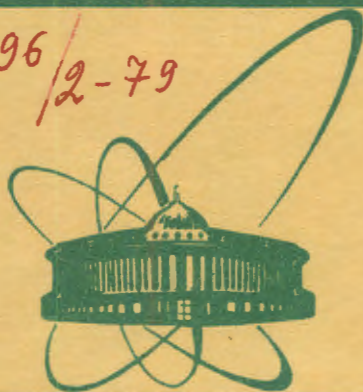


4496/2-79



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

СЗ488

Г-935

5/11-79

P13 - 12483

В.Гудовский, А.Ф.Зацепин, В.Л.Ломидзе,
А.Д.Рогов, В.С.Смирнов, В.К.Титков,
Н.А.Хрястов, Е.П.Шабалин

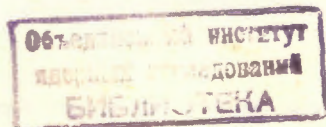
ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2.
ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ
ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

1979

P13 - 12483

В.Гудовский, А.Ф.Зацепин, В.Л.Ломидзе,
А.Д.Рогов, В.С.Смирнов, В.К.Титков,
Н.А.Хрястов, Е.П.Шабалин

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2.
ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ
ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ



Физический пуск реактора ИБР-2. Измерения эффектов реактивности подвижного отражателя

Работа посвящена измерению характеристик и оптимизации модулятора реактивности импульсного исследовательского реактора ИБР-2 во время физического пуска в конце 1977 - начале 1978 г. Эффекты реактивности, которые измерялись в подкритическом состоянии реактора, оказались существенно меньше расчетных значений /например, параметр α равен 10^{-4} 1/град², в то время как расчетное значение $4 \cdot 10^{-4}$ 1/град²/. Установлено, что большое влияние на α оказывает дополнительный подвижный отражатель /ДПО/, наличие которого не учитывалось в расчетах. Найдена оптимальная конфигурация стального ДПО, для которой параметр α равен $3 \cdot 10^{-4}$ 1/град².

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

IBR-2 Reactor Physical Start-Up. Reactivity Effects of the Moving Reflector

The characteristics of the IBR-2 moving reflector were measured and its optimization study has been performed during physical start-up at the end of 1977 and the beginning of 1978. Reactivity effects measured under subcritical conditions appeared to be sufficiently low in comparison with the calculated ones. Particularly, the alpha parameter measured was equal to $10^{-4} k_{\text{eff}}$ per square grade instead of the calculation value of $4 \cdot 10^{-4}$. It was shown that the main factor effecting on α -value was an auxiliary reflector which has not been taken into consideration for α -calculation procedure. The optimum configuration for iron auxiliary reflector was found in these experiments and the α -value was as high as $3 \cdot 10^{-4}$.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОДВИЖНЫХ ОТРАЖАТЕЛЯХ ИБР-2

Подвижные отражатели /ПО/ в реакторе ИБР-2 служат для периодической модуляции реактивности /коэффициента размножения/ и создания тем самым импульсов мощности. Подробное описание конструкции ПО ИБР-2 приводится в работах /1,2/. Напомним вкратце, что основной подвижный отражатель /ОПО/ представляет собой ротор из прочной стали специальной формы /рис. 1/, имеющий выступ-лопасть, которая при вращении ротора проходит мимо активной зоны и создает импульс мощности. Длительность импульса /"полуширина"/ определяется следующим соотношением:

$$\theta_{1/2} = 1,4(\tau/\alpha\omega^2)^{1/3}, \quad /1/$$

где τ - среднее время жизни одного поколения мгновенных нейтронов в реакторе; α - коэффициент параболы, описывающей зависимость реактивности (ϵ) от угла поворота ротора (ϕ) относительно физического центра-ф.ц. /ф.ц. - положение, соответствующее максимуму реактивности/:

$$\epsilon(\phi) = \epsilon_m - \alpha\phi^2, \quad /2/$$

а ω - угловая скорость ротора ОПО.

Коэффициент α зависит от размеров и материала ОПО и, как выяснилось во время физического пуска, также и дополнительного подвижного отражателя /ДПО/. Вторым, дополнительным ротором /рис. 1б/ вращается соосно и синхронно с основным ротором в 10 раз медленнее и служит для снижения частоты пульсации мощности с 50 до 5 Гц. Собственно ДПО является бериллиевый вкладыш, укрепленный в алюминиевом диске. Импульс мощности развивается только при одновременном прохождении обоих отражателей мимо активной зоны. При прохождении одного ОПО развивается очень слабый побочный импульс мощности, амплитуда которого относительно средней мощности равна

$$\frac{W_{\text{max}}}{W_{\text{ср.}}} / \frac{W_{\text{поб.}}}{W_{\text{ср.}}} = \frac{\beta_{\text{эфф.}}}{|\epsilon_{m_0} - \Delta K_{\text{дпо}}(\phi_k)|}, \quad /3/$$

где ϵ_{m_0} - равновесная импульсная надкритичность, значение которой для ИБР-2 $/1-2 \cdot 10^{-3} K_{эфф}^{1/}$, а $\Delta K_{дпо}(\phi_k)$ - изменение реактивности при выводе ДПО из ф.ц. в положение ϕ_k , соответствующее данному побочному импульсу /для частоты 5 Гц побочные импульсы возникают в следующих фазах ДПО относительно ф.ц.: $\phi_k = \pm 36^\circ, \pm 72^\circ, \pm 108^\circ, \pm 144^\circ$ и 180° /. Длительность побочного импульса определяется характером изменения реактивности при вращении ОПО.

Мощность реактора между импульсами /фон/ определяется уровнем подкритичности реактора в фоне:

$$\frac{W_\phi}{W_{ср}} = \frac{\beta_{эфф}}{|\epsilon_{m_0} - \Delta K_{мр}|}, \quad /4/$$

где $\Delta K_{мр}$ - изменение коэффициента размножения при выводе ОПО и ДПО из ф.ц. на большой угол $/ > 40^\circ$ /.

