

P13-2014-61

Ю. Н. Пепельшев, Ц. Цогтсайхан

**ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НАТРИЕВОЙ СИСТЕМЫ  
ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИБР-2М  
НА КОЛЕБАНИЯ РЕАКТИВНОСТИ**

Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц.

P13-2014-61

Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности

Проведены исследования колебаний теплодинамических параметров первого контура натриевой системы охлаждения активной зоны реактора ИБР-2М при номинальной средней мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону 100 м<sup>3</sup>/ч. Получены данные о статистике колебаний параметров контура, их взаимосвязи и оценки влияния шумов контура на шумы реактивности и работу системы стабилизации мощности.

Полные колебания параметров первого контура достаточно велики: 6–8 %. В спектрах колебаний параметров первого контура, полной реактивности и реактивности мощностной обратной связи доминирует частота суточных колебаний при существенном вкладе недельной компоненты шумов. Орган автоматического регулирования (АР) в системе обратной связи реактора может претерпевать за сутки существенные колебательные перемещения  $\pm 66$  мм при дополнительных недельных перемещениях  $\pm 46$  мм. С учетом компенсации тренда реактивности системой автоматической стабилизации мощности полные суточные колебания АР достигают 100 мм, что полностью перекрывает линейную область регулирования мощности. Полные колебания реактивности за реакторный цикл составляют  $14,0 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$  и вызывают соответственно 310 мм движения АР.

Колебания давления аргона над АЗ ( $\sim 8\%$ ) и уровня натрия (4,5 см) дают нулевой изобарический эффект и не влияют на колебания мощности.

В целом медленные колебания параметров первого контура системы охлаждения АЗ достаточно сильно влияют на реактивность, работу системы стабилизации мощности и безопасность реактора.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2014

Pepelyshev Yu. N., Tsogtsaikhan Ts.

P13-2014-61

The Noise Effects of Liquid Sodium Coolant System of IBR-2M on Reactivity Fluctuation

In this paper we consider the thermal dynamics vibration parameters of the primary circuit of the sodium cooling system of IBR-2M reactor at an average power of 2 MW and sodium flow through the core of 100 m<sup>3</sup>/h. The data on the statistics of the contour fluctuations, their relationship and assessment of the impact of noise on the circuit noise reactivity and power stabilization system are obtained.

The full variation of parameters of the primary circuit of the sodium cooling system is sufficiently large, up to 6–8 %. In the fluctuation of the power spectral density of the first circuit parameters, total reactivity and power feedback reactivity, the frequency of daily fluctuations is prevalent, with a significant contribution of the weekly noise components. The automatic regulator (AR) in the reactor feedback loop may undergo a substantial per night vibrational displacement of  $\pm 66$  mm with additional weekly movements of  $\pm 46$  mm. Given the trend of reactivity compensation by the system of automatic power stabilization, full daily fluctuations of AR reach 100 mm, which completely covers the linear region of power control. The total reactivity fluctuations for the reactor cycle are  $14.0 \cdot 10^{-2} \beta_{ef}$  and cause movement of AR by 310 mm.

Argon pressure fluctuations in the core ( $\sim 8\%$ ) and sodium levels (4.5 cm) give a zero isobaric effect and do not affect the power fluctuations.

The slow fluctuation of the parameters of the first coolant circuit in the core make a sufficiently strong influence on the reactivity, operation of the power stabilization system, and safety of the reactor.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2014

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для оценки критериев безопасной и надежной работы реактора ИБР-2М важное значение имеют уровень и спектральный состав шумов реактивности, вызванных работой различных технологических систем, обеспечивающих нормальное функционирование реактора. С точки зрения безопасности реактора все шумы реактивности можно разделить на две большие группы. Первая — шумы с частотой выше общей пороговой частоты мощностной обратной связи и системы стабилизации мощности ( $\sim 0,03$  Гц), вторая группа — низкочастотные шумы с частотой ниже указанной. В первом случае шумы реактивности вызывают флуктуации энергии импульсов, во втором — приводят к колебаниям и смещению стержня автоматического регулятора (АР), который при больших колебаниях реактивности может выйти за пределы зоны стабилизации. Цель работы состояла в исследовании медленных колебаний, определяющих работу АР. Как показали предварительные исследования, основная группа низкочастотных шумов связана с первым контуром натриевой системы охлаждения активной зоны (АЗ). В работе приводятся результаты экспериментального исследования колебаний теплодинамических параметров первого контура при номинальной средней мощности 2 МВт и расходе натрия через АЗ 100 м<sup>3</sup>/ч. Определены статистические характеристики колебаний, их взаимосвязи, а также даны оценки влияния шумов первого контура на шумы реактивности и безопасность реактора.

### **1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

На ИБР-2М в качестве теплоносителя в системе охлаждения активной зоны используется жидкий натрий с температурой около 300 °С. Система охлаждения трехконтурная двухпетлевая. Схема системы охлаждения реактора ИБР-2М показана на рис. 1. В петлях первого и второго контуров протекает жидкий натрий. Натрий в петлях А и Б первого и второго контуров прокачивается с помощью электромагнитных насосов. Натрий первого контура непосредственно протекает в корпусе реактора и снимает тепло с твэлов. Натрий второго контура через промежуточные теплообменники

А и Б охлаждает натрий первого контура и передает тепло атмосферному воздуху в воздушных теплообменниках. Изменение теплодинамического состояния первого контура приводит к соответствующему изменению температуры и расширению топлива, теплоносителя, опорной плиты, на которой установлены топливные кассеты, изгибу топливных кассет, деформации корпуса модулятора реактивности и т. д. В результате всех вышеуказанных процессов изменяется критическое состояние реактора, соответственно изменяется мощность, что вызывает ответную реакцию автоматической системы регулирования (АР). В среднем с помощью системы АР нейтронная мощность поддерживается на постоянном уровне, и все медленные колебания реактивности компенсируются этой системой путем перемещения органов регулирования относительно активной зоны.

