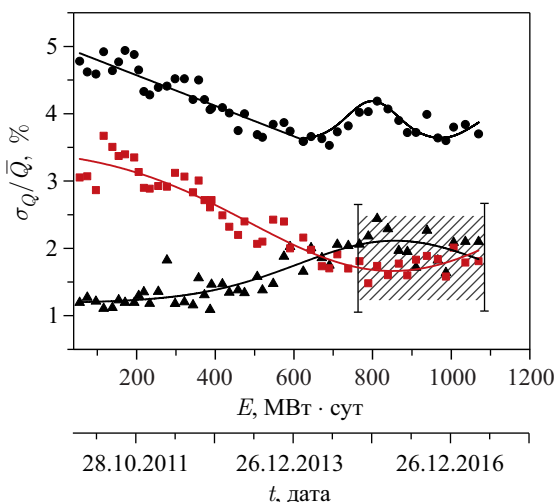


Рис. 4. Изменение относительного среднеквадратического отклонения колебаний энергии импульсов в процессе работы ИБР-2М: полные (●) и низкочастотные ($\sim 0\text{--}0,26$ Гц) (▲) колебания; шумы со стороны ПО ($0,78\text{--}0,85$) + ($1,36\text{--}1,80$) Гц (■)

Из рис.2 видно, что характер шумов в процессе работы ИБР-2М существенно меняется. Постепенно «чистая» форма спектральной плотности колебаний энергии импульсов, в которой преобладают колебания гармонического типа, вызванные вибрациями ПО, превращается в размытую низкочастотными шумами «рыхлую» форму. Динамика этого процесса наглядно проявляется на графиках изменения уровней полных и парциальных колебаний мощности (рис. 4 и 5). Из рисунков видно, что полные колебания мощности ИБР-2М к концу 2014 г. ($650 \text{ МВт} \cdot \text{сут}$) уменьшаются как в среднеквадратических отклонениях с $\sim 5,0$ до $3,5 \%$, так и в размахе колебаний с ~ 42 до 30% . Уменьшение колебаний происходит за счет уменьшения колебаний, связанных с вибрациями ПО. В то же время низкочастотные колебания ($0\text{--}0,26$ Гц) постепенно растут, что сказывается на усилении полных колебаний мощности (заштрихованная область на рис. 4).

Для понимания характера изменения колебаний энергии импульсов при вышеуказанном диапазоне значений энерговыработки были проведены сравнения шумов ИБР-2М с шумами ИБР-2. Для этого были использованы данные о колебаниях мощности ИБР-2 за период с 1981 по 1989 г. На рис. 6 показано изменение уровня полных и низкочастотных колебаний мощности ИБР-2 и ИБР-2М в зависимости от энерговыработки. Из рис. 6 видно, что указанные колебания мощности обоих реакторов, начиная с энерговыработки $\sim 650 \text{ МВт} \cdot \text{сут}$, имеют тенденцию к возрастанию.