Из вышесказанного ясно, что главными эффектами реактивности ПО, которые должны быть измерены, являются:

а/ a - коэффициент параболы реактивности при движении ОПО вблизи ф.ц.;

б/ $\Delta K_{мр} = \Delta K_{опо} + \Delta K_{дпо}$ - суммарный эффект реактивности при отводе ОПО и ДПО от реактора /полная эффективность модулятора реактивности/;

в/ $\Delta K_{дпо}(\phi_k)$ - эффект реактивности при выводе ДПО на угол ϕ_k , кратный 36° /в дальнейшем, если нет специальных оговорок, под $\Delta K_{дпо}$ понимается вывод ДПО на 36° /;

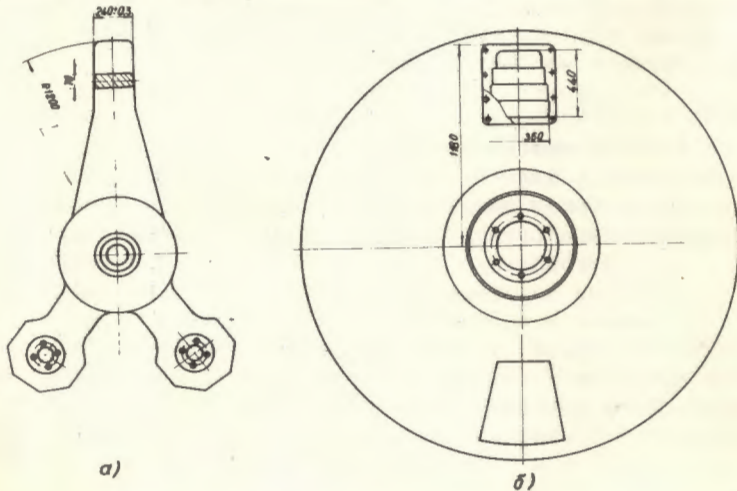


Рис. 1. Чертеж роторов штатных подвижных отражателей ИБР-2; а - ротор основного подвижного отражателя, б - ротор дополнительного подвижного отражателя.

$g/\Delta K_{опо}(\phi)$ - ход реактивности при выводе ОПО из ф.ц. на большой угол /до $+40^\circ$ /, когда ДПО выведено /характеризует форму побочного импульса/.

Помимо главных эффектов, можно выделить дополнительно следующие:

д/ $a_{дпо}$ - коэффициент параболы реактивности ДПО; определяет уровень флуктуаций реактивности при наличии крутильных колебаний ДПО $/з/$;

е/ $(\frac{dK}{dx})_{опо}$ и $(\frac{dK}{dx})_{дпо}$ - изменение реактивности при смещении

роторов ОПО и ДПО, соответственно, вдоль оси на единицу длины, характеризует флуктуации реактивности из-за осевых колебаний роторов.

ж/ y_{max} - наибольшая скорость изменения реактивности при вращении ОПО; используется при оценке максимальной аварии.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ "ПО"

Все измерения, связанные с ПО, проводились в подкритическом реакторе с невращающимися ОПО и ДПО. Медленное перемещение роторов осуществлялось специальными механизмами; скорость вращения ротора ОПО была $\sim 0,028^\circ/с$, а ротора ДПО $\sim 0,04^\circ/с$. Контроль положения ротора ОПО осуществлялся датчиком угла поворота, укрепленным на валу ротора, с цифровой индикацией на пульте управления. Погрешность определения угла поворота не превышала $0,07^\circ$. Положение диска ДПО контролировалось специальной системой, включающей рельефную решетку на диске и емкостной датчик, в интервале углов $/+6^\circ, -40^\circ$ / относительно геометрического центра /г.ц./ ДПО - положения, соответствующего сдвигу ДПО на -26° от вертикали /здесь и далее за положительное направление принято вращение по часовой стрелке, если смотреть со стороны привода ПО/. Погрешность определения угла поворота диска ДПО $\sim 1^\circ$.

Эффекты реактивности определяли методом обратного умножения по скорости счета нейтронных детекторов - камер деления с $[^{235}U]$ /поз- 1 и 12 на рис. 2/. Изменение реактивности (ΔK) от смещения ПО из одного положения в другое есть:

$$\Delta K = N_0(1/N_2 - 1/N_1),$$

где N_1 и N_2 - скорость счета детектора в первом и втором положениях ПО, N_0 - "нулевой счет", определяемый для каждого

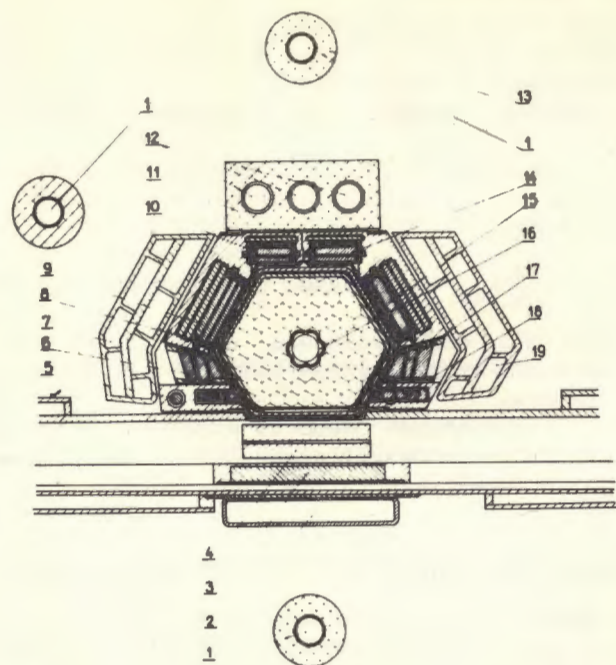


Рис. 2. Реактор ИБР-2, поперечное сечение активной зоны и отражателей: 1 - штатные камеры деления; 2 - замедлитель за подвижным отражателем; 3 - бериллиевый вкладыш /ДПО/; 4 - ОПО; 5, 6, 9, 10, 14, 15, 17, 18 - блоки управления и защиты; 7, 19 - основные замедлители; 8 - активная зона; 11 - блок из оргстекла - имитатор холодного замедлителя; 12 - экспериментальные детекторы нейтронов; 13 - блок из оргстекла; 16 - камера деления на быстрых нейтронах.

