

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

*П 58*

P13-87-808

А.К.Попов, Хан Ки Тхе, Е.П.Шабалин

**АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ РЕАКТИВНОСТИ  
В РЕАКТОРЕ ИБР-2**

**1987**

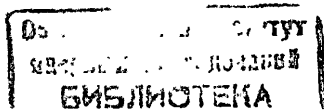
## 1. ВВЕДЕНИЕ

В импульсном ядерном реакторе обычно происходят значительные флуктуации мощности. Первопричиной этих флуктуаций является изменение реактивности; поэтому контроль реактивности точнее отражает физические /или механические/ явления в реакторе, нежели контроль мощности. Однако прямое измерение реактивности невозможно; эта величина может быть оценена в результате обработки последовательности зарегистрированных значений энергии импульсов мощности. Оценивая реактивность, можно учесть изменение положения блоков регулирования, расхода и температуры теплоносителя, мощности реактора и других параметров, влияющих на реактивность, и тем самым выделить изменение базовой или внешней реактивности, т.е. неконтролируемую составляющую реактивности. Информация о состоянии реактора будут нести как среднее значение отклонения реактивности, так и дисперсия реактивности. Например, при локальных нарушениях теплосъема в активной зоне будут значительными флуктуации реактивности, при медленных процессах /типа деформаций конструктивных элементов, утечки теплоносителя/ будет изменяться баланс реактивности<sup>1/</sup>, а изменений мощности может не происходить.

В проектируемой для реактора ИБР-2 информационно-диагностической системе предполагается контролировать реактивность в импульсах и различные моменты ее распределения. Такой контроль может быть осуществлен лишь при условии, что фоновые процессы флуктуаций реактивности /то есть флуктуации в нормальном, невозмущенном режиме работы реактора/ значительно меньше ожидаемых при авариях. С целью оценки возможности диагностирования состояния реактора по флуктуациям реактивности и выбора параметров схемы контроля и была проведена эта работа.

## 2. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Исходным материалом для анализа были зарегистрированные последовательности значений /массивы/ энергии импульсов мощности ( $E_k$ ) с числом элементов в каждом массиве  $N = 8000^{2/}$ .



Экспериментальные массивы были получены в установившихся штатных режимах работы реактора при различных значениях мощности реактора, расхода теплоносителя, частоты импульсов, при включенной и отключенной системе автоматического регулирования /АР/ мощности. Для каждого импульса мощности вычисляли соответствующее ему значение суммарной реактивности /то есть реактивности, включающей внешнюю, неконтролируемую реактивность, реактивность стержня АР и реактивность обратной связи/ согласно соотношению

$$\rho_k = \ln(E_k/S_k) - \overline{\ln(E/S)} \quad /1/$$

Здесь  $S_k$  - интенсивность источника запаздывающих нейтронов - определяли по рекуррентной формуле, вытекающей из решения уравнений для запаздывающих нейтронов в предположении отсутствия делений в промежутке между импульсами мощности:

$$S_k = \sum_{i=1}^6 S_{ik} ; S_{ik} = (S_{i(k-1)} + A_i E_{k-1}) B_i, \quad /2/$$

где  $i$  - номер группы запаздывающих нейтронов. Использованные в расчетах значения коэффициентов  $A_i = \mu_i \lambda_i$ ,  $B_i = \exp(-\lambda_i T)$ , где  $\mu_i$ ,  $\lambda_i$  - относительная доля и постоянная распада  $i$ -й группы запаздывающих нейтронов, даны в табл. 1 для частоты импульсов мощности 5 Гц / $T = 0,2$  с/. Среднее значение логарифма вычисляли по формуле

$$\overline{\ln(E/S)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln(E_n/S_n).$$

Таблица 1

$i$	$A_i$	$B_i$
1	0,0004902	0,9974
2	0,008708	0,9938
3	0,02894	0,9736
4	0,1086	0,9359
5	0,1298	0,7772
6	0,1124	0,5262

В отдельных случаях рассчитывали также внешнюю реактивность, вычитая из суммарной реактивности реактивность обратной связи. Последнюю определяли по следующему рекуррентному соотношению:

$$\rho_{k+1}^{o.c.} = (\rho_k^{o.c.} + k_P \bar{P} \frac{T}{T_{o.c.}} \frac{E_k - \bar{E}}{\bar{E}}) e^{-T/T_{o.c.}}, \quad /3/$$

с начальным условием  $\rho_0^{o.c.} = 0$ .

