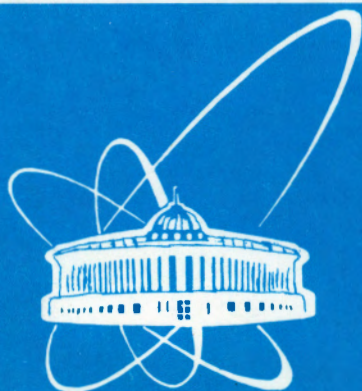


94-215



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-94-215

В.Л.Ломидзе, В.Л.Камионский

РЕАКТОР ИБР-2
ПОСЛЕ ПЕРЕГРУЗКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

1994

Введение

К середине 1993 года реактор ИБР-2 отработал ровно половину проектной кампании, практически исчерпав запас реактивности на выгорание топлива.¹

19-23 июля 1993 г. активная зона ИБР-2 была догружена 74-ой тепловыделяющей сборкой (ТВС) в одну из центральных ячеек (ячейка №3, рис.1). Догрузка топлива осуществлялась после выдержки реактора в заглушенном состоянии в течение 1 месяца. Активность выгруженного имитатора ТВС, измеренная на расстоянии 25 см через слой стали толщиной ~ 10 см, составила 90 Р/ч. Активность на поверхности свежей ТВС – 18 мР/ч. Признаков радиоактивного загрязнения натрия не обнаружено.

После завершения перегрузочных работ были проведены измерения эффективности органов СУЗ, динамических характеристик реактора и некоторых других параметров. Калибровка реактивности стержней СУЗ проводилась по разгону реактора в стационарном режиме (при заторможенном подвижном отражателе). Нейтронный поток измерялся по двум штатным пусковым каналам (ПК-1 и ПК-2, рис.1). Измерения динамических характеристик реактора проводились по штатной методике во время рабочих циклов.

Измерений параметров, влияющих на форму нейтронной вспышки (среднее время жизни мгновенных нейтронов, эффективность модулятора реактивности), не проводилось, поскольку очевидных изменений длительности нейтронного импульса за время эксплуатации реактора обнаружено не было, а догрузка свежей ТВС сама по себе не может заметно повлиять на форму вспышки.

¹ Проектная кампания ИБР-2 рассчитана на отработку реактора 2050 МВт·сут (на 01.01.94).