детектора путем измерения скорости счета в двух положениях блока регулирования с известной эффективностью. Градуировка блока регулирования производилась методом разгона с помощью аналогового реактиметра. Значение ΔK усреднялось по трем измерительным каналам. Погрешность ΔK складывается из систематической погрешности градуировки реактивности $\pm 5\%$ и погрешности измерения скорости счета, составляющей $1 \pm 2\%$. Следует отметить, что измеренные по отдельным каналам эффекты никогда не отличались друг от друга больше, чем на 5%. В конечные значения погрешности эффектов реактивности, которые приводятся в следующих разделах, систематическая погрешность не включена.

Уровень подкритичности во время измерений выбирался в соответствии с величиной измеряемого эффекта; наибольшее умножение составляло 2000. При изменении состояния реактора перед началом счета давалась выдержка не менее 3 мин, до установления постоянного уровня мощности.

3. ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ ШТАТНОГО ВАРИАНТА "ПО"

Эффекты реактивности ПО были измерены для двух вариантов загрузки активной зоны кассетами. В варианте "С" /"центральная загрузка" / в зону было загружено 70 кассет, 8 свободных ячеек были оставлены на периферии активной зоны со стороны блоков регулирования. Вариант "Р" - периферийная загрузка; в зоне было 74 кассеты, причем свободными были 4 ячейки в центре зоны, у канала мишени. Главные результаты приведены в табл. 1 и 2 и на рис. 3, 4. Анализируя данные таблиц и графиков, следует отметить следующее:

а/ эффективность основного /дополнительного/ отражателя сильно зависит от положения дополнительного /основного/ отражателя; причина этого - в "затенении" ДПО основным отражателем. Особенно сильно влияние теневого эффекта на величину α , которая оказалась в $3 \div 4$ раза меньше ее расчетного значения $3 \div 4 \cdot 10^{-4}$ град $^{-2}$ /, полученного без учета влияния ДПО.

б/ Эффекты реактивности ПО в "С" зоне больше, чем в "Р" -зоне. Это объясняется тем, что эффективный физический центр активной зоны для этой загрузки был ближе к ПО, чем в Р-варианте загрузки. Однако основным был выбран именно Р-вариант, который обеспечивает более высокую эффективность органов регулирования.

Из других результатов измерений следует отметить следующие:

в/ Параболический ход реактивности при смещении ОПО сохраняется в пределах $\pm 3^\circ - 4^\circ$ от ф.ц. /см. рис. 3/.

г/ Вывод ОПО или ДПО далее, чем на 36° , практически уже не приводит к изменению реактивности /см. рис. 4 и 9/.

д/ Наблюдаются всплески реактивности при прохождении противовесов ОПО около зоны; амплитуда изменения реактивности составляет $0,6 \cdot 10^{-2}$ абс. ед. реактивности /этот результат получен в импульсном режиме работы реактора/.

е/ Ход реактивности при смещении ОПО несимметричен относительно ф.ц. /см. рис. 4/ - при выводе по часовой стрелке реактивность падает быстрее. Наибольшая скорость изменения реактивности в линейной части /в пересчете на номинальную скорость вращения 3000 об/мин/ $\gamma_{\max} = 20 K_{эфф}/C$, что в 2 раза ниже принимавшейся в проекте.

Таблица 1
Эффекты реактивности штатных ПО для зоны центральной загрузки

Параметр Состояние	$\Delta K_{\text{опо}} \cdot 10^2$		$\alpha \cdot 10^4$		$\Delta K_{\text{дпо}} \cdot 10^2$		$\alpha_{\text{дпо}} \cdot 10^4$		Погрешность %	
	абс. ед.	реакт.	град ⁻²		-		-		ΔK	α
ДПО ф.ц.	2,04	-	1,4	-	-	-	-	-	2	10
ДПО вывед.	2,41	-	-	-	-	-	-	-	1	-
ОПО ф.ц.	-	-	-	0,45	-	-	-	-	2	-
ОПО вывед.	-	-	-	0,82	0,4	-	-	-	2	12

Примечание: Суммарный эффект вывода ОПО и ДПО на 36° - $/2,86 \pm 0,03/ \cdot 10^{-2}$; расчетное значение - $/3,2 \pm 0,3/ \cdot 10^{-2}$.

Таблица 2
Эффекты реактивности штатных ПО для зоны периферийной загрузки

Параметр Состояние	$\Delta K_{\text{опо}} \cdot 10^2$		$\alpha \cdot 10^4$		$\Delta K_{\text{дпо}} \cdot 10^2$		$\alpha_{\text{дпо}} \cdot 10^4$		Погрешность %	
	абс. ед.	реакт.	град ⁻²		-		-		ΔK	α
ДПО ф.ц.	1,76	-	1,01	-	-	-	-	-	3	1
ДПО выведен на 12°	-	-	1,44	-	-	-	-	-	-	1
ДПО выведен на 36°	2,09	-	1,6	-	-	-	-	-	2	1
ОПО ф.ц.	-	-	-	0,39	0,1	-	-	-	2	20
ОПО выведен	-	-	-	0,72	-	-	-	-	2	-

ж/ Положение ф.ц. ДПО не совпадает с ф.ц. ОПО - ф.ц. ДПО сдвинут на $5 \div 6^\circ$ по часовой стрелке. По-видимому, это частично является причиной несимметричного хода кривой эффективности ОПО. Причину же сдвига ф.ц. ДПО понять не удалось. Интересно, что ф.ц. ОПО сдвигался в пределах -1° при изменении положения ДПО на значительный угол.