Исследовались случайные колебания основных теплодинамических параметров первого контура системы охлаждения АЗ, которые непосредственно вызывают шумы реактивности. Здесь нужно отметить следующее: реактивность реактора на мощности, измеряемая относительно равновесной импульсной надкритичности по мгновенным нейтронам, в среднем нулевая. Медлен-

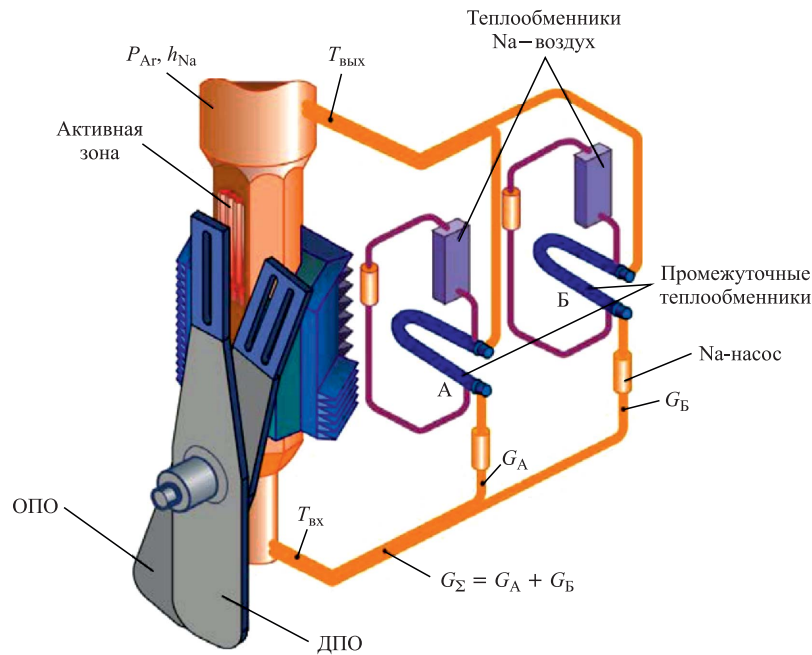


Рис. 1. Принципиальная схема системы охлаждения реактора ИБР-2М. Показаны примерные места расположения измерительных датчиков: давления аргона ( $P_{Ar}$ ), уровня натрия ( $h_{Na}$ ), расхода натрия ( $G_{\Sigma}$ ) через АЗ, расхода натрия первого контура в петлях А ( $G_A$ ) и Б ( $G_B$ ), температуры натрия на выходе ( $T_{вых}$ ) и входе в АЗ ( $T_{вх}$ )

ные колебания реактивности могут быть оценены только по известным (измеренным ранее) температурному и расходному коэффициентам реактивности и по положению органов регулирования относительно активной зоны [1]. Измерялись следующие параметры:

- температура натрия на входе ( $T_{\text{вх}}$ ) и выходе ( $T_{\text{вых}}$ ) из АЗ,
- расход натрия в петлях А ( $G_A$ ) и Б ( $G_B$ ) первого контура с суммарным расходом  $G_{\Sigma} = G_A + G_B$ .
- уровень натрия над активной зоной ( $h$ ) и давление аргона в газовой полости, демпфирующего этот уровень ( $P_{\text{Ар}}$ ).
- положение всех органов регулирования: компенсирующих блоков КО1 и КО2, ручного регулятора РР и блока автоматического регулятора АР.

Период опроса данных для всех параметров составлял 0,1 с. Примерные точки измерения параметров первого контура системы охлаждения АЗ приведены на рис. 1. На рис. 2 показано изменение некоторых параметров первого контура в течение одного из типичных реакторных циклов длительностью 11 сут.

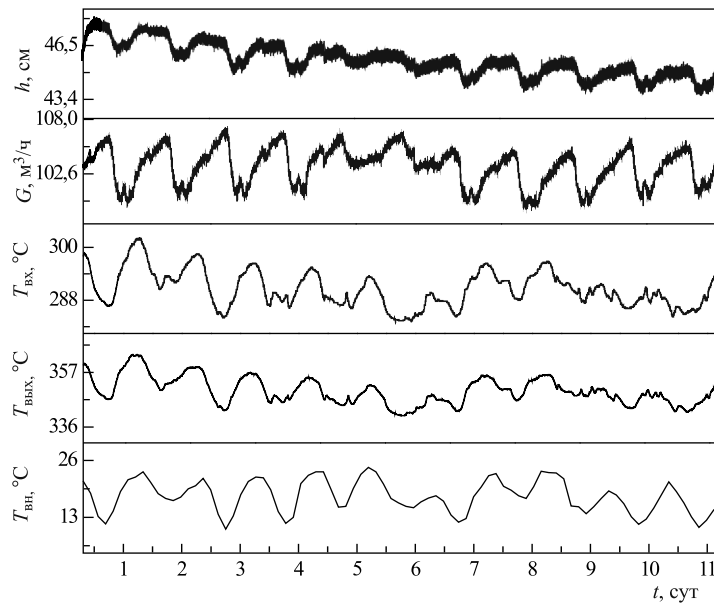


Рис. 2. Типичное изменение некоторых параметров первого контура натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М за реакторный цикл: уровень натрия ( $h$ ) в газовой полости над АЗ; расход ( $G$ ) и температура натрия на входе ( $T_{\text{вх}}$ ) и выходе ( $T_{\text{вых}}$ ) из АЗ;  $T_{\text{вн}}$  — температура на выходе открытого третьего контура (температура воздуха вне здания реактора)

Как следует из рис. 2, параметры первого контура претерпевают медленные (в основном, суточные) изменения. Эти изменения можно представить в виде суммы колебательной составляющей и некоторого линейного тренда. Для динамики тепловых процессов, происходящих в активной зоне, состояние первого контура при таких медленных изменениях его параметров можно считать квазистационарным (тепловая инерционность, например, топливного элемента составляет  $\sim 10$  с, а время перемещения натрия через активную зону  $\sim 1$  с). При условии стационарности переноса тепла из первого контура во второй и третий в системе охлаждения активной зоны устанавливается тепловой баланс

$$W = GC_p(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})\gamma + W_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где  $W$  — средняя тепловая мощность активной зоны;  $G, C_p$  — расход и теплоемкость натрия соответственно;  $T_{\text{вх}}, T_{\text{вых}}$  — температура натрия на входе и выходе из реактора;  $\gamma$  — плотность натрия;  $W_{\text{пот}}$  — мощность тепловых потерь в корпусе реактора. Поскольку третий контур системы охлаждения АЗ ИБР-2М открыт на суточные изменения температуры атмосферного воздуха, стационарность теплового баланса можно принять только для процессов более быстрых, чем атмосферные колебания температуры. Если абстрагироваться от того, каким образом атмосферные колебания температуры влияют на мощность, то колебания параметров первого контура, как и колебания тепловой мощности реактора, можно рассматривать относительно их средних за цикл значений. Тогда для колебаний тепловой мощности  $\Delta W(t)$  можно записать

$$\Delta W(t) = C_p \gamma \cdot [\Delta T(t) \cdot \Delta G(t) + G(t) \cdot \Delta[(\Delta T)(t)]], \quad (2)$$

где  $\Delta T(t) = (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})$  — подогрев натрия в активной зоне;  $\Delta(\Delta T), \Delta G$  — отклонение от среднего за цикл подогрева и расхода натрия соответственно.

