

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Л 745

P13-88-346

В.Л.Ломидзе, К.Ноак*, А.Д.Рогов, Е.П.Шабалин

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
И РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПЕРСПЕКТИВНОГО МОДУЛЯТОРА
РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ИБР-2**

Направлено в журнал "Атомная энергия"

* ЦИЯИ, Россендорф, ГДР

1988

1. ВВЕДЕНИЕ

В импульсном периодическом реакторе нейтронная вспышка формируется с помощью модулятора реактивности /МР/ - специального устройства, которое периодически переводит реактор в состояние надкритичности на мгновенных нейтронах. Основная часть вспышки формируется на стадии уменьшения коэффициента размножения, когда кривая спада реактивности во времени проходит через состояние "мгновенной" критичности. Если в момент достижения критичности абсолютное значение скорости вывода реактивности равно γ , то эффективная длительность вспышки θ ^{*/1/}

$$\theta = \sqrt{2\pi\tau/\gamma},$$

/1/

где τ - среднее время жизни поколения нейтронов в реакторе. Параметр γ - важнейшая характеристика модулятора реактивности, зависящая от нейтронно-физических свойств МР и скорости перемещения его активных элементов. Конструкция МР должна, очевидно, обеспечивать как можно более высокое значение γ .

Активными элементами модулятора реактивности ИБР-2 являются подвижные отражатели нейтронов: основной /ОПО/ и дополнительный /ДПО/, вращающиеся с разными по величине скоростями. Импульс мощности развивается только в том случае, когда оба отражателя оказываются вблизи активной зоны. Существенно, что в этот момент блок ДПО может экранироваться блоком ОПО, находясь в нейтронной тени последнего. В этом случае перемещение отражателей сопровождается выходом ДПО из тени, т.е. усилением его отражающих свойств и, следовательно, снижением скорости вывода реактивности γ .

В МР традиционной конструкции^{/2/} /ОПО и ДПО выполнены в виде сплошных блоков/ развитие нейтронного импульса осуществляется при выходе ДПО из тени, и поэтому теневой эффект играет вредную роль, что и было обнаружено при физическом пуске реактора в 1978 г.^{/3/}. Было решено изменить конфигурацию ДПО таким образом, чтобы формирование нейтронного импульса осуществ-

* Длительность вспышки на половине ее высоты, или "полуширина" $\theta_{1/2}$, на 6% ниже эффективного значения /1/. В тексте численные значения везде приводятся для "полуширины" вспышки.

влялось бы не при выходе ДПО из тени, а, наоборот, при его входе в тень ОПО. Поскольку затенение ДПО означает дополнительный вывод реактивности, ожидалось заметное увеличение параметра γ по сравнению с первоначальным значением.

В результате экспериментов ЭПОС-1^{/3/}, выполненных в 1979 г., была найдена оптимальная конфигурация стального ДПО /в форме трезубца, который используется до сих пор и обеспечивает значение $\theta_{1/2} = 220$ мкс при скорости вращения ОПО 1500 об/мин/, позволившая сократить длительность вспышки в 1,3 раза только за счет геометрического фактора /теневого эффекта/ и в 1,5 раза с учетом всех остальных изменений в конструкции МР и реактора.

В более поздних экспериментах, ЭПОС-2^{/4/}, проведенных в 1983 г., исследовались характеристики МР, у которого уже оба подвижных отражателя, и основной, и дополнительный, имеют решетчатую /гетерогенную/ структуру. Гетерогенный МР, идея которого возникла еще в 1974 г.^{/1/}, открывает путь дальнейшего повышения параметра γ без увеличения скорости вращения ОПО: во-первых, за счет возможности эффективного сокращения шага решеток по сравнению со случаем сплошного ОПО, размер которого ограничивал размер щели ДПО, и, во-вторых, за счет организации встречного движения ОПО и ДПО, поскольку частота перекрытия щелей обоих отражателей зависит, очевидно, от их относительной скорости движения. Шаг решеток, число и размер зубьев решетки, материал зубьев /сталь, бериллий/ были предметом оптимизационных исследований на стенде ЭПОС-2. Однако исследовать никелевый модулятор экспериментальным путем не предоставлялось возможности. Этот вариант гетерогенного МР оптимизировался расчетным путем К.Ноаком.