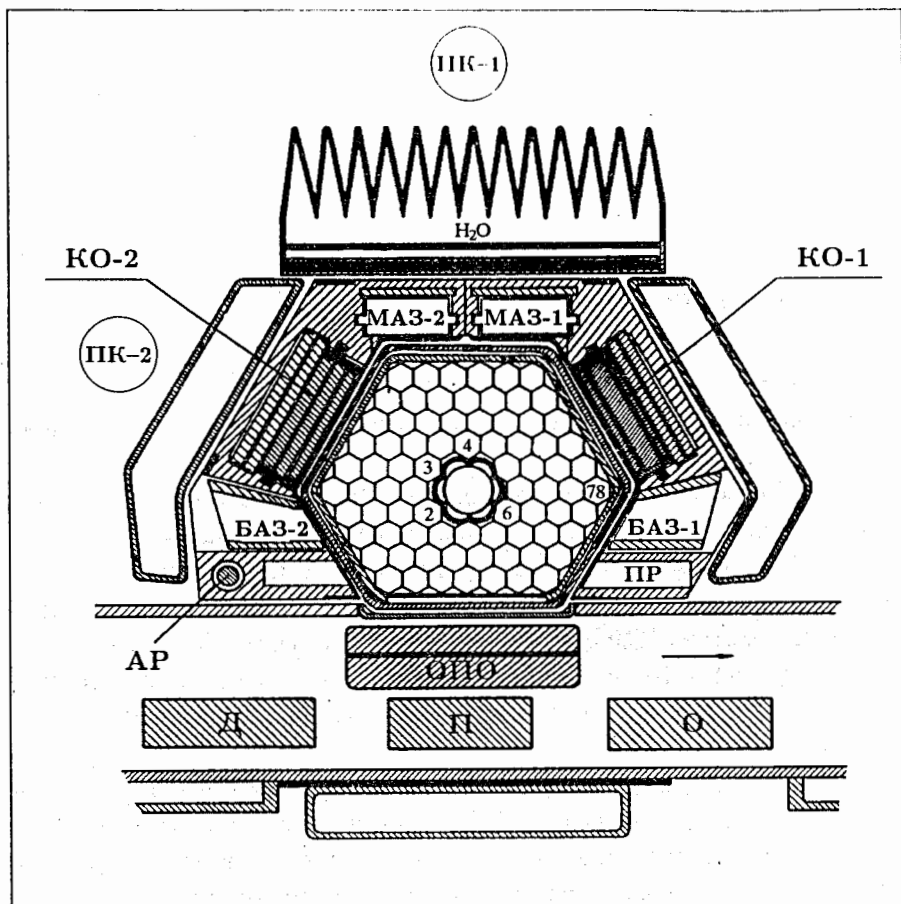


Рис.1. Активная зона ИБР-2 до перегрузки. В ячейках 2,3,4,6,7,8 расположены кассеты-имитаторы. Свежая ТВС была загружена вместо имитатора №3.

Параметры активной зоны после перегрузки

Непосредственно перед началом перегрузочных работ и после догрузки активной зоны были произведены выходы на критичность по запаздывающим нейтронам. В табл.1 измеренные значения критических положений стержней СУЗ после перегрузки (74 ТВС) сравниваются с положениями стержней до перегрузки (73 ТВС).

Таблица 1. Критическое положение органов СУЗ ИБР-2 до (73 ТВС) и после (74 ТВС) перегрузки активной зоны (критичность на запаздывающих нейтронах)

Параметр	73 ТВС	74 ТВС				
G (м ³ /ч)	40	40	—	—	—	—
T ₃₂ (°C)	287,4	282,2	—	—	—	—
АР (мм)	240	240	—	—	—	—
ПР (мм)	230	230	0	418 (ВК*)	159	159
КО-1 (мм)	275	250	0	0	0	455 (ВК*)
КО-2 (мм)	468 (ВК*)	185	385	338	364	0

* ВК – верхний концевик.

Градуировка автоматического и промежуточного регуляторов проводилась по периоду разгона реактора. Градуировка компенсирующих органов и МАЗ осуществлялась по обратному умножению. Значения "нулевого" счета пусковых каналов определялись на основании измеренной по разгону реактора дифференциальной эффективности ПР:

$$\frac{dk}{dx} = 0,38 \cdot 10^{-2} \beta / \text{мм},$$

где эффективная доля запаздывающих нейтронов β равна 0,002165. Рабочие значения скорости "нулевого" счета ПК-1 в позиции 2 и ПК-2 в позиции 3 при почти взведенном компенсаторе КО-2 приняты равными:

$$N_0^{(1)} = 0,1485c^{-1} \quad (\text{КО-1}=0, \text{КО-2}=338, \text{ПР}=130-230 \text{ мм}),$$

$$N_0^{(2)} = 0,9018c^{-1} \quad (\text{КО-1}=0, \text{КО-2}=338, \text{ПР}=130-230 \text{ мм}).$$

При опущенном компенсаторе КО-2 скорость "нулевого" счета ПК-2 увеличивается до $N_0^{(2)} = 1,017c^{-1}$ (КО-2 = 0). Скорость "нулевого" счета ПК-1 зависит практически только от положения блоков МАЗ.