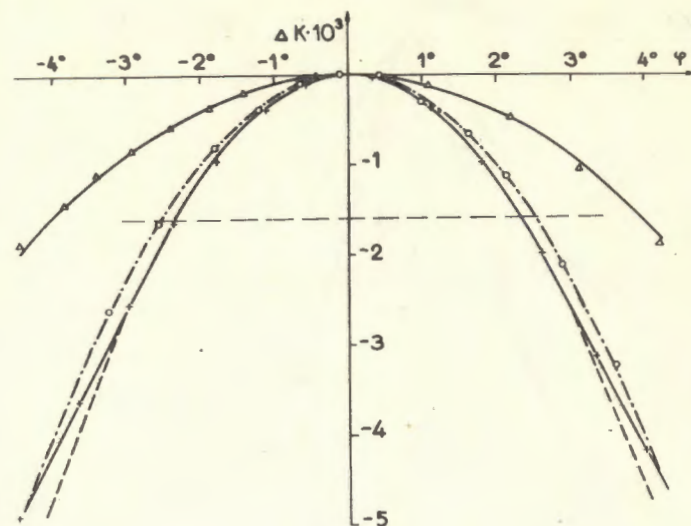


Рис. 3. Зависимость реактивности от угла поворота ротора ОПО в области малых углов. Δ - при наличии штатного ДПО, сплошная линия - парабола с $\alpha = 10^{-4}$ град⁻², o - при отсутствии диска ДПО /ЭПОС/, штрих-пунктирная линия - парабола с $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-4}$ град⁻², x - с ДПО в виде "треуголка" 300/175/150, пунктирная линия - парабола с $\alpha = 2,9 \cdot 10^{-4}$ град⁻², сплошная линия - аппроксимация экспериментальных точек.

з/ Величина dK/dx при отодвигании подвижных отражателей /вместе с приводом, основанием и кожухом/ от активной зоны в радиальном направлении составила $/9,0 \pm 0,3/ \cdot 10^{-4}$ 1/мм; перемещение на 7 мм приводит к эффекту $0,53 \cdot 10^{-2}$ абс. ед. реактивности.

и/ Замечен аномально большой эффект реактивности при удалении ПО и всей машины ПО от реактора - около 6% $K_{\text{эфф}}$, в то время как суммарный эффект удаления ОПО и ДПО составляет около 4% $K_{\text{эфф}}$.

Из экспериментов и расчетов, проведенных позднее, можно заключить, что дополнительный эффект реактивности связан с кожухом подвижных отражателей и диском ДПО.

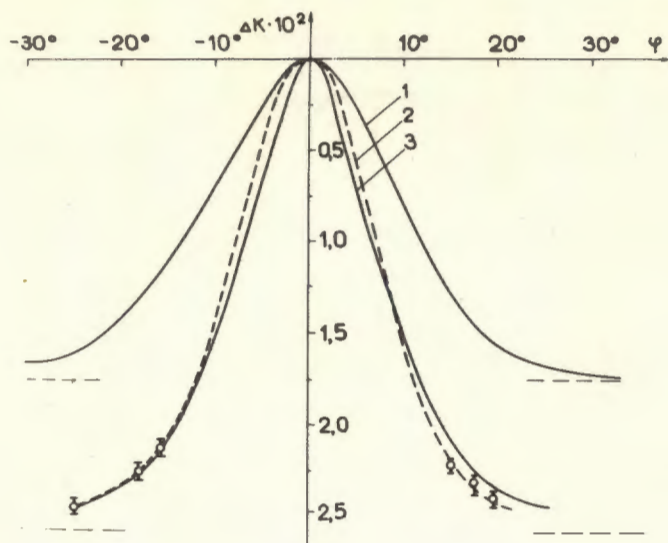


Рис. 4. Зависимость реактивности от угла поворота ротора ОПО. 1 - со штатным ДПО; 2 - без ДПО /ЭПОС/; 3 - в измерениях на стенде БФС [2].

4. ОПИСАНИЕ СТЕНДА ЭПОС И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Чрезвычайно малое значение коэффициента параболы реактивности ОПО (α) /и большое значение среднего времени жизни нейтронов (τ) / привели к увеличению длительности вспышки реактора более чем в 2 раза. Для проверки гипотезы влияния ДПО на α и выбора оптимальной конфигурации ДПО были проведены дополнительные эксперименты. Штатный подвижный отражатель был заменен на экспериментальный образец его - ЭПОС /"экспериментальный подвижный отражатель стальной"/ /рис. 5/. Ротор ОПО /поз 1/ являлся копией штатного ротора и был расположен относительно активной зоны /2/ так же, как штатный ротор. Ротор ДПО /6/ - стальной /рис. 6/, с одной лопастью толщиной 45 мм и шириной $240 \div 340$ мм. Ротор ДПО был установлен на подшипниках соосно с основным ротором; подшипниковые опоры обоих роторов были закреплены на стальной ферме /3/, которая, в свою очередь, закреплялась на штатной тележке привода ПО /5/. ЭПОС был снабжен приводом медленного вращения /4/, который мог быть подключен к одному из роторов,

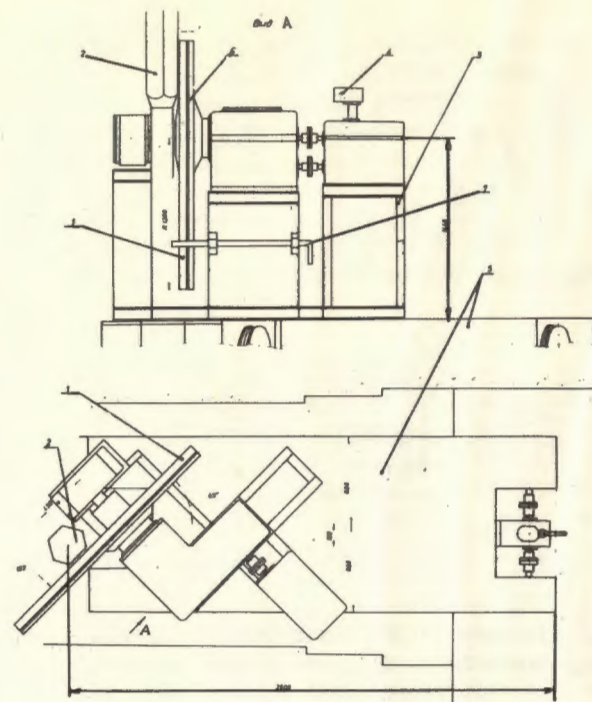


Рис. 5. Экспериментальный стенд ЭПОС. 1 - ротор ОПО; 2 - активная зона; 3 - рама привода; 4 - привод медленного вращения роторов; 5 - тележка для перемещения установки; 6 - ротор ДПО; 7 - ограничительный шкворень.