Расчеты К.Ноака предсказывали, что гетерогенный модулятор с никелевыми решетками ОПО и ДПО обеспечивает наиболее высокое значение γ и позволяет снизить длительность вспышки в 2 раза по сравнению с существующим значением 220 мкс при прежнем ограничении на максимальную скорость вращения 1500 об/мин.

Огромный запас прочности роторов МР при такой низкой скорости вращения, обеспечивающий практически полную безопасность реактора, и вместе с тем двукратный выигрыш в длительности вспышки представляли собой настолько весомый результат, что он нуждался в прямой экспериментальной проверке. Эксперименты на стенде ЭПОС-3, результаты которых обсуждаются в настоящей работе, полностью подтвердили предсказания расчетов. Экспериментальным путем, непосредственно на реакторе установлено, что гетерогенный модулятор реактивности из никелевого сплава ЭИ-437 обеспечивает "полуширину" вспышки быстрых нейтронов (115+5) мкс при скорости вращения ОПО и ДПО, равной 1500 и 1200 об/мин соответственно.

2. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО МОДУЛЯТОРА РЕАКТИВНОСТИ

Расчетные исследования гетерогенных МР начались параллельно с их экспериментальным изучением по программе ЭПОС-2^{/4/} и в конечном итоге привели к необходимости постановки контрольного эксперимента ЭПОС-3.

Непосредственной задачей обоих направлений являлось определение эффектов реактивности при заданных перемещениях ОПО и ДПО. Форма нейтронного импульса восстанавливалась, практически точно, по найденному закону модуляции реактивности из решения точечного уравнения кинетики.

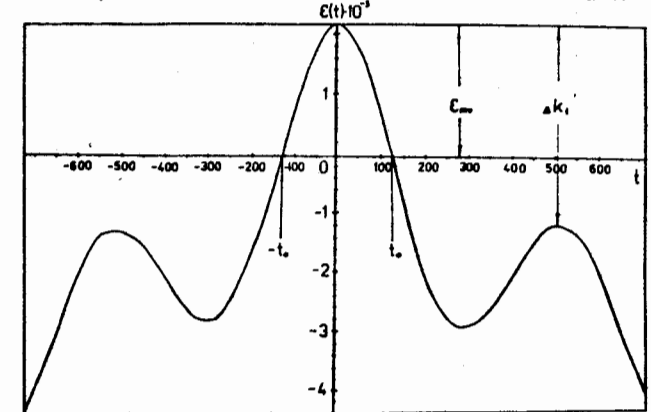
1.1. В общем случае модулируемая реактивность ϵ зависит от двух переменных: углового положения ОПО (ϕ_1) и углового положения ДПО (ϕ_2), т.е. $\epsilon = \epsilon(\phi_1, \phi_2)$. Следовательно, закон модуляции реактивности во времени $\epsilon(t)$ описывается уравнением

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_1} \omega_1 + \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_2} \omega_2, \quad /2/$$

где ω_1 и ω_2 - угловые скорости вращения ОПО и ДПО соответственно, а коэффициенты при них - неявные функции времени. Таким образом, отыскание закона модуляции $\epsilon(t)$ сводится к определению явного вида функции $\epsilon(\phi_1, \phi_2)$ расчетными или экспериментальными методами.

Практический интерес представляет зависимость $\epsilon(\phi_1, \phi_2)$ при постоянном соотношении углов: $\phi_1/\phi_2 = \omega_1/\omega_2$, т.е. функция одной независимой переменной $\epsilon(\phi)$, отличающаяся от $\epsilon(t)$ лишь размерностью аргумента /см. рис. 1 и 2/. Если в качестве незави-

Рис.1. Экспериментальная форма кривой модуляции реактивности $\epsilon(t)$ / 10^{-3} К/ никелевого гетерогенного модулятора МР-3 при скоростях вращения ОПО и ДПО 1500 и 1200 об/мин соответственно; ϵ_{mo} - равновесное значение мгновенной надкритичности, ΔK_1 - глубина модуляции побочного максимума реактивности, t - время /мкс/.