Ордена Ленина
 Академии наук СССР
 АН ЦО АЭ

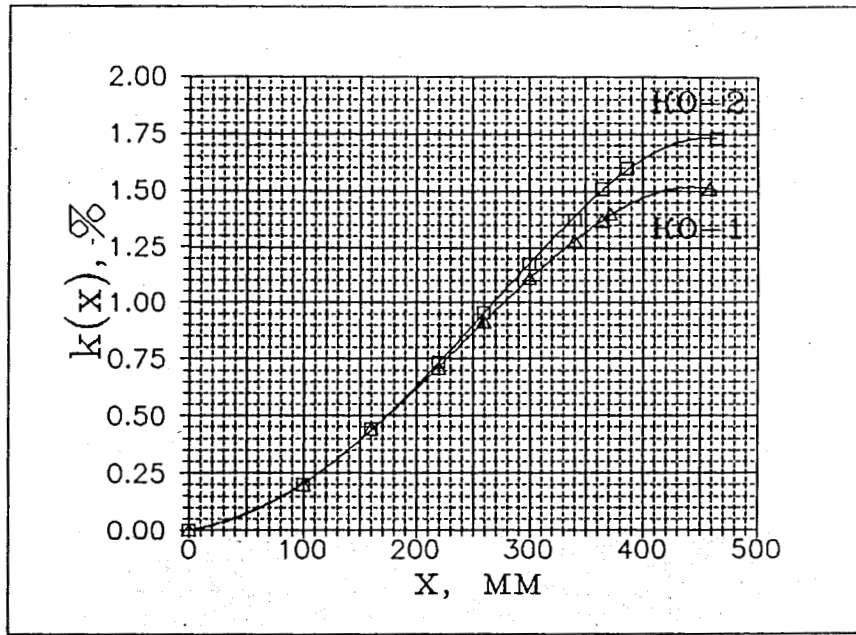


Рис.2. Градуировочные кривые эффективности компенсаторов реактивности ИБР-2.
 КО-2 внизу, ПР сверху: $\Delta k_{\text{КО-1}} = 1,51\%$, $dk/dx = 2,35 \pm 0,10 \cdot 10^{-2} \beta/\text{мм}$.
 КО-1 внизу, ПР сверху: $\Delta k_{\text{КО-2}} = 1,73\%$, $dk/dx = 2,60 \pm 0,10 \cdot 10^{-2} \beta/\text{мм}$.
 Кривые эффективности удовлетворительно описываются аналитическими зависимостями:
 $\Delta k_{\text{КО-1}}(x) = 1,51 \cdot \sin^2 \frac{\pi x}{2 \cdot 455}$, $\Delta k_{\text{КО-2}}(x) = 1,73 \cdot \sin^2 \frac{\pi x}{2 \cdot 485}$

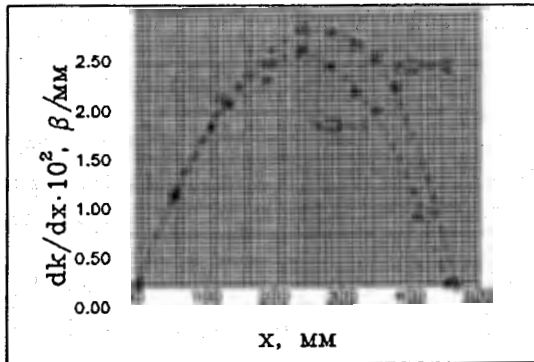


Рис.2а. Дифференциальная эффективность компенсаторов реактивности КО-1 и КО-2.