в то время как другой ротор затормаживался. Скорость вращения ротора ОПО была $2,8^\circ$ /мин, а ротора ДПО - $1,27^\circ$ /мин. Контроль положения ротора ОПО был такой же, как на штатной машине; положение ротора ДПО контролировалось визуально по телевизионной установке и по времени включения привода /погрешность $\sim 1^\circ$ /. Кожух ПО и бетонная защита на тележке привода на ЭПОСе отсутствовали. Методика измерения эффектов реактивности описана выше.

Задачей экспериментов на ЭПОСе было измерение α и $\Delta k_{\text{ДПО}}$ для различных вариантов ДПО, которые создавались применением насадок на противовес /см. рис. 6а-6г/; ротор ДПО подвешивался к зоне противовесом. В варианте 6а исследовался ДПО из алюминия для стыковки результатов измерений ЭПОСа и штатного ПО; измерения α с этим вариантом подвижного отражателя

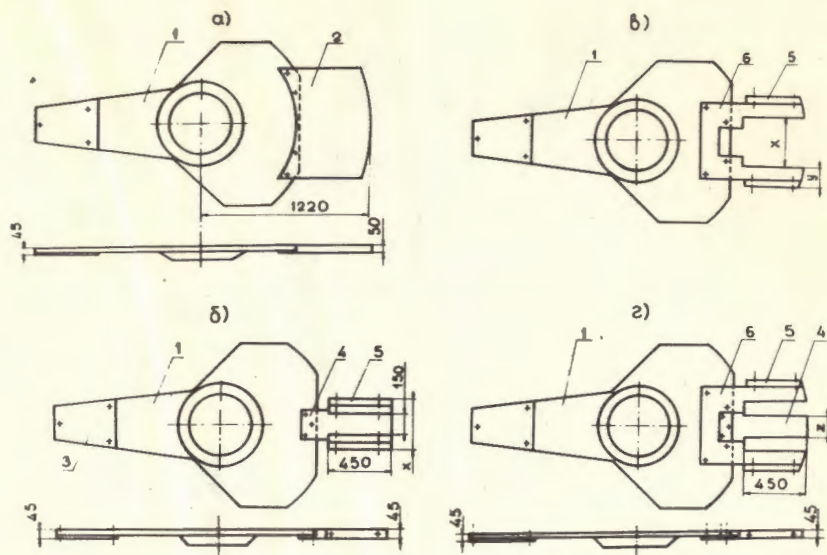


Рис. 6. Чертежи ротора ДПО на ЭПОСе. а/ ротор с алюминиевым ДПО; б/ с однолопастным ДПО; в/ с ДПО "вилка"; г/ с ДПО "трезубец"; 1 - собственно ротор, 2 - пластина-противовес из алюминия, 3 - стальной ДПО трапецевидный, 4 - центральная пластина "трезубца", 5 - боковые накладки, 6 - боковые части "вилки" и "трезубца".

соответствовали измерениям на физическом пуске с выведенным из зоны бериллиевым ДПО. Во всех остальных вариантах насадки, имитирующие ДПО, были стальными.

Вариант бб предназначался для проверки влияния на α и $\Delta K_{\text{ДПО}}$ ширины однолопастного стального ДПО. Ширина изменялась путем установки соответствующего количества стальных накладок. Помимо однолопастного ДПО, на стенде ЭПОС изучались двух- и трехлопастные варианты ДПО - "вилка" /рис. 6в/ и "трезубец" /рис. 6г/; ожидалось, что с такой конфигурацией ДПО параметр α будет намного больше, чем с дисковым ДПО.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА СТЕНДЕ ЭПОС

Из-за замены штатного ПО на ЭПОС уменьшение реактивности /в варианте ДПО ба, алюминий/ составило 1,7% $K_{\text{эфф}}$. По-

видимому, такова эффективность кожуха ПО, включая воду, охлаждающую кожух /см. рис. 2/. Потеря запаса реактивности вынудила перейти от периферийной загрузки к центральной, поэтому эксперименты ЭПОС проводились при центральной загрузке 74 кассет. Тем не менее, результаты, полученные на ЭПОСе, можно сопоставлять с измерениями на физическом пуске, о которых сказано выше, так как значение α в контрольном опыте с алюминиевым ДПО совпало со значением α , измеренным в штатном варианте при выведенном ДПО - $1,63 \pm 0,04$ град⁻² вместо $1,60 \pm 0,02$ град⁻².

5.1. Исследование с однолопастным ДПО

Зависимость α от ширины /размера в направлении движения/ ДПО носит сложный характер /см. табл. 3 и рис. 7/. Величина α имеет максимум при $x=0$, т.е. при отсутствии ДПО. Причем это значение α превышает полученное для штатного ПО в 2,5 раза. При ширине ДПО около 30 см α имеет минимальное значение, которое в 2 раза меньше $\alpha(0)$. Интересно, что при ширине лопасти ДПО менее 350 мм ф.ц. ДПО не совпадал с его геометрическим центром, т.е. с положением ДПО, симметричным относительно ОПО. Наибольшее отклонение $\pm 4^\circ$ было для ДПО 250 мм. При этом параболический коэффициент реактивности ОПО (α) зависел от положения ДПО.