Изменение коэффициента размножения нейтронов  $\Delta K$  при малых отклонениях параметров контура от средних значений в зависимости от изменений мощности реактора, расхода и температуры натрия на входе в активную зону можно представить через соответствующие коэффициенты ( $dK/dW, dK/dG, dK/dT$  — мощностной, расходный и изотермический) в виде

$$\Delta K = dK/dW \cdot \Delta W(t) + dK/dG \cdot \Delta G(t) + dK/dT \cdot \Delta T(t) + \Delta K_{\text{доп}}(t)$$

Здесь  $\Delta K_{\text{доп}}$  есть медленное изменение коэффициента размножения, обусловленное другими, находящимися вне системы охлаждения активной зоны, факторами, например, выгоранием топлива. Изменение коэффициента размножения за счет изменения мощности  $dK/dW$  и расхода  $dK/dG$  определяются из следующих уравнений [2]:

$$\left(\frac{dk}{dW}\right)_G = \left(\frac{dk}{dW}\right)_{G,T} + \frac{1}{GC_p\rho} \left(\frac{dk}{dT}\right)_{G,W} = a + \frac{b}{G}, \quad (3)$$

$$\left(\frac{dk}{dG}\right)_W = \left(\frac{dk}{dG}\right)_{W,T} - \frac{W}{G^2 C_p \rho} \left(\frac{dk}{dT}\right)_{W,G} = c - b \frac{W}{G^2}, \quad (4)$$

где  $c, b$  — коэффициенты; индексы указывают на постоянство того или иного параметра при изменении других. Поскольку мощность реактора при работающей системе автоматического регулирования в среднем постоянна (или меняется незначительно), то изменение коэффициента размножения в квазистационарном состоянии первого контура будет определяться в основном только изменением расхода и температуры натрия. Ниже дано краткое описание основных вычислительных процедур.

*Колебания полной реактивности.* Медленное изменение полной реактивности  $\rho_\Sigma(t)$  определялось как изменение реактивности, вызванное перемещением в процессе работы реактора всех органов регулирования в системе управления и защиты относительно их некоторого первоначального (базового) положения  $z_{0i}$ ,

$$\rho_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})], \quad (5)$$

где  $k_i(z_i)$  — кривая эффективности  $i$ -го блока регулирования [2],  $z_i = f(t)$  — положение  $i$ -го блока регулирования относительно АЗ в момент времени  $t$ . Начальное (базовое) положение органов регулирования определялось в момент достижения номинальной средней мощности 2 МВт. Вычисленная из (5) реактивность включает как все ее медленные компоненты со стороны первого контура, так и компоненты мощностной обратной связи (см. ниже).

*Температурная и расходная компоненты колебаний реактивности.* Изменение реактивности  $\rho_T(t)$  при отклонении температуры натрия на входе в АЗ от  $T_0$  до  $T_{\text{вх}}(t)$  в момент времени  $t$  определяется как

$$\rho_T(t) = dk/dT \cdot [T_{\text{вх}}(t) - T_0], \quad (6)$$

где  $dk/dT = \left. \frac{\Delta K}{\Delta T} \right|_{W,G=\text{const}}$  — изотермический коэффициент реактивности,  $T_{\text{вх}}(t)$ ,  $T_0$  — текущее и среднее значения температуры натрия на входе в АЗ соответственно. Изотермический коэффициент реактивности есть изменение коэффициента размножения при медленном (квазистатическом) изменении температуры натрия на входе в активную зону на  $1^\circ\text{C}$  при постоянных значениях мощности и расхода натрия. В среднем изотермический коэффициент не зависит от мощности реактора и расхода натрия через АЗ и равен  $-(1,19 \pm 0,10) \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/^\circ\text{C}$  [2].

Изменение реактивности  $\rho_G(t)$  при изменении расхода от  $G_0$  до  $G(t)$  в момент времени  $t$  определяются в виде

$$\rho_G(t) = dK/dG \cdot [G(t) - G_0], \quad (7)$$

где  $dK/dG = \left. \frac{\Delta K}{\Delta G} \right|_{W, T = \text{const}}$  — расходный коэффициент реактивности, т.е. изменение коэффициента размножения, отнесенное к изменению расхода натрия на входе в активную зону;  $G(t)$ ,  $G_0$  — текущее и среднее значения расхода натрия через АЗ соответственно. В общем случае расходный коэффициент реактивности сложным образом зависит от температуры натрия и мощности реактора [2]. При медленном изменении мощности и расхода натрия в небольших пределах (до  $\sim 10\%$ ) значение расходного коэффициента реактивности можно принять равным асимптотически установившемуся  $-0,7 \pm 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / \text{м}^3/\text{ч}$  [2, 3].

*Мощностная обратная связь.* Колебания медленной мощностной обратной связи  $\rho_w(t)$  определялись из уравнения баланса реактивности относительно состояния равновесной импульсной критичности сразу после выхода на номинальную мощность 2 МВт (базовое состояние) в следующем виде:

$$\rho_w(t) = [\rho_{\Sigma}(t) - \rho_T(t) - \rho_G(t) - \rho_E(t)], \quad (8)$$

где  $\rho_{\Sigma}$ ,  $\rho_T$ ,  $\rho_G$  определены выше,  $\rho_E$  — эффект выгорания топлива.