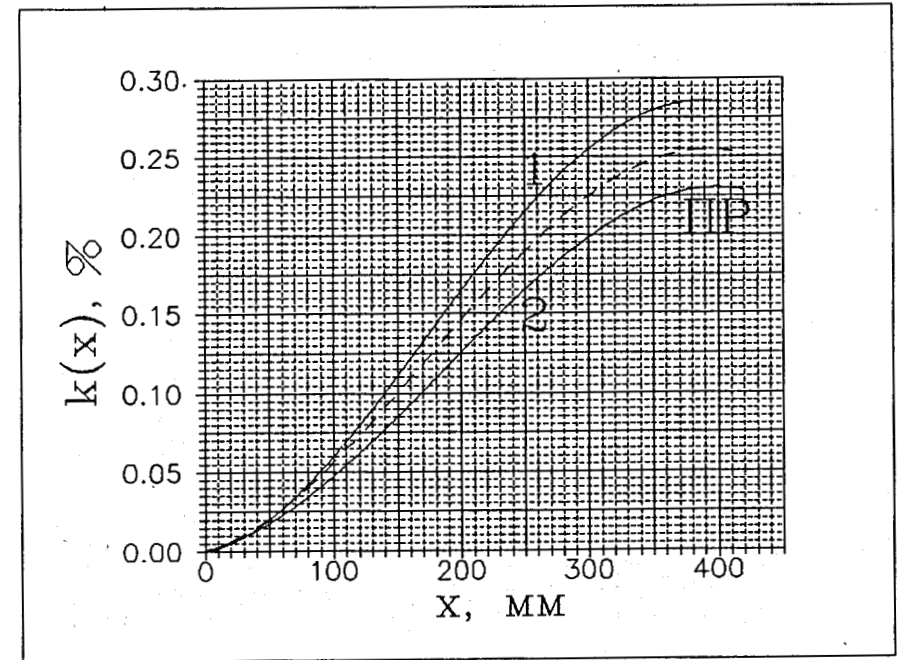


Рис.3. Градуировочная кривая эффективности промежуточного регулятора после перегрузки активной зоны:
 1 - эффективность ПР при полностью введенном компенсаторе реактивности КО-1 = 455 мм, $dk/dx = 0,47 \cdot 10^{-2} \beta/\text{мм}$,
 2 - эффективность ПР при полностью выведенном компенсаторе КО-1 = 0, $dk/dx = 0,38 \cdot 10^{-2} \beta/\text{мм}$.
 В обоих случаях КО-2 = 0. Пунктирная линия - градуировочная кривая ПР в начале кампании (1980 г.) при промежуточном положении КО-1.

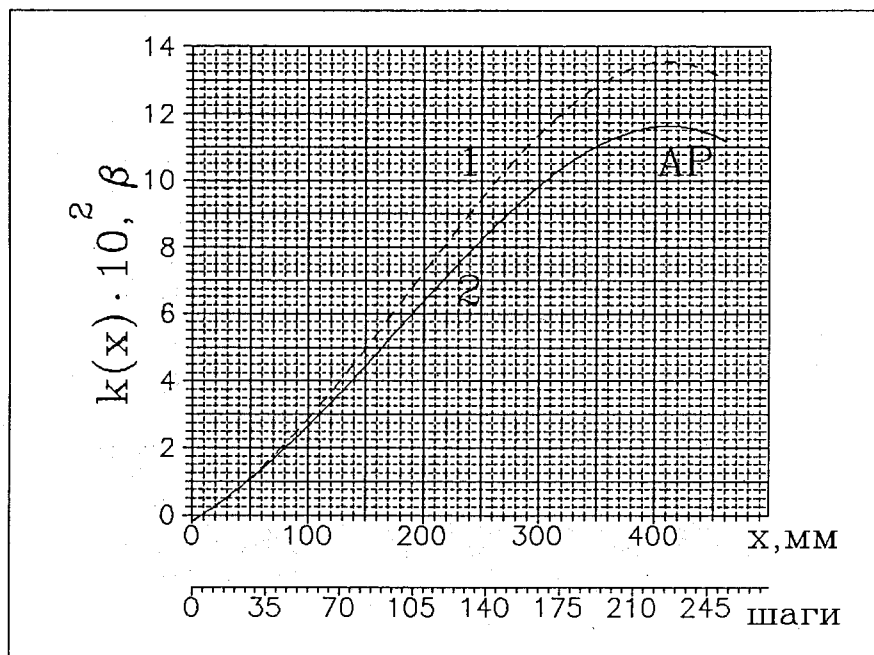


Рис. 4. Градуировочная кривая эффективности автоматического регулятора.
 1 – 1980 г.
 2 – после перегрузки 1993 г., $dk/dx = (0,038 \pm 0,004) \cdot 10^{-2} \beta/\text{мм}$.