Сложный характер зависимости $\alpha_{\text{ОПО}}$ от ширины и положения ДПО объясняется эффектом "затенения" ДПО основным отражателем. Например, если ширина ДПО близка к ширине ОПО /240 мм/, и ДПО установлен в г.ц., то при смещении ОПО влево или вправо от ф.ц. ДПО "открывается", и это добавляет положительный эффект реактивности к основному отрицательному эффекту, связанному с перемещением ОПО в область меньшего нейтронного потока. Таким образом, ход реактивности ОПО вблизи ф.ц. становится менее крутым, т.е. α уменьшается по сравнению с α без ДПО. При большой ширине ДПО экранируется ОПО в любом положении, но при смещении ОПО из ф.ц. "открывается" более эффективная /т.е. находящаяся ближе к реактору/ часть ДПО, чем "закрывается". В этом случае положительный эффект реактивности меньше, и α увеличивается. Сплошная линия, описывающая на рис. 7 зависимость $\alpha(x)$, проведена по 6 экспериментальным точкам /черные кружки/ с использованием стандартной программы SPLINE и условия монотонности функции для $x > 30$ см.

Зависимость $\Delta K_{\text{ДПО}}$ от ширины ДПО /рис. 8/ обнаруживает небольшую нерегулярность при ширине $20 \div 25$ см. Она обусловлена увеличением эффективности частей ДПО, не затененных ОПО, по сравнению с соседними затененными.

Таблица 3

Эффекты реактивности ПО для однолопастного ДПО

Ширина ДПО, мм (материал)	Параметр α ОПО, 10^{-4} град $^{-2}$	Погрешность α , 10^{-4} град $^{-2}$	$\Delta K_{ДПО}$, $\cdot 10^2$	$\Delta K_{ОПО}$, $\cdot 10^2$	Примечание
1. ДПО отсутствует	2,52	0,06	-	2,9	
2. 150 (сталь)	2,2	0,04	0,30	-	ДПО в г.п.
3. 200 (сталь)	1,98	0,01	0,36	2,43	ДПО в ф.п.
4. 250 (сталь)	1,95	0,02	0,46	-	ДПО в ф.п.
5. 250 (сталь)	1,52	0,01	-	-	ДПО в г.п.
6. 290 средняя (сталь)	1,57	0,02	0,57	-	трапецевидная форма ДПО, ДПО в ф.п.
7. 350 (сталь)	1,38	0,02	0,615	-	г.п. совпадает с ф.п.
8. 450 (сталь)	1,58	0,01	0,76	2,19	"
9. "	-	-	1,5	-	при выведенном ОПО
10. 900 (алюминий)	1,87	0,04	1,13	-	г.п. совпадает с ф.п.

Примечание: Толщина ДПО во всех случаях - 45 мм; относительная погрешность измерения полной эффективности ДПО и ОПО - не более 3%.

Кривая изменения реактивности при движении ОПО в отсутствие ДПО /рис. 4/ оказалась несимметричной, как и в штатном ПО. Скорость изменения реактивности в линейной части $\gamma_{\max} = 2,07 \cdot 10^{-8}$ 1/град, или $\gamma_{\max} = 37$ 1/с.

5.2. Влияние водяного замедлителя за ПО на α

Штатный водяной замедлитель, устанавливаемый за ДПО, оказывает влияние на α по той же причине, что и ДПО. Но из-за того, что альbedo воды для быстрых нейтронов меньше, чем альbedo железа, влияние замедлителя ощущается слабее /см. табл. 3 и 4/. Все остальные эксперименты на ЭПОСе, кроме приведенных в табл. 4, делались без замедлителя. На полную эффективность ДПО ($\Delta K_{ДПО}$) замедлитель влияет очень мало - в пределах ошибки измерения $2 \div 3\%$.

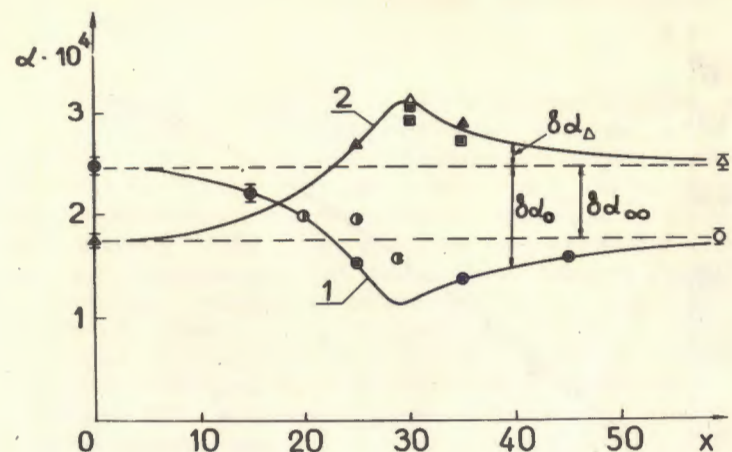


Рис. 7. Параметр α /град $^{-2}$ / для ОПО как функция размера стального ДПО / x , см/. \bullet - эксперимент с однолопастным ДПО шириной x , находящимся в геометрическом центре; \circ - то же с ДПО в физическом центре; \circ - пересчет из эксперимента с алюминиевым ДПО; Δ - эксперимент с ДПО в виде "вилки", находящимся в геометрическом центре /в этом случае x - зазор между лопастями/; Δ - пересчет из других экспериментов; \blacksquare - эксперимент с ДПО типа "трезубец"; 1,2 - аппроксимация экспериментальных данных сплайнами.