В формуле /3/  $\bar{P}$  и  $\bar{E}$  - средние значения мощности и энергии импульсов мощности реактора, а  $k_P$  и  $T_{o.c.}$  - соответственно быстрый мощностной коэффициент реактивности ( $k_P = -0,01 \beta_n / \text{кВт}$ ) и постоянная времени обратной связи ( $T_{o.c.} = 10$  с) <sup>/3/</sup>, где  $\beta_n$  - так называемая импульсная доля запаздывающих нейтронов.

При оценке дисперсии реактивности экспериментальный массив разбивали на равные отрезки по  $M$  импульсов в каждом / $M=5 \div 200$ /, и дисперсию оценивали в каждом отрезке с номером  $\ell$  по числу импульсов  $m = 2, 3, \dots, M$ :

$$D\rho_{m,\ell} = \frac{1}{m} \sum_{k=k_0}^{k=k_1} \rho_k^2 - \left( \frac{1}{m} \sum_{k=k_0}^{k=k_1} \rho_k \right)^2, \quad /4/$$

где  $k$  - текущий номер импульса в экспериментальном массиве / $k = 1, 2, \dots, 8000$ /,  $k_0 = 1 + (\ell - 1)M$ ,  $k_1 = m + (\ell - 1)M$ .

Программа анализа флуктуаций реактивности, составленная на Фортране для CDC-6500, позволяла также помимо оценки дисперсии реактивности вычислять разность реактивностей между соседними, а также четными /или нечетными/ импульсами и находить аномалии случайного процесса флуктуаций реактивности, когда в заданном числе последовательных импульсов отклонение реактивности превышает заданное значение.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Был обработан 31 массив экспериментальных данных; некоторые данные о массивах и результатах обработки - в табл. 2, 3 и на рис. 1, 2.

Основные выводы, которые были сделаны в результате анализа, следующие:

3.1. Нет существенной зависимости дисперсии реактивности от режима работы реактора; очевидно лишь увеличение дисперсии в интервале средних мощностей реактора от 1 до 2 МВт. Среднеквадратическое отклонение реактивности во всех случаях лежит в диапазоне  $0,01 \div 0,07 \beta_n$ . При мощности 2 МВт диапазон значений среднеквадратического отклонения реактивности составляет  $0,023 \div 0,067 \beta_n$ .

3.2. Оценка дисперсии, как правило, сходится при числе импульсов  $m \sim 10$  /т.е. за  $\sim 2$  с/; это видно на кривых 1, 4, 11 рис. 1. В нескольких случаях /эксперименты №№ 22, 23, 26-28/

Таблица 2 /продолжение/

Таблица 2

№ экс-перимента	Дата экс-перимента	Мощность кВт/расход теплоносителя, м <sup>3</sup> /ч	Максимальное изменение реактивности $\Delta\rho$ и её скорость $\Delta\rho/\Delta t$				Среднеквадратическое отклонение в массиве		Число импульсов ано-мального откл.
			Между соседними импульсами		Между чётными (или нечётными) импульсами		Среднее $\sqrt{D\rho} \cdot 100$	Максимальное $\sqrt{D\rho_{max}} \cdot 100$	
			$\Delta\rho \cdot 100$	$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} \cdot 100$	$\Delta\rho \cdot 100$	$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} \cdot 100$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 <sup>***</sup>	21.12.81	0,4/98	3,5	89	4,8	60	1,4	1,7	-
2 <sup>***</sup>	21.12.81	0,4/98	3,7	91	4,3	54	1,5	1,7	-
3 <sup>***</sup>	28.1.82	0,6/70	2,9	73	3,3	42	0,9	9,3	-
4 <sup>***</sup>	29.1.82	0,6/70	2,5	62	2,7	34	0,8	1,0	-
5 <sup>***</sup>	2.2.82	1/69	2,3	58	2,9	36	1,1	1,4	-
6 <sup>***</sup>	2.2.82	1/69	2,9	73	3,6	45	1,1	1,2	-
7 <sup>***</sup>	31.3.82	1,5/97	4,1	101	5,1	69	1,9	2,2	-
8	12.1.83	0,4/40	7,3	37	7,3	19	1,5	1,8	-
9	12.1.83	0,4/40	7,9	39	7,3	18	1,8	2,1	-
10 <sup>*</sup>	20.1.83	1/98	7,5	37	8,9	22	1,9	2,2	-
11 <sup>*</sup>	20.1.83	1/98	8,1	41	8,6	21	1,8	2,0	-
12	19.6.85	2/85	17	87	20	51	3,6	4,7	7
13	19.6.85	2/85	16	82	16	41	2,7	3,5	8
14	19.6.85	2/85	15	74	16	40	2,4	3,3	7
15	19.6.85	2/85	13	67	15	36	2,3	3,0	7
16	19.6.85	2/85	26	130	29	73	5,0	5,7	5
17	19.6.85	2/85	27	134	27	68	5,1	6,1	6
18	21.6.85	2/89	17	86	21	54	3,7	4,7	8
19	21.6.85	2/89	23	117	26	65	5,0	6,1	7
20	21.6.85	2/89	17	87	21	53	3,3	3,8	6
21	21.6.85	2/89	18	89	21	54	3,3	4,1	7
22 <sup>*</sup>	23.1.86	2/84	22	112	25	61	3,0	5,9	13
23 <sup>*</sup>	23.1.86	2/84	21	103	20	50	3,6	5,7	9
24 <sup>*</sup>	23.1.86	2/84	22	117	24	60	5,6	5,8	8
25 <sup>*</sup>	24.1.86	2/84	22	111	23	58	4,8	6,2	8
26 <sup>*</sup>	24.1.86	2/84	34	169	28	69	5,2	8,1	9
27 <sup>*</sup>	24.1.86	2/84	35	173	27	66	4,9	7,7	11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
28 <sup>*</sup>	24.1.86	2/84	34	168	22	56	5,3	7,0	8
29 <sup>*</sup>	24.1.86	2/84	25	123	18	44	4,7	5,4	8
30 <sup>*</sup>	24.1.86	2/84	25	123	32	79	5,8	6,5	8
31 <sup>*</sup>	24.1.86	2/84	32	159	34	86	6,7	7,7	9