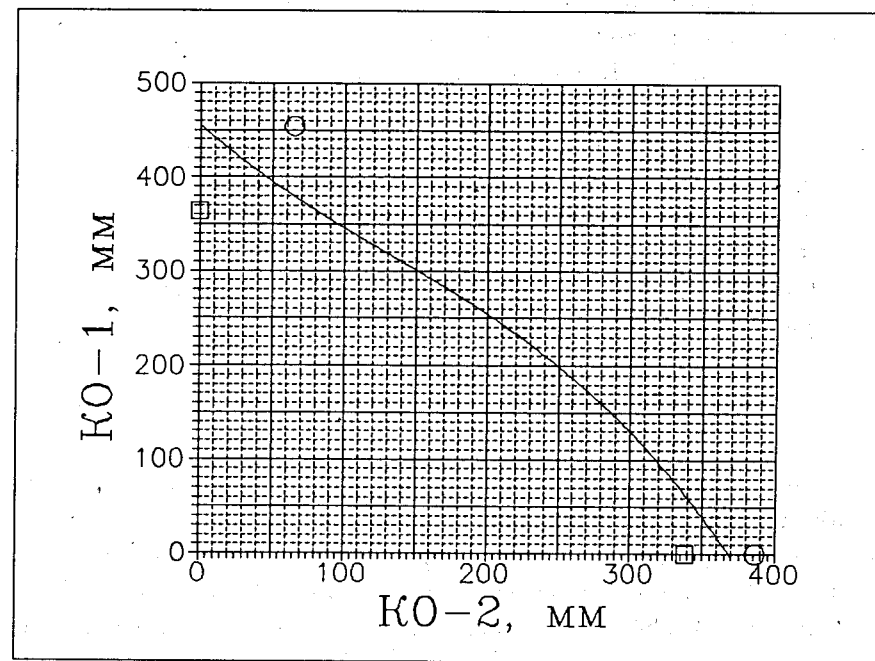


Рис. 5. Критические положения компенсирующих органов; блок промежуточного регулятора введен на 159 мм.
 ○ – граничные точки критических положений КО при выведенном ПР: (64;455) и (385;0).
 □ – то же при введенном ПР: (0;363) и (338;0).

Градуировочные кривые органов СУЗ приведены на рис.2-4. На рис.2а представлена дифференциальная эффективность компенсаторов реактивности КО-1,2. Кривая положений компенсирующих органов, при которых реактор находится в критическом состоянии (ПР введен на 159 мм), представлена на рис.5. В табл.2-4 приведены измеренные значения полной эффективности стержней КО и ПР, которые сравниваются с расчетными значениями, вычисленными с учетом взаимной интерференции стержней.

Зависимость эффективности k_i стержня i от положения остальных стержней СУЗ j можно представить в виде

$$k_i(x_i) = k_i^0(x_i) \left\{ 1 + \sum_{j \neq i} \gamma_{ij} k_j^0(x_j) \right\},$$

предполагая, что влияние стержня j на эффективность стержня i пропорционально эффективности стержня j с коэффициентом пропорциональности γ_{ij} . В этой формуле $k_i^0(x_i)$ — эффективность стержня i , введенного на x_i мм, при опущенных остальных стержнях СУЗ ($x_j = 0$). Поскольку общий эффект реактивности не зависит от порядка введения стержней в активную зону, матрица γ_{ij} , очевидно, должна быть симметричной: $\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$. Диагональные элементы матрицы равны нулю: стержень не интерферирует сам с собой.

Интерференционные эффекты исследовались лишь для блоков КО и ПР (интерференция блоков МАЗ не представляет практического интереса и поэтому не изучалась). Полагая, что индексы 1 и 2 относятся соответственно к КО-1 и КО-2, а индекс 3 — к стержню ПР, можно, в частности, записать формулу для расчета эффективности блока КО-1:

$$k_1(x_1) = k_1^0(x_1) \left\{ 1 + \gamma_{12} k_2^0(x_2) + \gamma_{13} k_3^0(x_3) \right\}.$$

На основании измеренных значений эффективности одного блока СУЗ при разных положениях других блоков получены следующие экспериментальные оценки коэффициентов γ_{ij} :

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &= \gamma_{21} = 3 \pm 3, \\ \gamma_{23} &= \gamma_{32} = 3 \pm 3, \\ \gamma_{13} &= \gamma_{31} = 15 \pm 6. \end{aligned}$$

Таблица 2. Полная эффективность КО-1 (k_1) в зависимости от положений КО-2 и ПР

Положение (мм)		k_1 (%)	Эксперим. значения
КО-2	ПР		
0	0	1,446	1,44*
0	416	1,511	1,51
468	416	1,660	1,65**
225	200	1,550	1,60*

*) По данным измерений 06.02.1981 г. без воды в замедлителях, которые очень близки к результатам последних измерений с заполненными замедлителями.