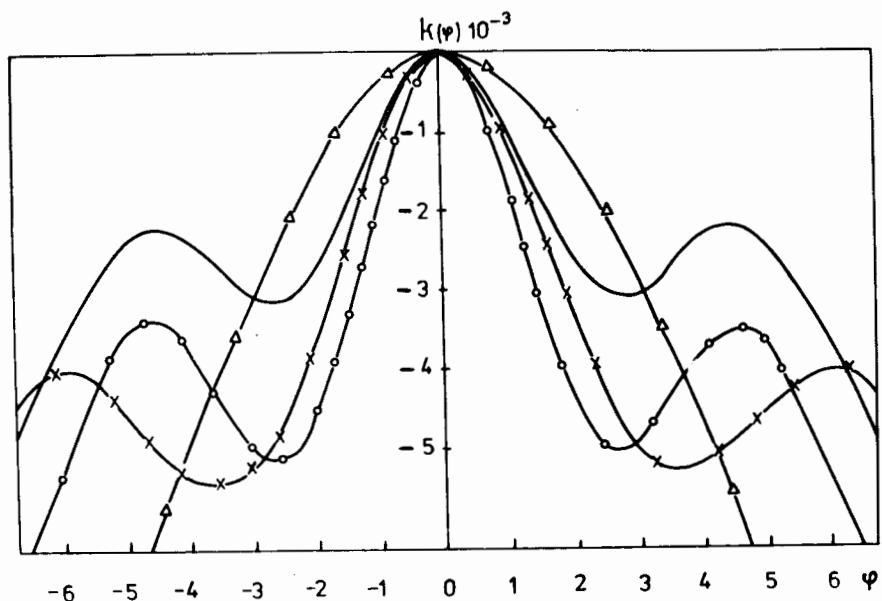


Рис. 2. Угловые зависимости модулируемой реактивности / $10^{-3}K$ /, измеренные для никелевого и стального вариантов МР-3, в сравнении с кривой модуляции действующего модулятора МР-2; ϕ - угол поворота ОПО /град/, $X = \omega_2/\omega_1$ - отношение скоростей вращения ДПО и ОПО. о-о - МР-3, никель, $X = -4/5$; х-х - МР-3, никель, $X = -1/3$; — МР-3, сталь, $X = -4/5$; Δ - Δ - МР-2, сталь, $X = +1/5$.

симой переменной выбрать угол поворота ОПО ($\phi = \phi_1$), то $d\epsilon/dt = \omega_1 d\epsilon/d\phi$, где величина угловой производной

$$\frac{d\epsilon}{d\phi} = \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_1} + \frac{\omega_2}{\omega_1} \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_2} \quad /3/$$

рассчитывается или измеряется непосредственно. В частности, ее абсолютное значение в точке $\phi = \omega_1 t_0$ /мгновенная критичность/, умноженное на ω_1 , равно параметру γ , о котором говорилось выше. Из /3/ видно, что этот параметр должен зависеть от отношения скоростей ОПО и ДПО.

Кроме того, из-за наличия теневого эффекта, величина γ должна зависеть от скорости взаимного перекрытия щелей ОПО и ДПО, т.е. от относительной скорости их вращения ($\omega_1 - \omega_2$).

В случае гетерогенного МР характер модуляции реактивности, $\epsilon(t)$ или $\epsilon(\phi)$, представляет собой комбинацию из параболичес-

кой зависимости, характерной для сплошных блоков, и некоей периодической зависимости, обусловленной взаимным перекрытием щелей ОПО и ДПО в процессе их движения. В сумме получается зависимость с одним главным и двумя побочными максимумами реактивности /см. рис. 1/. Основной импульс мощности развивается на правом крыле главного пика реактивности, достигая максимального значения в момент t_0 /рис. 1/, когда реактивность, снижающаяся со скоростью γ , пересекает уровень мгновенной критичности. Два небольших дополнительных импульса возникают за счет побочных максимумов реактивности, которые ниже главного максимума на величину ΔK_1 /рис. 1/.

Величина ΔK_1 должна быть достаточно большой, чтобы дополнительные импульсы мощности не выделялись заметно на фоне основной вспышки. Например, если ΔK_1 в 1,5 раза больше равновесной импульсной надкритичности ϵ_{mo} /как на рис. 1/, то побочные импульсы приблизительно в 700 раз ниже основного пика мощности /рис. 3/.