Примечание:

1. Реактивность приведена в долях  $\beta_{и}$ .
2. Эксперименты, помеченные одной звездочкой /\*/, соответствуют частоте импульсов мощности 5 Гц с работающим автоматическим регулятором /АР/, не помеченные - 5 Гц с неработающим АР.
3. Эксперименты, помеченные двумя звездочками /\*\*/, соответствуют частоте импульсов мощности реактора 25 Гц с работающим АР.
4. Среднеквадратические отклонения в столбцах 8 и 9 вычислены по формуле /4/ для  $m=M=100$  и  $l=1,2,\dots,80$ .

Таблица 3

Зависимость оценки среднеквадратического отклонения реактивности  $\sqrt{D\rho}$  от числа импульсов  $m$  /для эксперимента № 25/

Число импульсов оценки  $m$  /в скобках - время оценки, доли  $\beta_{и}$ /

Среднее /по массиву/ значение  $\sqrt{D\rho} \cdot 100$ , доли  $\beta_{и}$

Максимальное значение  $\sqrt{D\rho} \cdot 100$  в одном отрезке, доли  $\beta_{и}$

3 (0,6)	3,57	7,86
5 (1)	4,08	6,82
10 (2)	4,47	6,48
25 (5)	4,70	6,36
50 (10)	4,79	6,25
100 (20)	4,83	6,17
200 (40)	4,85	6,15

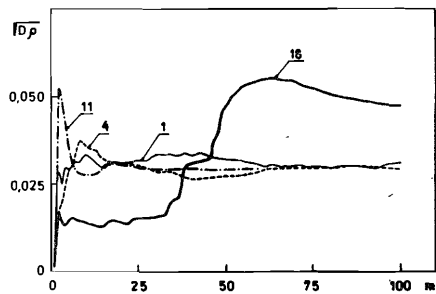


Рис. 1. Оценка среднеквадратического отклонения реактивности  $\sqrt{D\rho}$ , доли  $\beta_{и}$  / в зависимости от числа импульсов, участвующих в оценке ( $m$ ). Номер кривой соответствует номеру отрезка массива. Все кривые соответствуют эксперименту № 22 по нумерации табл. 2.

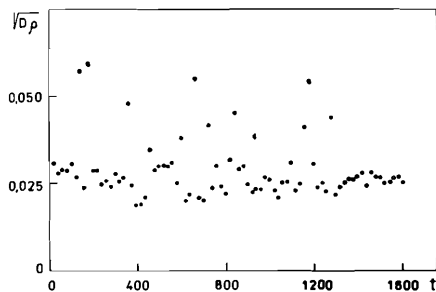


Рис. 2. Изменение оценки среднеквадратического отклонения реактивности во времени для эксперимента № 22. Время  $t$  - в с.

наблюдалось значительное увеличение дисперсии на некоторых отрезках массива /см. кривую 18 на рис. 1 и рис. 2/; для таких массивов характерно 1,5-2-кратное превышение мак-

симального значения среднеквадратического отклонения над средним его значением по массиву.