***) Измерения 31.10.80.

Таблица 3. Полная эффективность КО-2 (k_2) в зависимости от положений КО-1 и ПР

Положение (мм)		k_2 (%)	Эксперим. значения
КО-1	ПР		
0	0	1,709	—
0	416	1,727	1,73
455	416	1,876	1,84*
225	200	1,790	1,76*

*) По данным измерений эффективности КО-2 в 1980 г.

Таблица 4. Полная эффективность ПР (k_3) в зависимости от положений КО-1 и КО-2

Положение (мм)		k_3 (%)	Эксперим. значения
КО-1	КО-2		
0	0	0,215	—
0	338	0,233	0,230
455	0	0,280	0,285
455	468	0,299	—
455	292	0,292	0,268*
287	468	0,279	0,253*

*) Измерения 13.11.80 г. (ошибка измерений 5%).

В табл.2-4 теоретические значения полной эффективности блоков КО и ПР рассчитаны при максимальной оценке γ_{ij} :

$$\gamma_{12} = 6, \gamma_{23} = 6, \gamma_{13} = 21.$$

При этом в качестве базовых приняты следующие значения эффективностей стержней:

$k_1^0 = 1,446 \cdot 10^{-2}$ – эффективность КО-1 при опущенных КО-2 и ПР,

$k_2^0 = 1,709 \cdot 10^{-2}$ – эффективность КО-2 при опущенных КО-1 и ПР,

$k_3^0 = 0,215 \cdot 10^{-3}$ – эффективность ПР при опущенных КО-1 и КО-2.

В наибольшей степени интерференция стержней СУЗ проявляется между блоками КО-1 и ПР, которые расположены рядом, и может достигать 40%. Интерференцией между КО-1 и КО-2, а также между КО-2 и ПР, скорее всего, можно пренебречь. Выбранные выше максимальные значения коэффициентов γ_{12} и γ_{23} приводят, как правило, к завышенным расчетным оценкам эффективности, особенно в случае ПР (в последних двух строках табл.4 расхождение достигает 10% при $\gamma_{23} = 6$ и сводится практически к нулю при $\gamma_{23} = 0$).

В заключение следует сказать, что с практической точки зрения интерференционные эффекты следует принимать во внимание только для промежуточного регулятора, имея в виду, что эффективность ПР практически может меняться в пределах $0,23 \div 0,28\%$ в зависимости от положения блоков КО (по существу КО-1).

Из приведенных данных следует, что за 10 лет эксплуатации реактора на мощности эффективность органов СУЗ практически не изменилась. Сменный персонал реактора может пользоваться старыми градуировочными кривыми, полученными при энергетическом пуске реактора. Исключение составляет стержень автоматического регулирования, эффективность которого оказалась почти на 20% ниже значения, измеренного в начале кампании.

Из сравнения положений компенсирующих органов при выходе на запаздывающую критичность до и после перегрузки следует, что эффективность от догруженной 74-ой тепловыделяющей сборки:

$$\Delta K_{ТВС-3} = 1,32 \pm 0,04\%.$$

Используя кривые эффективностей органов регулирования, с учетом их интерференции можно построить схему баланса реактивности