Таблица 4

Эффекты реактивности ПО при наличии и отсутствии водяного замедлителя за ДПО

Вариант ДПО	Наличие замедлителя	α , 10^{-4} град $^{-2}$		$\Delta K_{ДПО} \cdot 10^2$
		α , 10^{-4} град $^{-2}$	Погрешность α , 10^{-4} град $^{-2}$	
Стальной 290 мм	есть	1,29	0,03	0,56
	нет	1,57	0,02	0,57
Алюминиевый 900 мм	есть	1,63	0,04	1,10
	нет	1,87	0,04	1,13
ДПО отсутствует	есть	1,99	0,04	-
	нет	2,52	0,06	-

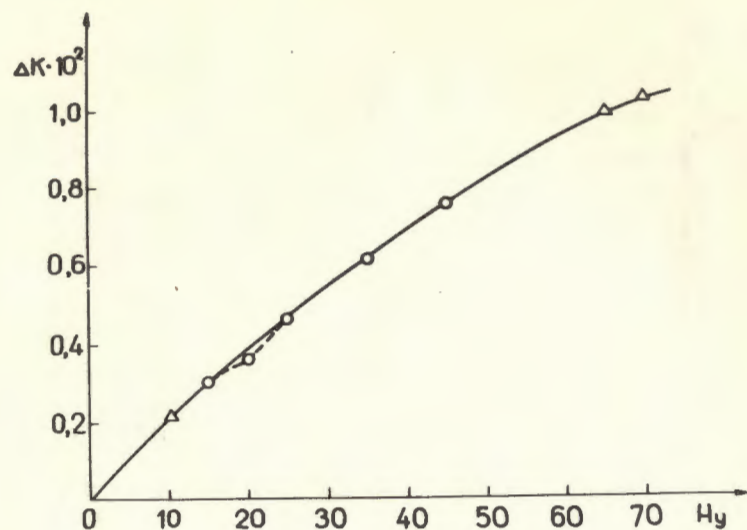


Рис. 8. Эффективность стального однолопастного ДПО как функция его ширины H_y /см/. О - прямой эксперимент, Δ - оценка из других экспериментов.

Таблица 5

Эффекты реактивности для ДПО в виде "вилки"

Зазор между лопастями "вилки", мм	Параметр	α ,	$\Delta K_{\text{ДПО}} \cdot 10^2$	$\Delta K_{\text{ОПО}} \cdot 10^2$	Примечание
		10^{-4} град ⁻²			
250		2,68	0,33	2,85	ДПО в г.ц.
250		1,92	0,23	-	ДПО в минимуме реактивности
350		2,85	0,38	-	ДПО в г.ц.

Примечание: Полная эффективность ДПО считалась относительно ф.ц. ДПО при выводе ДПО на 45° . Ширина каждой лопасти "вилки" - 150 мм.

5.3. Эффекты реактивности ПО при двухлопастном ДПО "вилка"

Для ДПО в виде "вилки" /рис. 6в/ следовало ожидать выигрыша в $\alpha_{\text{ОПО}}$ по сравнению с вариантом без ДПО при x больше 240 мм. В этом случае положительный эффект реактивности выхода из "тени" /который имеет место для однолопастного ДПО/ оборачивается отрицательным эффектом "затенения" того или другого "зуба" ДПО, и кривая эффективности ОПО обостряется. Эксперимент дал нужный знак эффекта /табл 5 и рис. 7/. Кривая изменения реактивности при сдвиге ДПО имеет сложный характер; ф.ц. сильно сдвинут относительно г.ц., который не совпадает ни с одной точкой экстремума /на рис. 9 не фиксировано положение г.ц./. Значения α при положении ДПО в частном минимуме реактивности и в ф.ц. значительно меньше, чем в г.ц. Это обстоятельство, а также малое значение полной эффективности $\Delta K_{\text{ДПО}}$ не позволяют использовать подобную конфигурацию ДПО в штатном ПО.

5.4. ДПО в виде "трезубца"

Наилучшие результаты дал ПО с ДПО в виде "трезубца" /рис. 6г, табл. 6/. Приведенные в табл. 6 данные по α имеют погрешность менее 0,5%, по ΔK - 2%.

Конечно, введение третьей, центральной лопасти должно несколько снизить α в сравнении с вариантом "вилки", но, поскольку размер $X=300$ мм для трехзубца был близок к оптимальному значению /см. рис. 7/, параметр α оказался выше, чем в случае "вилки". Преимущество "трезубца" перед "вилкой" в том, что центральная лопасть "исправляет" характер изменения реактивности при движении ДПО /см. рис. 9/; для "трезубцев" во всех случаях ф.ц. практически /в пределах 1° / совпадал с г.ц. Полная эффективность "трезубца" значительно выше /на $0,3 \cdot 10^{-2}$ абс.ед.реак./ эффективности "вилки", что уменьшает амплитуду побочных импульсов мощности в несколько раз при работе реактора в импульсном режиме.

Интересно отметить, что параболический ход реактивности ОПО в случае ДПО "трезубца" сохраняется на меньшем интервале углов, чем в случае других ДПО или их отсутствия /см. рис. 3/ - приблизительно в интервале $\pm 3^\circ$. Это есть как раз следствие эффекта "затенения" ДПО. Наибольшая скорость из-

Таблица 6

Эффекты реактивности ПО с ДПО в виде "трезубца"

Размеры ДПО x/y/z мм	Параметр $\alpha, 10^{-4}$ град $^{-2}$ $\Delta K_{\text{ДПО}} \cdot 10^2$	$\Delta K_{\text{ОПО}} \cdot 10^2$	Примечание
1. 350/150/150	2,71	0,64	ДПО в г.ц.
2. 350/150/150	-	1,1	ОПО выведено
3. 300/175/150	2,90	0,78	ДПО в г.ц.
4. 300/175/100	3,04	0,66	"
5. 300/200/100	2,92	0,69	"
6. 300/200/100	1,43	-	ДПО в минимуме реактивности
7. 300/175/150	2,59	-	За ДПО - стальная лист /15 мм/