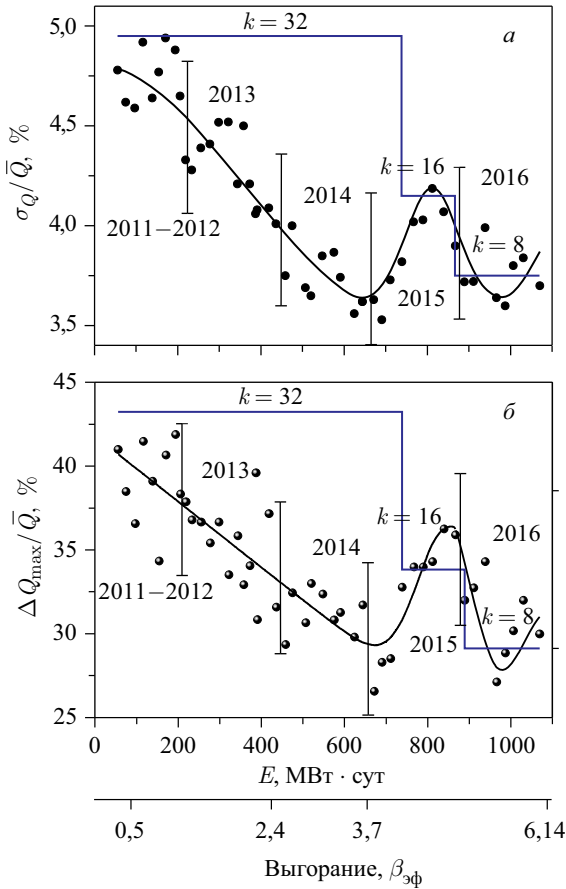


Рис. 5. Изменение относительного среднеквадратического отклонения (а) и размаха колебаний (б) энергии импульсов, измеренных в конце реакторных циклов: ось абсцисс — энерговыработка (E) и среднее по активной зоне выгорание топлива; k — коэффициент усреднения импульсов в системе автоматического регулирования мощности

На ИБР-2 полные колебания резко возрастают до 7% и при энерговыработке 800 МВт · сут стабилизируются. Динамика шумов ИБР-2М в этой области энерговыработки близка к динамике шумов ИБР-2, но уровень шумов на ИБР-2М существенно меньше: почти в 2 раза (3,6%). Низкочастотные колебания энергии импульсов ИБР-2М и ИБР-2 растут до энерговыработки ~ 800 МВт · сут, затем стабилизируются.

Спад низкочастотных и, соответственно, полных шумов мощности ИБР-2М, наблюдаемый на рис. 5 и 6 при энерговыработке выше 800 МВт · сут,

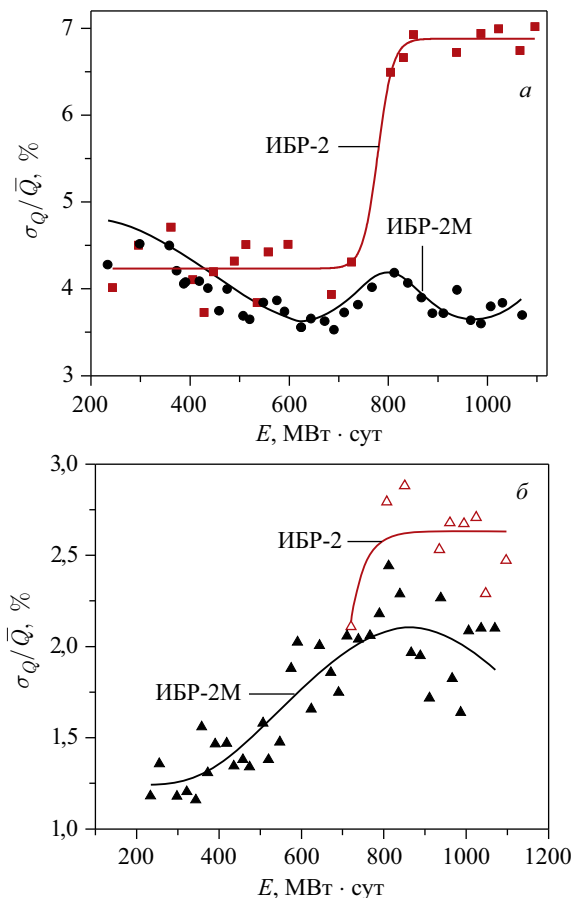


Рис. 6. Полные (а) и низкочастотные (б) относительные среднеквадратические отклонения мощности ИБР-2 с 1983 по 1989 г. и ИБР-2М с 2012 по 2016 г. Полные (●) и низкочастотные (0–0,26 Гц) (▲) колебания ИБР-2М и ИБР-2 (■,△)

был достигнут за счет изменения параметров системы АР. Поскольку, как уже было сказано выше, низкочастотные шумы находятся в области пропускания амплитудно-частотной характеристики АР, то на них (шумы) можно воздействовать путем изменения полосы пропускания системы АР. Исследования показали, что система АР является статистически оптимальным фильтром для подавления скачков и шумов реактивности с различными типами распределений, имеющими место при нормальной работе ИБР-2М [9]. Также в [9] показано, что можно выбрать совокупность значений параметров АР, оптимальным образом минимизирующих уровень шумов. Например, для текущего