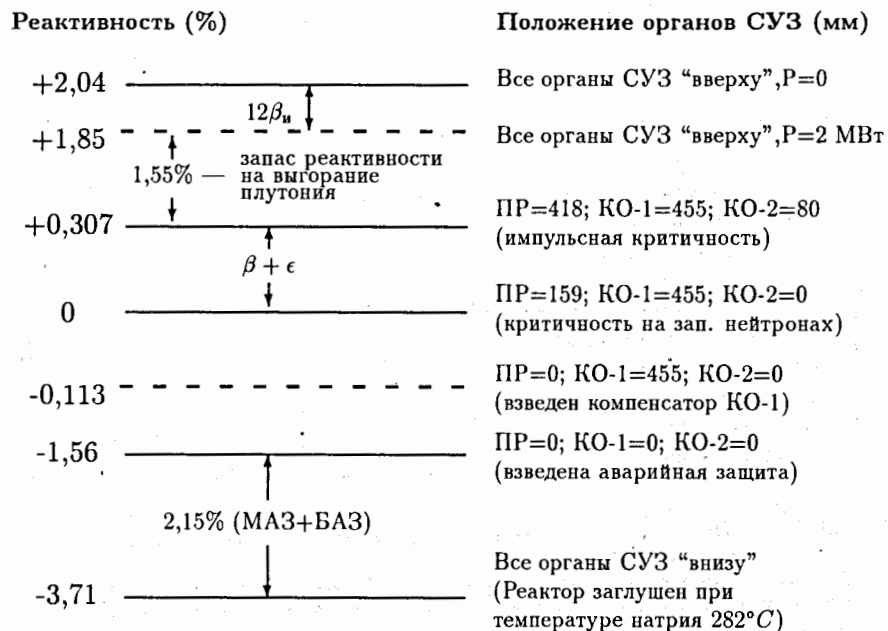


Рис.6 Реактивность догруженной активной зоны ИБР-2 в зависимости от положения органов СУЗ при нулевой мощности и температуре натрия 282°C. Баланс реактивности подсчитан с учетом интерференции органов СУЗ. Мощностной эффект принят равным величине $-12\beta_n = 0,19\%$, реализуемой через 5 – 7 суток после выхода на мощность 2 МВт [1].

догруженной активной зоны на 1.01.1994 г. (рис.6). Перегрузка активной зоны ИБР-2 обеспечивает запас реактивности на выгорание плутония, равный 1,55%. Из табл.5 видно, что этого запаса достаточно для эксплуатации реактора на номинальной мощности 2 МВт до конца проектной кампании (май 2003 г.), когда выгорание плутония составит 4000 МВт·сут. Флюенсы нейтронов рассчитаны по данным о плотности нейтронного потока, которые приведены в табл.6 для наиболее важных точек реактора.

Таблица 5.

Ресурсные характеристики активной зоны ИБР-2 после перегрузки

Характеристика	На 01.01.94	К концу проектной кампании (май 2003 г.)
Выгорание плутония	2050 МВт·сут	4000 МВт·сут
– среднее	2,7 %	5,2 %
– максимальное	4,1 %	7,8 %
Запас реактивности	$1,55 \pm 0,05$ %	$0 \pm 0,05$ %
Флюэнс быстрых н-нов (n/cm^2)		
– в центре зоны	$2,05 \cdot 10^{22}$	$4,0 \cdot 10^{22}$
– на корпусе реактора (максимальный)	$1,17 \cdot 10^{22}$	$2,28 \cdot 10^{22}$
Объемный коэффициент неравномерности энерговыделения	1,53	1,50
Число загруженных ТВС	74	74

Примечание к таблице.

Выгорание плутония за счет деления принято равным $1,1$ г/МВт·сут, что соответствует тепловыделению 192 МэВ/дел.

Коэффициент реактивности по выгоранию топлива $dk/dQ = -8 \cdot 10^{-6}$ к/МВт·сут.

Удельный флюэнс быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) $d\Phi/dQ = 1,0 \cdot 10^{19}$ в центральном канале и $0,57 \cdot 10^{19}$ нейтр/см²·МВт·сут на корпусе реактора в медианном сечении активной зоны.

Таблица 6. Плотность потока нейтронов в реакторе ИБР-2

Область энергий нейтронов	Плотность потока нейтронов (нейтр/см ² ·с)			
	В центральном канале активной зоны	На корпусе в медианном сечении АЗ	На лопасти основного подв. отражателя	В среднем по объему активной зоны
$E > 0$	$2,6 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1,76 \cdot 10^{14}$
$E > 0,1$ МэВ	$2,3 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{14}$	$1,56 \cdot 10^{14}$
$E > 0,8$ МэВ	$1,0 \cdot 10^{14}$	$0,52 \cdot 10^{14}$	$0,35 \cdot 10^{14}$	$0,69 \cdot 10^{14}$
$E < 0,465$ эВ тепловые	—	—	—	$8,0 \cdot 10^9$ $1,1 \cdot 10^9$

Параметры мощностной обратной связи

Программа ежегодных измерений компонент мощностного коэффициента реактивности (МКР) и соответствующих постоянных времени МКР действует с 1988 г. и заключается в измерении функции отклика реактора при периодическом ступенчатом возмущении реактивности с помощью автоматического регулятора.