Величина ϵ_{mo} растет с увеличением скорости вращения отражателей /1/, поэтому для гетерогенного МР существует верхний предел скорости вращения, не связанный с прочностью материала, при котором побочные нейтронные импульсы становятся недопустимо велики. Этот предел достигается при условии $\epsilon_{mo} =$

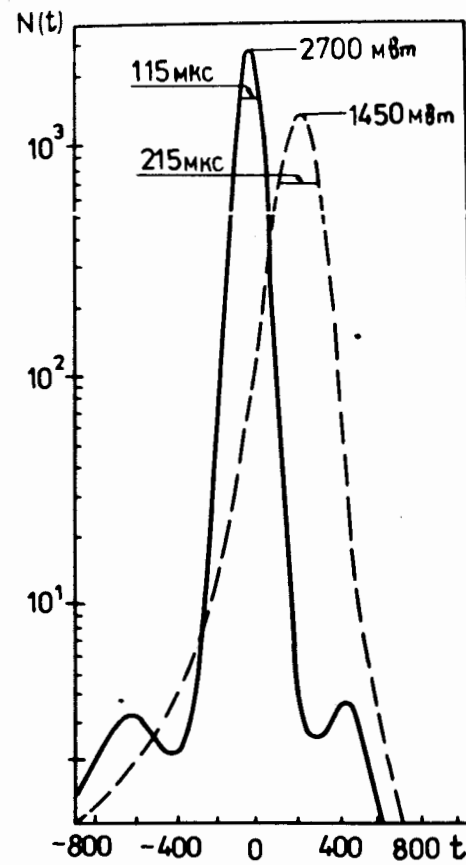


Рис. 3. Импульс мощности реактора ИБР-2 с никелевым модулятором реактивности МР-3 /сплошная кривая/ при скоростях вращения ОПО и ДПО 1500 и 1200 об/мин соответственно. Форма импульса восстановлена по кривой модуляции на рис.1. Средняя мощность реактора 2 МВт. Пунктиром изображен импульс, генерируемый действующим модулятором МР-2. /Скорость ОПО и ДПО 1500 и 300 об/мин/. N - мощность /МВт/, t - время /мкс/.

$= \Delta K_1$, когда побочный импульс развивается в состоянии мгновенной критичности.

Следует отметить, что и в отсутствие побочных пиков реактивности /кривая $\epsilon(\phi)$ на рис. 2 для сплошного ОПО и гетерогенного ДПО/ наступает предел, когда дальнейшее повышение скорости вращения становится нецелесообразным, т.к. не дает выигрыша в γ по сравнению с гомогенным вариантом МР /сплошные блоки ОПО и ДПО/. Этот факт был установлен экспериментально в измерениях на стенде ЭПОС-1.

Можно утверждать, что при высоких скоростях вращения гетерогенная структура подвижных отражателей теряет свои преимущества. Если бы нейтронно-физический предел скорости вращения был всегда ниже ограничений, продиктованных требованиями прочности, то идея гетерогенного МР вообще не имела бы практической ценности: например, для абсолютно прочного гетерогенного МР, способного вращаться со сколь угодно высокой скоростью, упомянутый предел являлся бы лишь искусственной преградой на пути сокращения длительности вспышки. К счастью, для некоторых даже самых прочных материалов нейтронно-физические свойства оказались "лучше" их прочностных свойств. Наибольший выигрыш в этом отношении дает гетерогенный МР из никелевого сплава, обладающего и хорошими прочностными характеристиками, и высокими отражающими свойствами. На рис. 4 и 5 показаны конфигурация подвижных отражателей никелевого МР и их расположение относительно активной зоны в некоторый момент времени после генерации вспышки мощности.

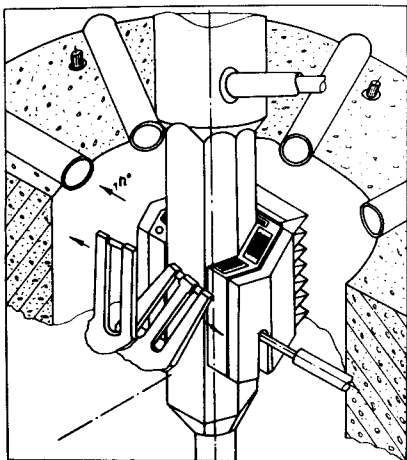


Рис. 4. Схема реактора ИБР-2 с никелевым гетерогенным модулятором реактивности МР-3. Ближе к активной зоне расположен основной подвижный отражатель /ОПО/.