значения мощности, вычисляемого в системе АР в виде

$$\langle W \rangle_n = \langle W \rangle_{n-1} + \frac{\langle W \rangle_n - \langle W \rangle_{n-1}}{k},$$

где $\langle W \rangle_n$, $\langle W \rangle_{n-1}$ — усредненное значение мощности после импульса с номерами n и $n-1$ соответственно, W_n — импульсная мощность, оптимальное значение параметра усреднения k в данных условиях работы реактора составляет 8 при выборе из диапазона от 1 до 32. Влияние параметра временного усреднения k на уменьшение шумов ИБР-2М наглядно показано на рис. 5.

Шумовое состояние реактора при увеличении и снижении мощности.

Исследование шумов энергии импульсов в динамическом (переходном) состоянии реактора важно по следующим причинам. Во-первых, что самое главное, измерения шумов позволяют найти область мощности, в которой проявляется колебательная неустойчивость реактора, если такая неустойчивость имеет место. По всем модельным представлениям динамики реактора колебательная неустойчивость ИБР-2М может проявляться в области низких частот, находящейся в полосе пропускания системы АР (период колебаний 8–40 с). Поэтому возрастание компоненты низкочастотных шумов в спектральной плотности колебаний мощности может служить неким «индикатором» неустойчивости реактора. Во-вторых, изменение шумов в процессе изменения мощности позволяет оценить источники динамических возмущений реактивности, проявляющихся в процессе изменения температуры активной зоны. На рис. 7 для примера приведены спектры колебаний энергии импульсов в процессе увеличения мощности в разные периоды работы ИБР-2М, а на рис. 8 для сравнения — непрерывное изменение спектра колебаний при увеличении мощности в цикле без сброса (*а*) мощности и со сбросом (*б*). Из рисунка видно, что в процессе работы реактора его шумовое состояние в переходных процессах изменения мощности усложняется, особенно при мощности выше 1500 кВт.

Изменение шумов при изменении средней мощности реактора более детально проявляется в следующем. Во-первых, с увеличением мощности растет амплитуда основного пика на частоте 0,82 Гц. Доминирующее влияние колебаний энергии импульсов на частоте 0,82 Гц с увеличением мощности сохраняется вплоть до мощности 1500 МВт. Колебания энергии импульсов на этой частоте вызваны осевыми колебаниями лопастей подвижных отражателей [3, 8]. Во-вторых, при дальнейшем увеличении мощности выше 1500 кВт появляются другие пики на частотах $\sim 0,1, 1,40, 1,63$ и $1,77$ Гц. Здесь нужно отметить, что реальные значения частоты колебаний ПО гораздо выше, но все они проявляются в спектре колебаний мощности в замаскированном виде в диапазоне частот, ограниченном критической частотой Найквиста, равной в данном случае 2,5 Гц.

