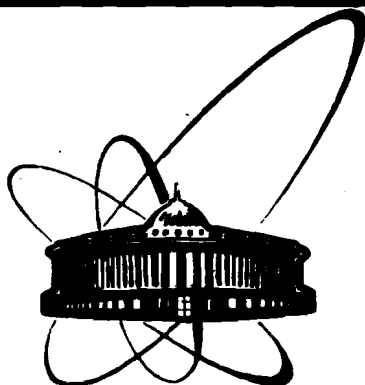


89-612



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

A 64

P3-89-612

В.Д.Ананьев, М.А.Киселев, В.К.Красных

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТА РЕАКТИВНОСТИ,  
СВЯЗАННОГО С ВЫГОРАНИЕМ ТОПЛИВА  
РЕАКТОРА ИБР-2

1989

Основными причинами медленного изменения реактивности реактора ИБР-2 при работе на мощности являются:

1. Выгорание топлива —  $^{239}\text{Pu}$  (уменьшается реактивность).
2. Изменение положения стационарного отражателя относительно активной зоны за счет температурной деформации (при нагреве стационарного отражателя реактивность увеличивается).
3. Медленное увеличение температуры защиты реактора из-за радиационного нагрева (при нагреве защиты реактивность уменьшается).

В настоящей работе приведены результаты изменения реактивности, связанной с выгоранием топлива, с момента установки нового подвижного отражателя ПО-2 (сентябрь 1987).

Изменение реактивности, связанное с выгоранием топлива, было проанализировано в 1985 году<sup>1/1</sup>, при работе реактора с первым подвижным отражателем ПО-1. Было установлено, что отрицательная компонента реактивности, связанная с выгоранием, полностью компенсируется положительной компонентой, связанной с уплотнением топлива. Уплотнение топлива не может длиться сколь угодно долго. Оно может быть либо циклическим, либо должно вырождаться.

Учет выгорания топлива сделан двумя способами. По сравнению уровней импульсной критичности при выводе реактора на мощность в начале цикла ("холодный реактор") и по сравнению уровней установившейся реактивности реактора на мощности 2 МВт в конце цикла ("горячий реактор").

Расчет импульсной критичности реактора при выходе на мощность производился по параметрам реактора, фиксируемым оператором в момент устойчивого наблюдения периода разгона, по формуле:

$$\begin{aligned} R_{кр} = & R_{кo1}(X_{кo1}) - R_{кo1}(280) + R_{кo2}(X_{кo2}) - R_{кo2}(200) + \\ & + R_{пр}(X_{пр}) - R_{пр}(200) + R_{ap}(X_{ap}) - R_{ap}(200) + \\ & + K_t(278 - T_{вх}) + K_g(96 - G_{mv}^2). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь:  $R_{кр}$  — импульсная критичность реактора, отсчитанная относительно импульсной критичности при энергопуске (12.05.82);  $R_i(X_i)$  —

эффективность  $i$  органа регулирования при его высоте подъема на  $X_i$  миллиметра (в качестве единицы измерения реактивности взята  $0,01 \cdot \beta_{эфф}$ ,  $\beta_{эфф} = 2,165 \cdot 10^{-3}$ );  $K_t$  — температурный коэффициент реактивности, равный  $0,01 \cdot \beta_{эфф}/град$ ;  $T_{вх}$  — температура Na на входе в аппарат;  $K_g$  — гидродинамический коэффициент реактивности теплоносителя, равный  $0,14 \cdot 10^{-2} \cdot \beta_{эфф}/мВ^2$ ;  $G$  — расход Na через активную зону в мВ, приведенный к калибровке расходомеров, существовавшей во время измерения гидродинамического эффекта:

$$G = (2,586 + 11,169 G_a)/10,4 + (0,181 + 9,904 G_b)/10 \quad (2)$$

$G_a$  и  $G_b$  — показания расходомеров Na в мВ по петлям А и В первого контура.