*Статистический анализ.* Шумы процесса  $X(t)$  рассматривались как отклонение текущих значений исследуемого параметра  $X_{\text{исх}}(t)$  от его среднего значения  $\bar{X}$  за вычетом линейного тренда  $X(t) = X_{\text{исх}}(t) - \bar{X} - dX/dt \cdot T$ ; здесь  $T$  — анализируемый интервал времени. Все дальнейшие процедуры статистического анализа выполнялись над временным рядом  $X(t)$ . Определялись коэффициенты парной корреляции и множественный коэффициент корреляции как показатель степени статистической взаимосвязи между одним параметром и набором некоторых двух других. Вычислялись также спектральные характеристики колебаний. Спектральная плотность колебаний параметров  $S_X^{(i)}(f)$  и взаимная спектральная плотность  $S_{XY}^{(i)}(f)$  вычислялись с использованием конечного дискретного преобразования Фурье (F) по всему временному ряду  $X(t)$  за полный реакторный цикл [4]:

$$|S_X^{(i)}(f)|^2 = \{F[X(t)]\}^2.$$

Определялась также функция когерентности  $\gamma_{XY}^2(f)$  — отношение модуля взаимного спектра к модулям спектров двух процессов. Эта функция отражает линейную связь двух параметров по частотам аналогично тому, как коэффициент корреляции отражает степень линейной взаимосвязи двух процессов во временной области.



Амплитуда колебаний гармонического вида. Оценка амплитуды колебаний ( $a$ ) на выделенной частоте  $f_j$  вычислялась из равенства дисперсии колебаний  $\sigma_{f_j}^2$ , определенной в спектральной плотности  $|S_X^{(i)}(f)|^2$  в диапазоне частоты  $\Delta f_j$   $\sigma_{f_j}^2 = \Sigma_{\Delta f_j} |S^{(i)}(f_j)|^2 \Delta f$ , дисперсии гармонического колебания  $\frac{a^2}{2}$ . При такой оценке амплитуда колебаний равна  $a = \sqrt{2\sigma_{f_j}^2}$ .

## 2. ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве характеристик колебаний исходных измеряемых параметров первого контура использовались спектральные плотности колебаний, их амплитуды, а также плотности распределений и параметры разброса.

**2.1. Колебания расхода, температуры натрия и колебания тепловой мощности.** Спектральный состав и амплитуды колебаний расхода и температуры натрия на входе в АЗ, а также подогрева натрия в АЗ показаны на рис. 3 и в табл. 1. Номера пиков, отмеченных на рис. 3, соответствуют номерам в табл. 1. Из рис. 3 видно, что в спектрах колебаний расхода и температур натрия имеются два-три больших пика на частотах, указанных в табл. 1. Остальные колебания вносят менее 3 % в энергию колебаний, и ими при анализе можно пренебречь. Основной пик колебаний для всех указанных на рис. 3 процессов находится на частоте суточных колебаний, т. е. с периодом 24 ч.

Как следует из табл. 1, амплитуда колебаний полного расхода натрия через АЗ на основной частоте составляет 2,4 м<sup>3</sup>/ч, в петле А — 0,9 м<sup>3</sup>/ч и в петле Б — 0,7 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, амплитуда суточных колебаний расхода в петле А в 1,28 раза выше, чем в петле Б, как и температура натрия на выходе из АЗ (5,4 °С) по сравнению с входной (4,3 °С) (см. табл. 2).

Разность колебаний температуры натрия на выходе и входе в АЗ плюс колебания расхода определяют колебания тепловой мощности (см. выражение (5)). Спектр колебаний тепловой мощности близок к белому шуму с

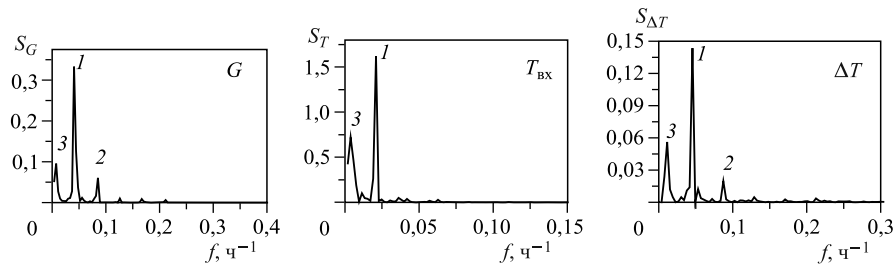


Рис. 3. Спектральные плотности колебаний расхода натрия через АЗ ( $S_G$ ), его температуры на входе в АЗ ( $S_T$ ) и подогрева в АЗ ( $S_{\Delta T}$ ).

**Таблица 1. Амплитуды колебаний ( $a_G$ ) расхода в петлях А ( $G_A$ ) и Б ( $G_B$ ) первого контура, суммарного расхода через АЗ ( $G_\Sigma$ ) и температуры натрия  $a_T$  на входе и выходе из АЗ при мощности 2 МВт**

№	Период колебаний, ч	Амплитуда колебаний расхода $a_G, \text{ м}^3/\text{ч}$			Амплитуда колебаний температуры, °С	
		$G_\Sigma$	$G_A$	$G_B$	$T_{\text{вх}}$	$T_{\text{вых}}$
1	24	2,4	0,9	0,7	4,3	5,4
2	12	1,1	0,64	0,5	—	—
3	88	1,1	0,64	0,3	2,9	3,3
Среднее значение		$\overline{G_\Sigma} = 103$	$\overline{G_A} = 52$	$\overline{G_B} = 51$	$\overline{T_{\text{вх}}} = 291$	$\overline{T_{\text{вых}}} = 350$

**Таблица 2. Значения амплитуд колебаний подогрева натрия ( $a_{\Delta T}$ ) и тепловой мощности ( $a_{\Delta W}$ ) реактора на основных частотах**

№	Период колебаний, ч	Амплитуда колебаний подогрева $a_{\Delta T}, \text{ °С}$	Амплитуда колебаний тепловой мощности $a_{\Delta W}, \text{ кВт}$
1	24	1,32	$\sim 2$
2	12	0,87	—
3	88	1,10	—

одной выраженной частотой суточных колебаний, амплитуда которой приведена в табл. 2. Среднее значение подогрева натрия и мощности реактора составляли 59 °С и 1930 кВт соответственно.

Как видно из табл. 2, амплитуда суточных колебания тепловой мощности мала:  $\sim 2$  кВт. Это связано с тем, что соответствующие доминантные колебания расхода и подогрева натрия в АЗ находятся в противофазе. Полные колебания тепловой мощности гораздо больше, но не превышают  $\pm 10$  кВт (см. п. 2. 3).