3.3. Во всех экспериментах скорость изменения реактивности между соседними импульсами мощности составляла  $0,4 \pm 1,7 \beta_{и}/с$ , что много меньше предельно допустимого значения  $10 \beta_{и}/с$ . Значения скорости изменения реактивности между четными /или нечетными/ импульсами почти в 2 раза ниже соответствующих значений, вычисленных для соседних импульсов, что указывает на сильное влияние обратной связи.

Главный вывод из результатов анализа заключается в том, что с точки зрения сходимости оценки среднеквадратического отклонения достаточно 5-10 импульсов; в этом случае оценка будет отличаться от среднего значения этой величины не более чем в 2 раза.

Являются ли полученные данные о параметрах фонового шума реактивности "благополучными" с точки зрения возможности контроля реактивности? Безусловно, да. Из полученных результатов следует, что более чем двукратное превышение /т.е. на  $0,04 \pm 0,05 \beta_{и}$  / среднеквадратического отклонения реактивности над фоном, составляющим  $0,03 \pm 0,04 \beta_{и}$ , может быть идентифицировано как факт какой-либо неисправности в реакторе. Подобный шум

реактивности может создать, например, кипение натрия в объеме всего лишь  $1 \div 10 \text{ см}^{3/4}$  /или вибрация мембраны подвижного отражателя с амплитудой  $\sim 0,5 \text{ мм}$ .

#### 4. АНАЛИЗ АНОМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ФЛУКТУАЦИИ РЕАКТИВНОСТИ

Как уже было сказано выше, в некоторых случаях наблюдалось значительное /до 2 раз/ превышение максимальной оценки дисперсии в отрезках /то есть за короткое время/ над средней оценкой /см. 8 и 9 столбцы табл. 2 и рис. 1 и 2/. Оказалось, что отклонение дисперсии обусловлено быстрым и кратковременным отклонением реактивности и, соответственно, мощности в одну сторону /вверх или вниз/. Число последовательных импульсов мощности /см. рис. 3/, в которых реактивность отклонялась более чем на  $0,05 \beta_{и}$ , приведено в столбце 10 табл. 2.

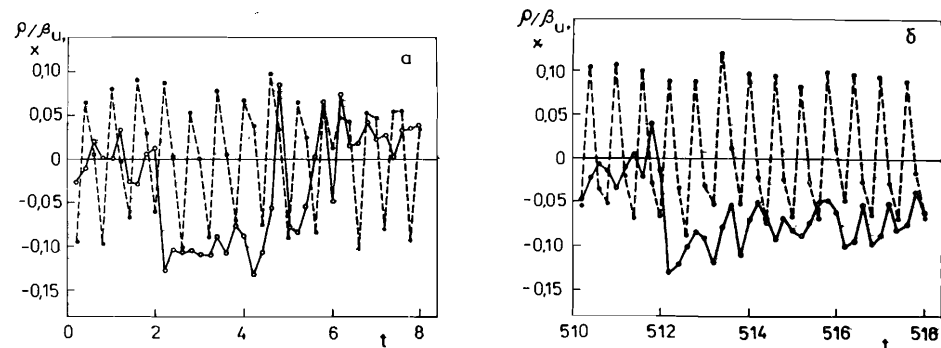


Рис. 3. Изменение во времени суммарной реактивности реактора и осевого смещения основного подвижного отражателя для двух аномальных процессов в эксперименте № 22. Реактивность  $\rho$  - в долях  $\beta_{и}$ , осевое смещение  $x$  - в относит. ед., время  $t$  - в с. Сплошной и пунктирной линиями показаны огибающие соответственно реактивности и смещения.

Естественно, что оценка дисперсии реактивности вследствие кратковременных, но сильных выбросов существенно изменялась в течение промежутка времени более продолжительного, чем время аномалии реактивности /сравните кривую 18 на рис. 1 и рис. 3, которые соответствуют одному процессу/. На рис. 3 приведены значения суммарной реактивности в хронологической последовательности для двух аномальных процессов, а на рис. 4 - внешняя реактивность для тех же процессов /и еще одного/, получен-

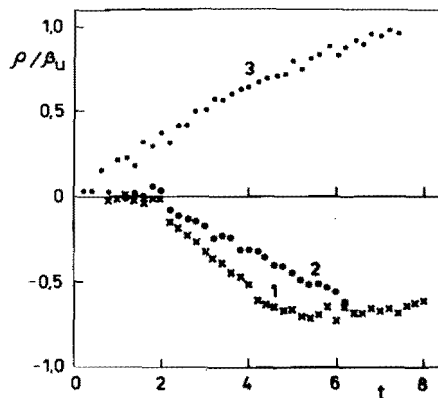


Рис. 4. Изменение внешней реактивности в аномальных процессах. Время  $t$  - в с. Процессы 1 и 2 получены из эксперимента № 22, а процесс 3 - из эксперимента № 26.