Если за начало отсчета импульсной критичности взять импульсную критичность 20.10.87. — начало работы на физэксперимент с ПО-2, то результаты будут следующие:

Таблица 1

Цикл	871	872	873	881	882	883	884	885	886	887
$\Delta R$	0	8,5	28,4	34,8	60,4	50,6	58,8	62,4	68,6	75,1
МВт· часы	0	392	1152	1986	2450	2920	3434	3964	4482	5000
Цикл	888	889	8810	891	892	893	894	895	896	897
$\Delta R$	51,1	77,8	86,0	98,6	104	108	112	132	137	
МВт· часы	5634	6066	6486	6944	7466	7962	8430	8932	9502	

Здесь циклы обозначены индексами, в которых первые две цифры обозначают календарный год, а последняя — текущий номер цикла работы реактора на мощности 2 МВт за этот год. Во второй строке табл. 1 приведено изменение импульсной критичности в единицах  $0,01 \cdot \beta_{эфф}$  (первая точка принята за начало отсчета), в третьей строке — наработанная реактором к моменту выхода на критичность тепловая энергия  $E$  в МВт·час.

Изменение критичности аппроксимировалось линейной функцией

$$\Delta R = A + (dR/dE) \cdot E \quad (3)$$

и обрабатывалось методом наименьших квадратов. В качестве точности измерения импульсной критичности принята оценка в  $0,1 \cdot \beta_{эфф}$ .

Для того, чтобы изменение импульсной критичности можно было трактовать как величину, связанную с выгоранием топлива, необходимо, чтобы все измерения находились в одинаковых условиях относительно факторов, влияющих на реактивность. К таким факторам относится температура бетонной защиты реактора, точнее, связанная с температурой миграция воды в бетонной защите. В этом плане критичность реактора после остановки на 2-3 месяца и критичность реактора после остановки на 2 недели неидентичны, из-за различий в радиационном нагреве защиты. По этим соображениям из аппроксимации удален цикл 888. Циклу 871 предшествовали эксперименты при работе реактора в режиме критической сборки, и из-за соображений идентичности условий он также удален из аппроксимации.

При этих условиях можно считать, что

$$d\rho/dE = -dR_{кр}/dE \quad (4)$$

Здесь  $d\rho/dE$  — интересующее нас изменение реактивности, связанное с выгоранием топлива. Кривая аппроксимации по формуле (3) представлена на рис. 1. Результаты:

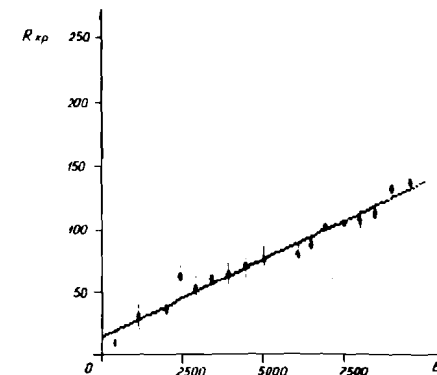
$$d\rho/dE = -3 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4} \beta_{эфф}/\text{МВт} \cdot \text{сутки}.$$

$$A = 0,13 \pm 5 \cdot 10^{-2} \beta_{эфф}.$$

Уменьшение запаса реактивности реактора составило  $1,24 \pm 0,15 \beta_{эфф}$ .

Полученное значение  $A$  следует интерпретировать как погреш-

Рис. 1. "Холодный реактор". Зависимость импульсной критичности реактора  $R_{кр}$  от наработанной энергии  $E$ ;  $E$  измеряется в МВт·час, единица измерения  $R_{кр}$  равна  $0,01 \cdot \beta_{эфф}$



ность определения уровня импульсной критичности, что согласуется с выбранной ранее оценкой в  $0,1 \cdot \beta_{эфф}$ .

Проверочный расчет был сделан по установившейся в конце цикла реактивности по формуле:

$$R_{уст} = \{R_{к01}(X_{к01}) - R_{к01}(280)\} + \{R_{к02}(X_{к02}) - R_{к02}(200)\} + \\ + \{R_{пр}(X_{пр}) - R_{пр}(200)\} + \{R_{ар}(X_{ар}) - R_{ар}(200)\} + \\ + K_t(278 - T_{вх}) + K_g(96 - G_{mv}^2) + K_w(1930 - W). \quad (5)$$

Здесь  $W$  — мощность реактора в кВт,  $K_w = 0,036 \cdot 10^{-2} \beta_{эфф}/\text{кВт}$  — мощностной эффект реактивности. Предполагается, что  $K_w$  не зависит от выгорания топлива, и не учитывается расходный эффект реактивности. Полученные значения представлены в табл. 2. Погрешность измерения  $R_{уст}$  определялась по экспериментальным точкам.