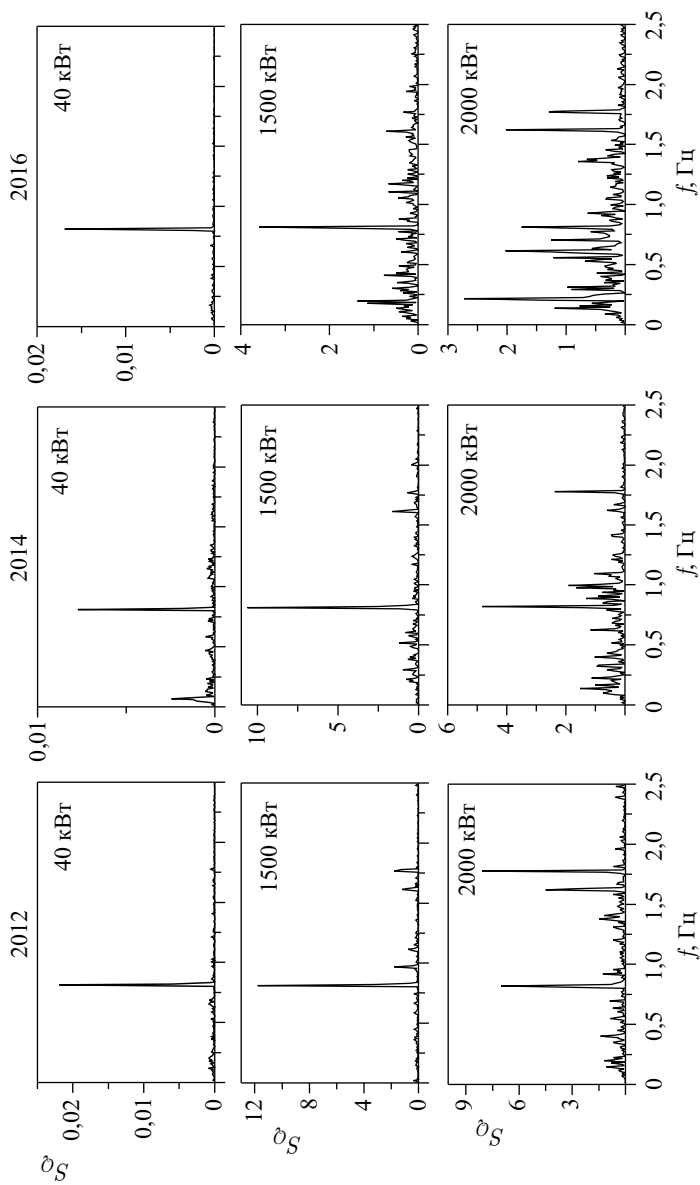


Рис. 7. Изменение спектральной плотности флуктуаций энергии импульсов ИБР-2М в переходных процессах увеличения мощности от 30 кВт до номинальной, равной 2 МВт, при некоторых промежуточных уровнях мощности в различные периоды работы реактора; f — частота

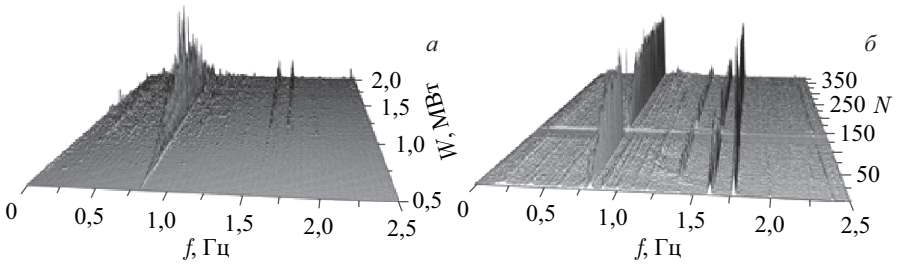


Рис. 8. Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М при увеличении мощности до номинальной, равной 2 МВт, в цикле без сброса мощности (а) и со сбросом (б)