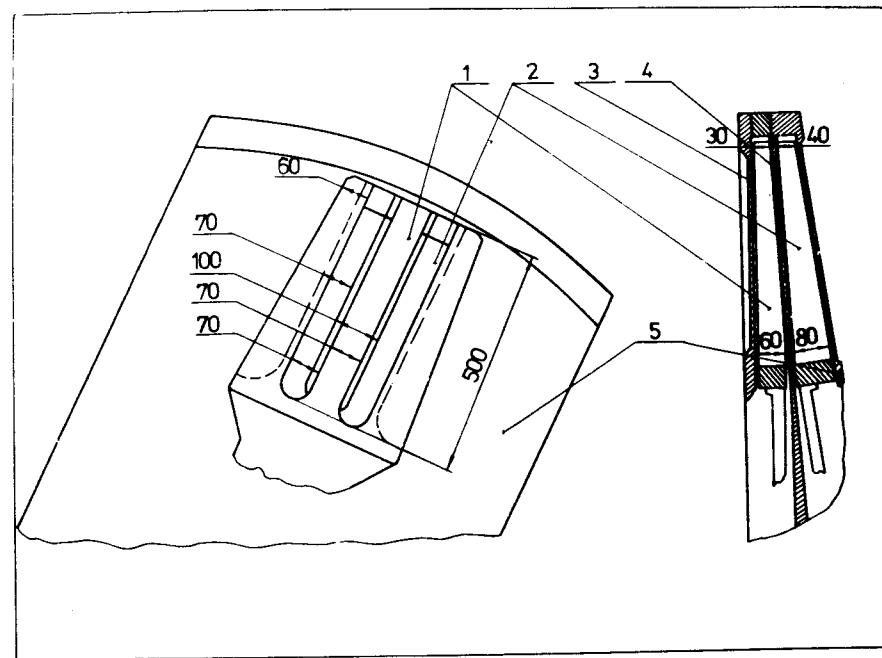


Рис. 5. Модель перспективного модулятора реактивности МР-3 на стенде ЭПОС-3. Показаны никелевые решетки основного /1/ и дополнительного /2/ отражателей нейтронов, передняя /3/ и разделительная /4/ мембраны кожуха МР, сам кожух /5/.

2.2. Численные расчеты закона модуляции реактивности $\epsilon(\phi)$, точность которых определяется, по существу, погрешностью вычисления производной $d\epsilon/d\phi$, проводились путем оценки дифференциальных альбедных эффектов методом Монте-Карло в реальной геометрии. Коэффициент связи "альbedo - реактивность" определялся из сравнения расчетных данных с экспериментальными результатами ЭПОС-1 и ЭПОС-2.

С этой целью был создан вариант вычислительной программы MORSE-CG^{5/}, специально предназначенный для расчета малых альбедных эффектов. Ядерные константы использовались из библиотеки DLC-23^{6/} для 22 энергетических групп нейтронов и 18 групп гамма-квантов в P_3 -приближении для сечений рассеяния.

Необходимость проводить большое количество вариантных расчетов потребовала использования специальных методов, позволяющих снизить дисперсию результатов и одновременно сократить удельное счетное время /введение корреляции нейтронных исто-

рий, расщепление альbedo на отдельные компоненты/. В дальнейшем появилась возможность перехода к двумерной геометрии, что еще более повысило эффективность расчетов /без существенного ухудшения их точности, как показало сравнение с экспериментами ЭПОС-1 и ЭПОС-2/.

В итоге программа позволила проводить многочисленные оптимизационные исследования, объем которых был бы практически недоступен для экспериментального изучения на реакторе.