**2.2. Колебания уровня натрия и давления аргона в газовой полости над активной зоной.** Ранее, еще на стадии пуска ИБР-2, было показано, что влияние давления аргона в газовой полости над АЗ на реактивность отсутствует или же пренебрежимо мало, т. е. т. н. изобарический эффект реактивности отсутствует [3]. То же утверждалось и для уровня натрия над АЗ. Спектральный состав колебаний давления аргона в газовой полости и уровня натрия над активной зоной подобен колебаниям расхода натрия с амплитудами, представленными в табл. 3. Корреляционная связь между уровнем натрия и давлением аргона над активной зоной на основной частоте колебаний высокая (функция когерентности равна 0,8). Можно считать, что указанные процессы жестко

**Таблица 3. Амплитуды колебаний уровня натрия и давления аргона в газовой полости над АЗ на основных частотах при расходе натрия через АЗ 100 м<sup>3</sup>/ч**

№	Период колебаний, ч	Амплитуда колебаний уровня натрия $a_h$ , мм	Амплитуда колебаний давления аргона $a_{Ar}$ , ати
1	24	4,0	0,012
2	88	2,2	0,0092
3	12	1,6	0,0058

взаимосвязаны и при нормальной работе реактора колебания давления аргона вызваны изменением уровня натрия.

Обращает на себя внимание тот факт, что детерминированные (гармонического вида) колебания уровня натрия малы: полный размах колебаний равен 4,5 см (см. п. 2.3), а амплитуда основного колебания с периодом 24 ч равна всего 4 мм. Такие изменения уровня не могут вызвать заметных колебаний реактивности и повлиять на энергию импульса. Расчетное изменение реактивности при уменьшении уровня, например, на 10 мм мало ( $< 10^{-5} \% K_{эф}$ ). Отсюда становится понятным полученный ранее результат о нулевом изобарическом эффекте реактивности ИБР-2. Таким образом, при оценке шумов реактивности, вызванных колебаниями уровня натрия и давления аргона в газовой полости над АЗ, последними в нормальном состоянии реактора можно пренебречь.

**2.3. Плотность распределения полных колебаний параметров первого контура.** На рис. 4 приведены плотности распределения колебаний некоторых параметров первого контура: расхода натрия через АЗ, уровня натрия в газовой полости над АЗ и температуры натрия на входе и выходе из АЗ. В табл. 4 даны значения разброса параметров. Там же в табл. 4 даны и параметры разброса колебаний тепловой мощности.

Как следует из табл. 4, полные колебания параметров первого контура достаточно велики. В среднем, относительный размах колебаний таких важных параметров, как температура и расход натрия, составляет 6–8%. При этом наблюдаемый линейный тренд всех параметров отрицательный, наиболее заметный для температуры натрия на выходе из АЗ – 0,72 °С/сут. При наличии отрицательного тренда в подогреве и расходе натрия наблюдается и соответствующий им тренд тепловой мощности со скоростью –5 кВт/сут, или 0,25%/сут. Полные колебания тепловой мощности за реакторный цикл составляют не более ~ 1%, а уменьшение мощности — 2,5%. Имеется ряд объяснений наблюдаемому процессу деградации мощности, однако точного понимания пока нет.

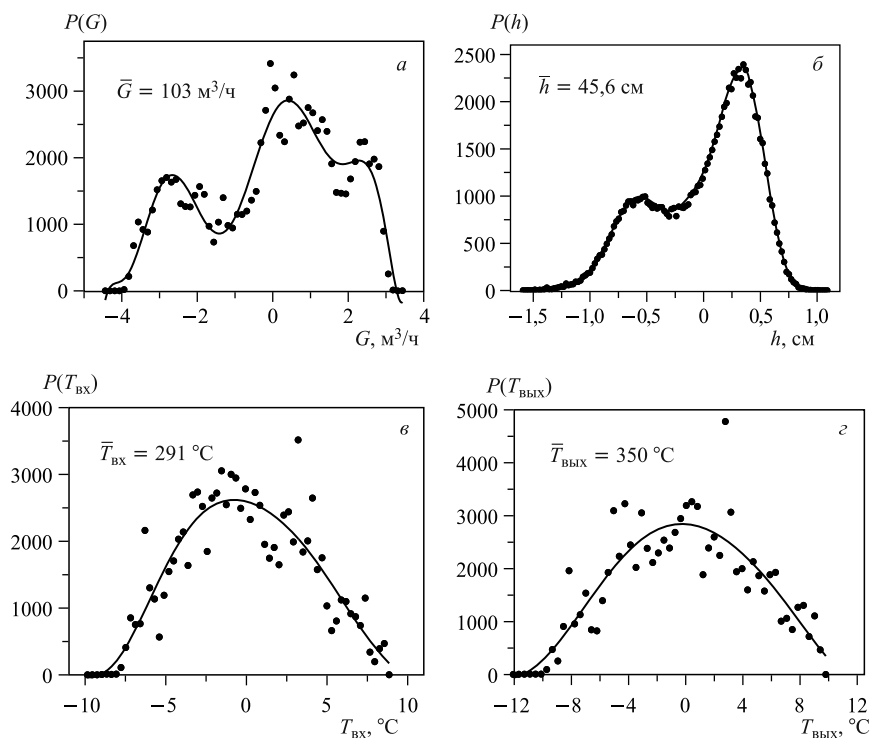


Рис. 4. Плотность распределения колебаний некоторых параметров первого контура: *a* — расхода натрия через АЗ  $G$ ; *б* — уровня натрия в газовой полости над АЗ  $h$ ; *в* — температуры натрия на входе  $T_{\text{вх}}$ ; *г* — на выходе из АЗ  $T_{\text{вых}}$

**Таблица 4.** Стандартное отклонение ( $\sigma$ ) и размах колебаний ( $\Delta m$ ) основных теплофизических параметров первого контура системы охлаждения АЗ ИБР-2М при мощности 2 МВт и расходе натрия  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\Delta x/\Delta_{\text{сут}}$  — средний за цикл линейный тренд параметров за сутки

Параметр	Стандартное отклонение $\sigma$	Размах колебаний $\Delta m$	Линейный тренд $\Delta x/\Delta_{\text{сут}}$
Расход натрия через АЗ, $\text{м}^3/\text{ч}$	1,8	8,1	-0,075
Уровень натрия, мм	9	45	-2,5
Температура натрия на входе в АЗ, $^{\circ}\text{C}$	3,8	18,0	-0,45
Температура натрия на выходе из АЗ, $^{\circ}\text{C}$	4,6	20,5	-0,72
Подогрев натрия в АЗ, $^{\circ}\text{C}$	1,8	8,8	-0,26
Давление аргона в газовой полости над АЗ, ати	0,012	0,06	-0,0016
Тепловая мощность $W$ , кВт	2,5	18,0	-5,0 кВт/сут

Полные колебания расхода натрия через АЗ, равные 8,1 %, соответствуют полным колебаниям давления аргона над АЗ ( $\sim 8,2\%$  при среднем значении давления 0,73 ати).