Изменение  $R_{уст}$  аппроксимировалось линейной функцией

$$\Delta R = R_{871} + (dR_{уст}/dE) \cdot E \quad (6)$$

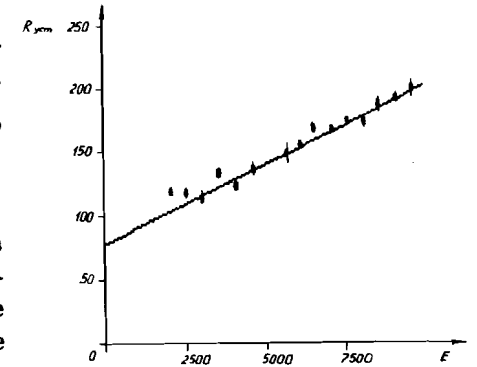
Таблица 2

Цикл	871	872	873	881	882	883	884	885	886	887
$\Delta R_{уст}$	$R_{871}$			118	117	114	133	124	136	
МВт·часы	0	760	1594	2058	2528	3042	3572	4090	4608	5242
Цикл	888	889	8810	891	892	893	894	895	896	897
$\Delta R_{уст}$	149	155	169	168	174	175	187	192	200	
МВт·часы	5674	6094	6552	7074	7570	8088	8540	9110	9636	

Результаты аппроксимации представлены на рис. 2.

Значения  $R_{уст}$  для циклов 871 и 872 пропущены из-за отсутствия данных. Для циклов 887 и 873 значения  $R_{уст}$  пропущены из-за того,

Рис. 2. "Горячий реактор". Зависимость реактивности  $R_{уст}$  при мощности 2 МВт от наработанной энергии  $E$ ;  $E$  измеряется в МВт·час, единица измерения  $R_{кр}$  равна  $0,01 \cdot \beta_{эфф}$ .



что наличие сбросов мощности в конце циклов не позволило реактивности выйти на асимптотическое значение. Так как все приведенные в табл. 2 значения  $R_{уст}$  рассчитаны в одинаковых условиях по отношению к влиянию стационарного отражателя и бетонной защиты реактора, то полагаем, что

$$d\rho/dE = -dR_{уст}/dE. \quad (7)$$

Результаты:  $d\rho/dE = -3 \cdot 10^{-3} \pm 8 \cdot 10^{-5} \beta_{эфф}/\text{МВт} \cdot \text{сутки}$ ,  $R_{871} = 0,78 \pm 0,02 \beta_{эфф}$ . Уменьшение запаса реактивности:  $R_{896} - R_{871} = 1,22 \pm 0,08 \beta_{эфф}$ .

Таким образом, двумя независимыми способами получены совпадающие результаты, представленные в табл. 3.

Таблица 3

	Запас реактивности	"Выгорание"
"Холодный реактор"	$-1,24 \pm 0,15 \beta_{эфф}$	$-3 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4} \beta_{эфф}/\text{МВт} \cdot \text{сутки}$
"Горячий реактор"	$-1,22 \pm 0,08 \beta_{эфф}$	$-3 \cdot 10^{-3} \pm 8 \cdot 10^{-5} \beta_{эфф}/\text{МВт} \cdot \text{сутки}$

Полученные значения изменения реактивности несколько меньше расчетного значения  $-5 \cdot 10^{-3} \beta_{эфф}/\text{МВт} \cdot \text{сутки}$ . Несоответствие расчетного и наблюдаемого значений, а также вопросы динамики изменения реактивности, связанной с выгоранием топлива, требуют более тщательного рассмотрения в будущем.

Авторы выражают благодарность Е.П.Шабалину за внимание к работе, операторам ИБР-2 — за ежечасную запись параметров и точное определение импульсной критичности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. — ОИЯИ, P13-85-339, Дубна, 1985.
2. Шабалин Е.П. — Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.:Атомиздат, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 августа 1989 года.

#### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды II Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987	4 р. 20 к.
Д17-88-95	Труды IV Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1987.	5 р. 20 к.