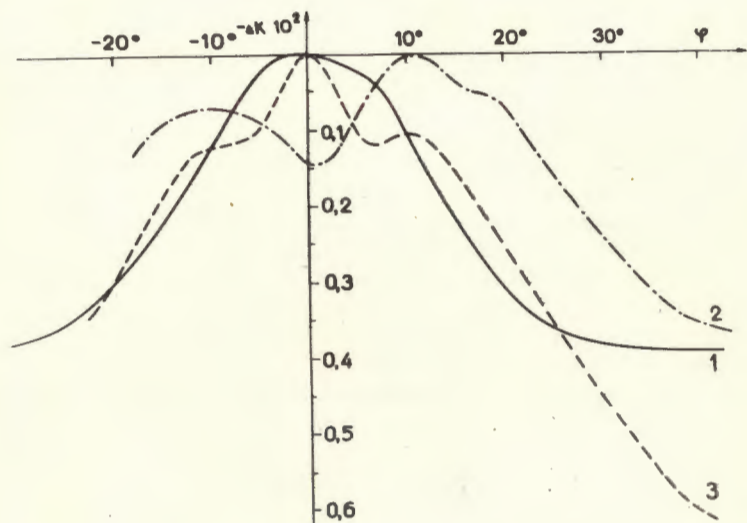


Рис. 9. Зависимость реактивности от угла поворота ротора ДПО. Кривая 1 - штатный ДПО, 2 - ДПО "вилка" с размером $x=350$ мм, 3 - ДПО "трезубец" с размерами 300/175/100.

менения реактивности при движении ОПО с ДПО в виде трезубца 300/175/150 равна $\gamma_{\text{max}} = 1,54 \cdot 10^{-8}$ 1/град или $\gamma_{\text{max}} = 27,7$ 1/с для номинальных оборотов ротора ОПО.

Параболический коэффициент реактивности ДПО "трезубца" равен $0,65 \cdot 10^{-4}$ град $^{-2}$.

В цикле экспериментов ЭПОС были измерены эффекты отодвигания роторов ОПО /без ДПО/ и ОПО вместе с ДПО от реактора. Отодвигание на малое расстояние дает: $(dK/dx)_{\text{ОПО}} = -/4,5 \pm 0,3/ \cdot 10^{-4}$ 1/мм, $(dK/dx)_{\text{ОПО} + \text{ДПО}} = (5,25 \pm 0,15) \cdot 10^{-4}$ 1/мм.

6. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Измерения на штатном подвижном отражателе и стенде ЭПОС убедительно показывают, что материал, форма и размеры ДПО очень сильно влияют на характеристики ОПО. В рамках теории возмущения 1-го порядка можно вывести простые соотношения, качественно определяющие это влияние. Для ДПО в виде лопасти шириной x можно записать:

$$\alpha = \alpha_0 + \delta\alpha_0,$$

где α_0 - параметр α основного подвижного отражателя в отсутствие ДПО, а $\delta\alpha_0$ - добавка к α за счет влияния ДПО; согласно формулам теории возмущения, $\delta\alpha_0$ - отрицательная функция ширины ДПО x , имеющая асимптоту α_∞ на бесконечности и минимум при x , примерно равном ширине ОПО. Наличие минимума связано с тем, что при такой ширине ДПО смещение ОПО из положения максимума реактивности только "открывает" новые области ДПО и ничего не "затеняет". При большей ширине ДПО, помимо выхода из "тени", некоторые части ДПО входят в "тень" ОПО, и это приводит к увеличению α .

Можно считать, что ДПО бесконечной ширины по своему влиянию на реактивность эквивалентен, согласно принципу суперпозиции малых возмущений, сумме однолопастного ДПО и двухлопастного ДПО в виде "вилки" /рис. 6в/. Тогда для коэффициента параболы реактивности ОПО с ДПО в виде "вилки" α_Δ должно быть справедливо соотношение:

$$\delta\alpha_\Delta = \delta\alpha_\infty - \delta\alpha_0,$$

/5/

где $\delta\alpha_\Delta = \alpha_\Delta - \alpha_0$, а $\delta\alpha_\infty = \alpha_\infty - \alpha_0$. Оказалось, что соотношение /5/ действительно выполняется для экспериментальных значений α , как видно из рис. 7. Так как $|\delta\alpha_0| > |\delta\alpha_\infty|$ в некоторой области ширин ДПО, то $\delta\alpha_\Delta > 0$ в этой области /согласно экспериментам, при $x > 23,3$ см/. Иными словами,

вариант ДПО "вилка" /а также "трезубец", рис. 6г/ дает выигрыш в параметре α по сравнению со случаем отсутствия ДПО или однолопастного ДПО при зазоре между лопастями "вилки", большем ширины ОПО.

Добавки к параметру α из-за влияния ДПО $\delta\alpha_0$ и $\delta\alpha_\Delta$, согласно теории возмущений, должны быть пропорциональны эффективности материала ДПО. В случае однолопастного ДПО материал большей эффективности дает меньшее значение α , для "вилки" и "трезубцев" - наоборот. Например, в случае однолопастного ДПО шириной ~30 см из бериллия, эффективность которого в 1,8 раза больше эффективности стали, α оказалось бы чрезвычайно малым - $0,1 \div 0,2 \cdot 10^{-4}$ град⁻². Измеренное же для штатного модулятора реактивности значение $\alpha = 1 \cdot 10^{-4}$ град⁻² обязано, в основном, действию алюминиевого диска, который работал как "вилка". Штатный вариант модулятора реактивности имеет не вполне удовлетворительные значения параметров $\alpha, \Delta K_{ДПО}$ и ΔK_{MR} /см. табл. 1 и 2/, так как при таких значениях важнейшие характеристики реактора оказываются значительно хуже проектных: длительность импульса мощности $\theta_{1/2} \approx 200$ мкс /вместо 92 мкс по проекту^{1/} / , относительная амплитуда побочного импульса $\frac{W_{\text{макс.}}}{W_{\text{ср.}}}$ _{ПОО.} $\approx 0,84$ /вместо 0,5/ и фон $W_\phi / W_{\text{ср}} \approx 0,1$ /вместо 0,06/. Модулятор реактивности с трехлопастным ДПО в виде "трезубца", изготовленным из стали /бериллия, меди/, обеспечит близкие к проектным значения этих характеристик реактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, №5, с.17-35.
2. Ананьев В.Д. и др. АЭ, 1971, т.31, вып. 4, с.352-358.
3. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Атомиздат, М., 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 мая 1979 года.