### 3. ШУМЫ РЕАКТИВНОСТИ

**3.1. Полные шумы реактивности и шумы реактивности мощностной обратной связи.** В шумы реактивности со стороны первого контура вносят вклад источники различного типа: в основном это температурные, расходные и мощностные. Спектральный состав и интенсивность колебаний полной реактивности при работе реактора с включенной системой стабилизации мощности, т. е. когда мощность реактора поддерживается в среднем на постоянном уровне, показаны на рис.5 и в табл.5. Из рис.5 видно,

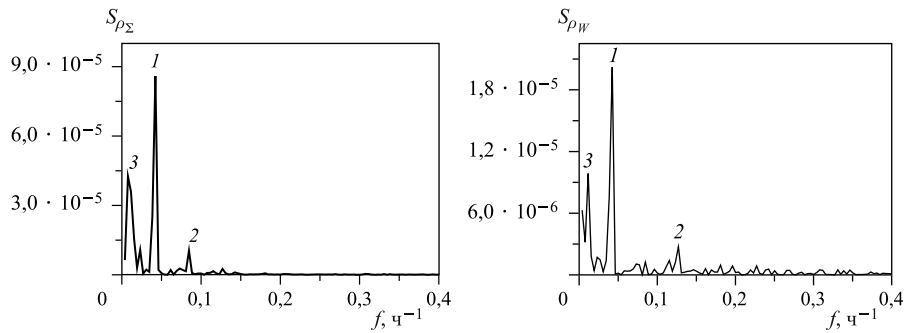


Рис. 5. Спектральная плотность медленных колебаний полной реактивности (слева) и реактивности мощностной обратной связи (справа) при работе реактора на мощности 2 МВт и расходе натрия через АЗ  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$

**Таблица 5. Средняя амплитуда колебаний полной реактивности ( $a_{\rho_{\Sigma}}$ ), реактивности мощностной обратной связи ( $a_{\rho_W}$ ) и суммарной реактивности по температуре и расходу натрия ( $a_{\rho_{TG}}$ ) на основных частотах**

№	Период колебаний, ч	Амплитуда колебаний реактивности, $10^{-2} \beta_{эф}$		
		$a_{\rho_{\Sigma}}$	$a_{\rho_W}$	$a_{\rho_{TG}}$
1	24	3,0	1,32	5,7
2	12	1,3	–	–
	8	–	0,55	0,75
3	88	2,1	0,90	3,0

что в спектрах колебаний полной реактивности и реактивности мощностной обратной связи имеются три пика с основным пиком на частоте суточных колебаний (24 ч). При этом амплитуда суточных колебаний значительная:  $3,0 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$ . Как следствие, орган регулирования в системе обратной связи реактора претерпевает существенные колебательные перемещения. Амплитуда суточных колебаний автоматического регулятора (без учета компенсации постоянного тренда реактивности) вверх-вниз достигает  $\pm 66$  мм, из которых  $\pm 29$  мм вызваны колебаниями реактивности мощностной обратной связи. Для оценок использовалась дифференциальная эффективность АР, равная  $0,045 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{мм}$ . Как видно из рис. 5 и табл. 5, в колебаниях полной реактивности присутствует также очень медленная компонента с периодом 3,7 сут (88 ч). Для реакторного цикла, длительность которого превышает две недели, эта компонента определяется более точно и равна 7 сут. Реакция АР на эти недельные изменения реактивности составляет  $\pm 46$  мм. Такая покомпонентная оценка перемещений автоматического регулятора важна тем, что она дает оценку влияния отдельных колебательных процессов со стороны первого контура на работу системы автоматической стабилизации мощности. Фактически, эти оценки показывают, что будет, если исчезнут все колебательные компоненты реактивности, кроме одного. Поскольку указанные выше компоненты смещены по фазе друг к другу, то полные колебания реактивности существенно выше. Например, размах колебаний полной реактивности, как и реактивности мощностной обратной связи, составляет каждые

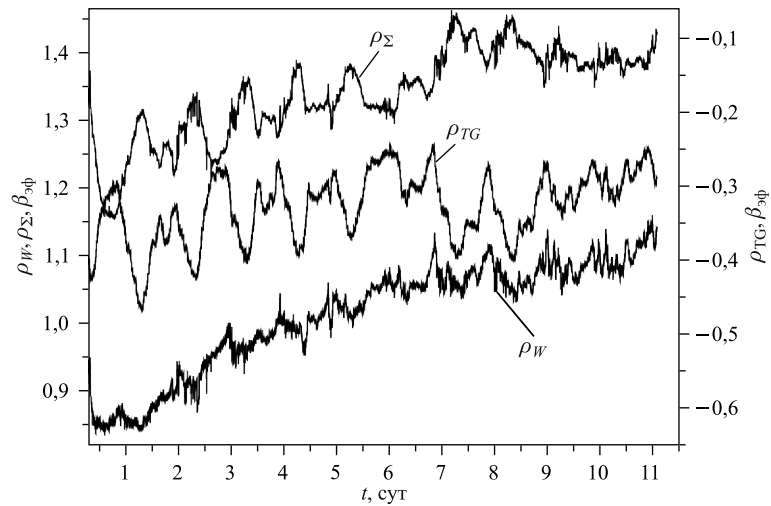


Рис. 6. Изменение полной реактивности ( $\rho_{\Sigma}$ ), реактивности мощностной обратной связи ( $\rho_w$ ) и суммарной реактивности по температуре и расходу натрия ( $\rho_{TG}$ ) в цикле через 10 ч после выхода на номинальную мощность 2 МВт