ная вычитанием реактивности обратной связи из суммарной реактивности /см. раздел 2/. Видно, что аномальные процессы возникают вследствие монотонного ввода /вывода/ реактивности со скоростью  $0,12 \pm 0,20 \beta_{\text{м}} / \text{с}$  в течение  $2 \div 7$  с. Было показано,

что и основной и дополнительный подвижные отражатели не являются причиной аномальных процессов - нет корреляции отклонений подвижных отражателей с изменениями внешней реактивности /см. рис. 3/. Происходят они, скорее всего, в результате флуктуаций расхода теплоносителя и /или/ колебаний кассет тепловыделяющих элементов активной зоны. Целесообразно провести детальные корреляционные измерения флуктуаций мощности и расхода /температуры/ теплоносителя.

Авторы признательны Ю.Н.Пепельшеву за предоставление экспериментальных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. Препринт ОИЯИ, P13-85-339, Дубна, 1985.
2. Вагов В.А. и др. Сообщение ОИЯИ, P13-82-533, Дубна, 1982.
3. Попов А.К. Сообщение ОИЯИ, P13-84-338, Дубна, 1984.
4. Рогов А.Д., Шабалин Е.П. Сообщение ОИЯИ, P13-9990, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 ноября 1987 года.

Попов А.К., Хан Ки Тхе, Шабалин Е.П.  
Анализ флуктуаций реактивности в реакторе ИБР-2

P13-87-808

Цель работы - оценить возможность диагностирования состояния реактора по флуктуациям реактивности, а также выбора параметров схемы контроля. Исходными данными являлись зарегистрированные последовательности /массивы/ энергии импульсов мощности реактора. Каждый массив состоял из 8000 импульсов. Вычисляли соответствующие этим массивам массивы реактивности, исходя из уравнений кинетики и мощностной обратной связи. Массивы реактивности разбивали на равные отрезки по  $5 \div 200$  импульсов и для каждого из отрезков оценивали среднеквадратическое отклонение реактивности  $\sqrt{D\rho}$ . В результате анализа сделаны следующие выводы: 1/ нет существенной зависимости  $\sqrt{D\rho}$  от режима работы реактора, кроме зависимости от мощности; 2/ скорость изменения реактивности существенно меньше предельно допустимой; 3/ с точки зрения сходимости оценки  $\sqrt{D\rho}$  достаточно 10 импульсов, т.е. 2 с. При этом  $\sqrt{D\rho}$  отличается от своего среднего /фонового/ значения не более чем в 2 раза; 4/ более чем двукратное превышение  $\sqrt{D\rho}$  над фоновым значением, равным  $0,04 \beta_{\text{м}}$ , следует рассматривать как признак какой-либо ненормальности в работе реактора. Анализ таких аномальных процессов показал, что ни основной подвижный отражатель, ни дополнительный не являются причиной аномальных флуктуаций реактивности.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.  
Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Popov A.K., Khan Ki Tkhe, Shabalina E.P.  
Analysis of Reactivity Fluctuations at IBR-2 Reactor

P13-87-808

The purpose of the present work was to analyse a possibility of the pulse reactor diagnostics by measuring the reactivity deviations. Another problem to be solved was to choose parameters of the control scheme. The initial data were the arrays of consequent values of the reactor pulse energy. Each array contained 8000 pulses. By applying reactor kinetics and power feedback equations to treat the pulse energy arrays, the corresponding reactivity arrays were calculated. Then the reactivity arrays were divided into equal segments each consisting of 5-200 pulses; and mean square values of reactivity deviation were estimated for each segment. The following conclusions have been drawn: 1. There is no essential dependence of the  $\sqrt{D\rho}$  value on the regime of reactor operation besides power-reactivity dependence; 2. The rate of reactivity deviation is much less than the value of nuclear safety regulations permits; 3. Ten pulses (2 sec) are sufficient for estimating the  $\sqrt{D\rho}$  value with a reasonable accuracy. The estimate differs from the mean  $\sqrt{D\rho}$  value by not more than twice. 4. If the  $\sqrt{D\rho}$  value is twice or more than the mean value ( $0.04 \beta_{\text{м}}$ ) it should be interpreted as faulty reactor operation. Analysis of these anomalous processes has shown that no moving reflectors cause these abnormal reactivity fluctuations.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.  
Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1987