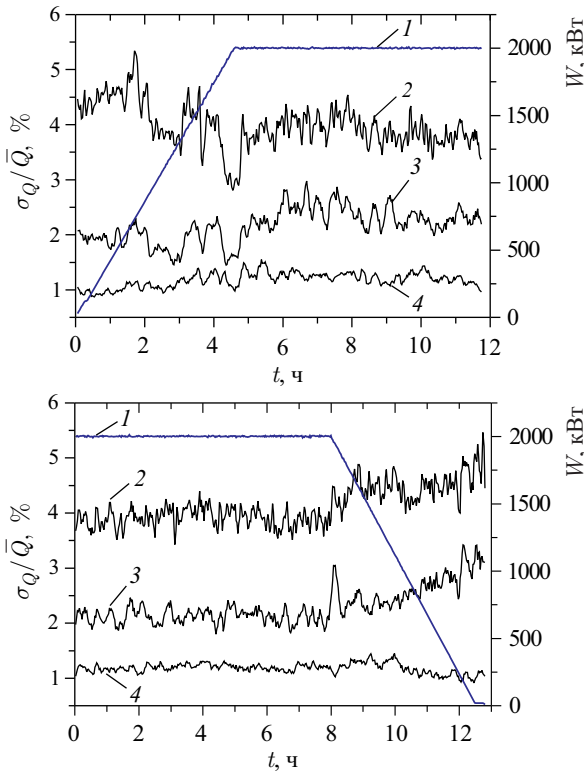


Рис. 9. Изменение относительного среднеквадратического отклонения колебаний энергии импульсов при увеличении (вверху) и снижении (внизу) мощности ИБР-2М : 1 — мощность; 2 — полные колебания; 3 — низкочастотные шумы (0–0,26 Гц); 4 — шумы, обусловленные вибрациями ПО (0,78–0,85) + (1,36–1,80) Гц

В-третьих, как видно из рис. 7, общая картина спектра колебаний энергии импульсов существенно усложняется в процессе работы реактора. При этом динамика шумов при увеличении мощности до номинальной, равной 2 МВт, до и после сброса мощности практически не меняется. Слабо меняется и динамика парциальных компонентов шумов мощности при штатном увеличении и снижении мощности (см. рис. 9).

В целом шумовое состояние реактора ИБР-2М и динамика этого состояния зависят только от времени работы реактора на мощности, а значит, от энерговыработки и, соответственно, выгорания топлива.

ВЫВОДЫ

Исследована динамика шумов энергии импульсов за значительный период работы реактора — с момента ввода ИБР-2М в эксплуатацию в конце 2011 г. и до конца 2016 г. до достижения энерговыработки, равной ~ 1100 МВт · сут. Показано, что характеристики шумов энергии импульсов существенно зависят от выгорания топлива. Парциальные колебания шумов, обусловленные вибрациями лопастей подвижных отражателей, со временем уменьшались и к концу анализируемого периода достигли минимального значения среднеквадратического отклонения, равного 1,7 %. Вероятнее всего, этот эффект связан с приработкой деталей модулятора реактивности как ротационной машины. Напротив, компонента низкочастотных шумов с частотами менее 0,26 Гц возрастала и при энерговыработке 800 МВт · сут достигла максимального значения, равного 2,3 %. После установки оптимальных для текущего шумового состояния реактора значений параметров системы автоматического регулирования мощности компонента низкочастотных шумов уменьшилась до 1,7 %.

За весь анализируемый период работы реактора при энерговыработке до ~ 1100 МВт · сут полные относительные стандартные отклонения колебаний мощности не превышали 5 %, из которых в среднем $\sim 1,6$ % связаны с работой АР и $\sim 2,5$ % обусловлены осевыми вибрациями лопастей ПО.

Таким образом, показано, что шумы энергии импульсов в процессе работы ИБР-2М существенно меняются как по спектральному составу, так и по уровню колебаний. При этом уровень полных колебаний значительно меньше допустимого. Кроме того, малый уровень низкочастотных шумов свидетельствует об отсутствии достаточных признаков колебательной неустойчивости реактора и значительном запасе по энерговыработке до появления существенных признаков нестабильности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.* Спектральный анализ статистических параметров импульсного реактора ИБР-2 (методика обработки). Сообщ. ОИЯИ Р13-84-73. Дубна, 1984.
2. *Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д., Цогтсайхан Ц.* Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2012-131. Дубна, 2012.
3. *Пепельшев Ю. Н.* Исследование колебаний подвижных отражателей (Энергетический пуск реактора ИБР-2). Сообщ. ОИЯИ 13-87-564. Дубна, 1987.
4. *Ананьев В. Д. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012.
5. *Pepeylyshev 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.
6. *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. 928–983.
7. *Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.* Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности. Сообщ. ОИЯИ Р13-2014-61. Дубна, 2014.
8. *Ананьев В. Д. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.
9. *Марачев А. А. и др.* Анализ динамики импульсного реактора ИБР-2М при статистически оптимальном автоматическом регуляторе. Препринт ОИЯИ Р13-2016-65. Дубна, 2016.

Получено 8 февраля 2017 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 06.04.2017.

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

Усл. печ. л. 0,94. Уч.-изд. л. 1,18. Тираж 215 экз. Заказ № 59083.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/