Функция отклика (реакция на единичный импульс с энергией 1 МДж) в принятой трех-экспоненциальной модели обратной связи реактора ИБР-2 имеет вид

$$W(t) = \sum_1^3 \gamma_i e^{-\lambda_i t} \lambda_i$$

где γ_i – мощностные коэффициенты, λ_i – постоянные времени обратной связи.

Асимптотическое значение мощностного коэффициента реактивности

$$dk/dp = \sum_1^3 \gamma_i$$

Зарегистрированная в предыдущие годы тенденция к изменению компонент МКР и его асимптотического значения, которая объяснялась раньше изменением свойств реактора в процессе выгорания топлива в действительности является следствием сильной зависимости характеристик МКР от уровня мощности, т.е. от температуры топливных элементов, конструктивных узлов реактора [2]. При измерении МКР в течение одного периода колебания стержня АР мощность меняется на несколько процентов, при этом колебания температуры твэлов достигают нескольких десятков градусов. Наличие нелинейности в обратной связи приводит к несимметричной временной зависимости мощности относительно среднего уровня, что существенно усложняет дальнейшую обработку экспериментальных данных. В первом приближении учет зависимости обратной связи ИБР-2 от температуры изменяет представление о поведении асимптотического значения мощностного коэффициента со временем: его уменьшение скорее всего не происходит, как считалось ранее.

Таблица 7. Параметры мощностной обратной связи реактора ИБР-2 на мощности 2 МВт.

До перегрузки			После перегрузки	
i	$\gamma_i, \beta_n/\text{МВт}$	$1/\lambda_i, \text{сек}$	$\gamma_i, \beta_n/\text{МВт}$	$1/\lambda_i, \text{сек}$
1	-9	10.8	-8.3	13.2
2	1.43	1.9	1	1.5
3	-0.44	0.25	-0.45	0.2
$\sum_1^3 \gamma_i = -8 \beta_n/\text{МВт}$			$\sum_1^3 \gamma_i = -7.75 \beta_n/\text{МВт}$	

В табл.7 представлены параметры мощностной обратной связи реактора ИБР-2, измеренные после перегрузки активной зоны и непосредственно перед перегрузкой на номинальной мощности. Видно, что замена имитатора в ячейке №3 тепловыделяющей сборкой не привела к существенным изменениям динамических характеристик МКР (в пределах ошибки измерений асимптотические значения мощностного коэффициента до и после перегрузки совпадают). На рис.7 приведены функции отклика реактора до и после перегрузки активной зоны.

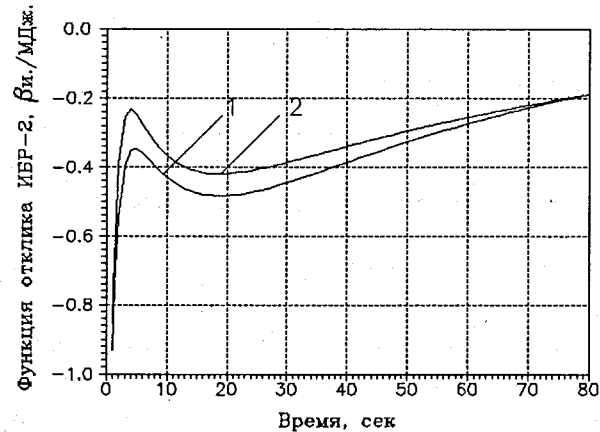


Рис.7 Импульсная характеристика обратной связи в реакторе ИБР-2.
1 — до перегрузки активной зоны в 1993 г., уровень средней мощности 2020 кВт.
2 — после перегрузки, уровень средней мощности 1950 кВт.

Литература

- [1] В.Д.Анапьев и др. — ОИЯИ, Р13-85-339, Дубна, 1985.
[2] В.Л.Камионский — ОИЯИ, Р13-93-95, Дубна, 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июня 1994 года.