**Таблица 6. Стандартное отклонения ( $\sigma$ ) и размах ( $\Delta\rho_m$ ) полной реактивности ( $\rho_\Sigma$ ), реактивности мощностной обратной связи ( $\rho_w$ ) суммарной реактивности по температуре и расходу натрия ( $\rho_{TG}$ ) и реактивности по температуре ( $\rho_T$ ) и расходу натрия ( $\rho_G$ ).  $\Delta\rho/\Delta t$  — линейный тренд реактивности за сутки**

Параметр	Стандартное отклонение $\sigma, 10^{-2}\beta_{эф}$	Размах колебаний $\Delta\rho_m, 10^{-2}\beta_{эф}$	Линейный тренд $\Delta\rho/\Delta t, 10^{-2}\beta_{эф}/сут$
Полная реактивность $\rho_\Sigma$	2,7	14,0	1,5
Реактивность мощностной обратной связи $\rho_w$	1,6	13,0	2,3
Суммарная реактивность по температуре и расходу $\rho_{TG}$	3,5	15,2	0,75
Реактивность по температуре натрия $\rho_T$	4,0	17,5	0,6
Реактивность по расходу натрия $\rho_G$	1,2	4,8	0,083

~ 300 мм движения АР. Колебательная неустойчивость полной реактивности в данном случае накладывается на ее значительный тренд, равный 33 мм АР/сут. С учетом компенсации тренда с помощью промежуточного регулятора (действия оператора на пульте управления реактора) полные колебания АР составляют 100 мм. Возможные компоненты тренда полной реактивности подробно рассмотрены в [1]. На рис.6 приведен ход полной реактивности ( $\rho_\Sigma$ ), реактивности мощностной обратной связи ( $\rho_w$ ), суммарной реактивности по температуре и расходу натрия ( $\rho_{TG}$ ) и реактивности по температуре ( $\rho_T$ ) и расходу натрия ( $\rho_G$ ) за реакторный цикл В табл.6 даны значения разброса параметров.

**3.2. Шумы реактивности от колебаний расхода и температуры натрия на входе в активную зону.** Колебания расхода и температуры натрия на входе в АЗ непосредственно влияют на реактивность (см. выражения (6), (7)). Спектральные плотности колебаний реактивности по расходу и температуре натрия повторяют спектральный состав колебаний самого расхода и температуры (см. рис. 3). На 96 % температурные и расходные компоненты реактивности состоят из 2–3-х частот, указанных в табл.7. Из табл.7 видно, что температурные колебания реактивности в 3–5 раз выше расходных, т. е. в системе стабилизации мощности температурные возмущения доминируют. В целом, это обстоятельство, т. е. наличие только одной доминантной компоненты в полных шумах реактивности, упрощает контроль за работой системы стабилизации мощности.

**Таблица 7. Амплитуда колебаний реактивности по расходу и температуре натрия на входе в АЗ на основных частотах при мощности 2 МВт и расходе 100 м<sup>3</sup>/ч**

№	Период колебаний, ч	Амплитуда колебаний реактивности, $10^{-2}\beta_{эф}$	
		по расходу ( $a_{\rho_G}$ )	по температуре ( $a_{\rho_T}$ )
1	24	1,64	4,8
2	12	0,78	–
3	88	0,50	3,0

Обращает на себя внимание тот факт, что характерный «сбой» в температуре и расходе натрия, видимый на рис. 2 на 5–6-е сутки от начала реакторного цикла, попадает на субботний и воскресный день. Это типичная картина колебаний параметров первого контура в любом реакторном цикле. Наблюдаемый «сбой», вероятнее всего, вызван изменением режима питания электромагнитных насосов 1-го контура. Сетевая нагрузка в субботу и воскресенье уменьшается, меняется частота и напряжение в сети, что напрямую действует на работу насосов. Соответственно меняется расход натрия через АЗ. Таким образом, первопричина периодических недельных возмущений реактивности и, соответственно, компенсирующих движений органов регулирования реактора определяется возмущениями расхода, и затем уже, как следствие, изменением температуры натрия.

#### **4. ВЗАИМНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ КОЛЕБАНИЯМИ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВОГО КОНТУРА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ И КОЛЕБАНИЯМИ РЕАКТИВНОСТИ**

Основные корреляционные связи между колебаниями теплодинамических параметров первого контура системы охлаждения АЗ и колебаниями реактивности представлены в табл. 8. На рис. 7 для иллюстрации приведены спектральные плотности колебаний температуры и расхода натрия через АЗ, реактивности мощностной обратной связи, полной реактивности, взаимные спектральные плотности и функции когерентности.

Для всех колебаний реактивности характерна одна особенность: основное колебание представляет собой колебание гармонического вида с периодом, равным одним суткам. Из рис. 6 видно, что взаимные колебания реактивности мощностной обратной связи и полной реактивности, а также колебаний расхода и температуры натрия в первом контуре наблюдаются на одной частоте с периодом одни сутки. Фазовый сдвиг на этой частоте  $\Phi_{\rho_W \cdot \rho_\Sigma}$



**Таблица 8. Коэффициенты парной корреляции ( $r_{xy}$ ) между колебаниями отдельных параметров первого контура и колебаниями реактивности, а также значения функции когерентности ( $\gamma_{xy}^2$ ) на основной частоте суточных колебаний (период 24 ч)**

Теплодинамические параметры первого контура и колебаний реактивности	Коэффициент корреляции $r_{xy}$	Значение функции когерентности для суточных колебаний
Температура и полный расход натрия на входе в АЗ ( $T_{вх} - G_{\Sigma}$ )	-0,77	0,91
Уровень натрия и давление аргона в газовой полости над АЗ ( $P_{Ar} - h$ )	0,63	0,8
Расход натрия в петлях А и Б ( $G_A - G_B$ )	0,92	0,97
Полный расход натрия на входе в АЗ и уровень натрия ( $G_{\Sigma} - h$ )	0,63	0,96
Реактивность мощностной обратной связи и полная реактивность ( $\rho_w - \rho_{\Sigma}$ )	-0,57	0,87
Реактивность по температуре и расходу натрия на входе в АЗ ( $\rho_T - \rho_G$ )	-0,72	0,93

между полной реактивностью и реактивностью мощностной обратной связи практически отсутствует ( $-1^\circ$ ), а функция когерентности высокая ( $-0,87$ ) Можно сказать, что колебания полной реактивности практически без запаздывания следуют за колебаниями мощностной обратной связи. Корреляция между ними достаточно жесткая, но не полная, что указывает на присутствие в полной реактивности компонент от других источников шумов, находящихся вне системы охлаждения АЗ.

Корреляционная связь между колебаниями реактивности по температуре и расходу на входе в активную зону на частоте суточных колебаний высокая и, естественно, отрицательная: функция когерентности равна 0,93, а коэффициент корреляции  $-0,72$  Таким образом, снижение, например, расхода на входе в АЗ приведет к росту реактивности за счет расходной компоненты обратной связи и росту температуры на выходе из АЗ, который через время циркуляции по контуру (минуты) вызовет уменьшение реактивности за счет температурного эффекта. Общая реактивность суточных колебаний будет скомпенсирована и уменьшится. Как и ожидалось, такая же сильная корреляция на основной частоте суточных колебаний наблюдается и между колебаниями температуры и расхода натрия на входе в АЗ: функция когерентности 0,91, коэффициент корреляции  $-0,77$  (см. табл. 8).

Анализ множественного коэффициента корреляции между тремя параметрами, такими как расход, температура натрия на входе в АЗ и реактив-

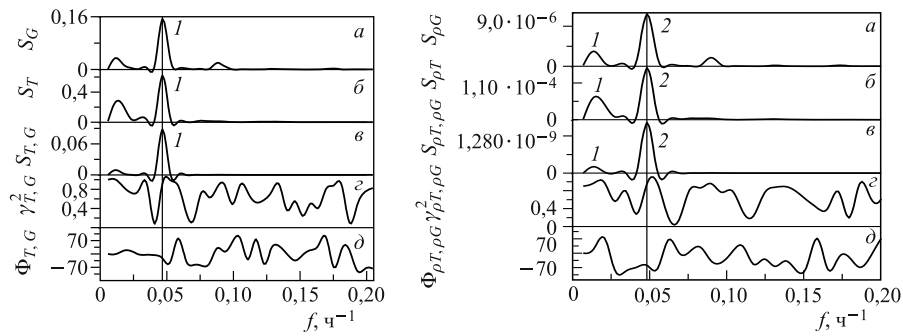


Рис. 7. Корреляция между температурой и расходом натрия на входе в АЗ (слева) и между колебаниями реактивности мощностной обратной связи и колебаниями полной реактивности (справа): спектральная плотность колебаний первого (а) и второго (б) параметров; взаимная спектральная плотность (в), функция когерентности (г) и фазовый сдвиг (д)

ность мощностной обратной связи, показывает, что статистическая взаимосвязь между ними средняя (0,69). Такая же степень корреляции наблюдается и между реактивностью обратной связи по расходу, температуре натрия на входе в АЗ и полной реактивностью (множественный коэффициент корреляции равен 0,64). Это, как и при анализе парных корреляций, говорит о том, что колебания полной реактивности и реактивности обратной связи частично скомпенсированы и их корреляционная связь с расходом и температурой уменьшилась.

## 5. ВЫВОДЫ

Исследование шумов реактивности, вызванных колебаниями и трендом основных параметров первого контура системы охлаждения активной зоны при работе реактора на номинальной мощности 2 МВт, показало следующее:

- Полные колебания параметров первого контура достаточно велики: 6–8%. Они проявляются на фоне отрицательного линейного тренда. В наибольшей степени тренд наблюдается для температуры натрия на выходе из АЗ ( $-0,72$  °С/сут) и тепловой мощности, деградация которой идет со скоростью  $-5$  кВт/сут. Полные колебания тепловой мощности за реакторный цикл — не более  $\sim 1\%$ , а уменьшение мощности —  $2,5\%$ ;

- Колебания давления аргона над АЗ ( $\sim 8\%$ ) и уровня натрия (4,5 см) не могут вызвать заметных колебаний реактивности и мощности;

- В спектрах колебаний всех теплофизических параметров первого контура, а также полной реактивности и реактивности мощностной обратной связи доминирует частота суточных колебаний. Амплитуда суточных колебаний полной реактивности значительная:  $3,0 \cdot 10^{-2} \beta$ . Как следствие, орган автоматического регулирования (АР) в системе обратной связи реактора может претерпевать существенные колебательные перемещения  $\pm 66$  мм,  $\pm 29$  мм из которых вызваны колебаниями реактивности мощностной обратной связи;

- Отдельные компоненты реактивности, вызванные работой первого контура, смещены по фазе друг к другу, поэтому реальные колебания полной реактивности и реактивности мощностной обратной связи могут вызывать  $\sim 300$  мм движения АР каждая.

- Медленные колебания полной реактивности накладываются на ее большой тренд 33 мм АР/сут. С учетом компенсации тренда колебания АР в процессе нормальной работы реактора достигают 100 мм. Тренд полной реактивности обусловлен процессами, действующими вне системы охлаждения АЗ;

- В колебаниях реактивности со стороны первого натриевого контура присутствует очень медленная компонента с периодом  $\sim 7$  сут и амплитудой 46 мм движения АР. Эта компонента реактивности вызвана изменением расхода за счет изменения режима работы электромагнитных насосов при изменении сетевой нагрузки

В целом медленные колебания параметров первого контура системы охлаждения АЗ достаточно сильно влияют на реактивность, работу системы стабилизации мощности и, соответственно, на безопасность реактора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д. Медленные эффекты мощностной обратной связи реактора ИБР-2М. Сообщение ОИЯИ Р13-2013-7. Дубна, 2013.
2. Ананьев В. Д. и др. Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.
3. Ананьев В. Д. и др. Физический пуск импульсного исследовательского реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-12482. Дубна, 1979.
4. Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д., Цогтсайхан Ц. Статистический анализ флуктуаций энергий импульсов реактора ИБР-2М. Сообщение ОИЯИ Р13-2012-131. Дубна, 2012.

Получено 16 июля 2014 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 06.10.2014.

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

Усл. печ. л. 1,43. Уч.-изд. л. 1,82. Тираж 245 экз. Заказ № 58345.

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/)