По разработанной методике были проведены оптимизационные расчеты гетерогенного МР, в которых варьировалось число и размер зубьев отражателей, ширина щелей, отношение скоростей ОПО и ДПО, материал отражателей, учитывалось влияние деталей конструкции. Таким образом, был найден оптимальный вариант МР - никелевый гетерогенный модулятор из сплава ЭИ-437, получивший название МР-3*, и выданы рекомендации к его проектированию. По значениям параметров γ , ΔK_1 и $\epsilon_{\text{мо}}$, рассчитанным при разных отношениях скоростей ОПО и ДПО, удалось предсказать длительность вспышки, нейтронно-физический предел скорости вращения и наиболее подходящий режим работы будущего модулятора $\omega_2/\omega_1 = -4/5$; знак "минус" означает, что ОПО и ДПО вращаются в разные стороны/. При этом полуширина нейтронной вспышки оценивалась, как уже говорилось, величиной 110 ± 120 мкс при скорости вращения ОПО $\omega_1 = 1500$ об/мин.

О сравнении расчетных параметров МР-3 с экспериментальными данными ЭПОС-3 будет сказано ниже при обсуждении экспериментальной части исследований.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННОГО МР НА СТЕНДЕ ЭПОС-3

Двукратное сокращение длительности нейтронной вспышки, которое обеспечивал, согласно расчетам, проектный вариант никелевого гетерогенного модулятора реактивности /МР-3/, нуждалось в прямом экспериментальном подтверждении. Во-первых, потому, что проект будущей конструкции содержал много особенностей, не поддающихся учету расчетным путем. Во-вторых, появились сомнения /как выяснилось впоследствии, напрасные/ в калибровке реактивности в экспериментах ЭПОС-2, которая использовала-

* МР-3 - модулятор реактивности 3-го поколения. К 1-му поколению относятся модуляторы традиционной/гомогенной/ конструкции. Модулятором 2-го поколения /МР-2/ считается ныне действующий МР с ДПО в форме трезубца и ОПО в виде сплошного блока, изготовленных из стали.

лась и в вычислительной программе MORSE. Эксперименты ЭПОС-3 должны были рассеять эти сомнения.

3.1. Экспериментальный стенд ЭПОС-3 - полномасштабная модель перспективного модулятора реактивности МР-3, учитывающая все проектные особенности конструкции в зоне влияния на реактивность. Наиболее существенная часть модели изображена на рис. 4 и 5.

Согласно проекту, основной и дополнительный отражатели МР-3 вращаются навстречу друг другу в двух независимых объемах, разделенных мембраной переменной толщины. В области активной зоны толщина мембраны минимальная /рис. 5/, так как ось вращения ДПО наклонена под углом 8° к горизонтали. На экспериментальной модели роторы ОПО и ДПО были заменены рычагами, поворот которых вокруг проектных осей вращения производился специальным механизмом с использованием пары винт - гайка и шарнира.

Отражатели перемещались независимо друг от друга с помощью двух электромоторов. Контроль перемещений осуществлялся посредством сельсин-индикаторов с погрешностью $0,006^\circ$, или $0,105$ мм на дуге радиуса 1 м, пересекающей медианную плоскость реактора, во всем диапазоне перемещений $\pm 10^\circ$. Весь стенд, т.е. никелевые решетки ОПО и ДПО, часть кожуха с мембраной, поворотные рычаги с приводным механизмом, датчики перемещений с концевыми выключателями, был смонтирован на ферме, которая крепилась к передней части штатного модулятора реактивности /к кожуху МР-2 и его станине/. При установке стенда к реактору штатный модулятор отодвигался от активной зоны на 900 мм.

3.2. Измерения проводились в подкритическом на запаздывающих нейтронах состоянии при умножении не более 700. Перед измерениями проводилась тщательная калибровка реактивности по разгону реактора, по сбросу стержня из критического состояния, а также методом перекомпенсации. Таким образом, с высокой точностью измерено значение "нулевого" счета, проверена эффективность органов регулирования реактора и подтверждена правильность измерений реактивности в предыдущих экспериментах на ЭПОС-2.

3.3. Результаты экспериментального изучения характера модуляции реактивности на стенде ЭПОС-3 представлены на рис. 1-3, 6 и в табл. 1-4. Главный результат исследований представлен рис. 1 и 3, на которых изображены характер модуляции реактивности во времени и соответствующая ему форма импульса мощности для окончательного варианта перспективного модулятора с ни-

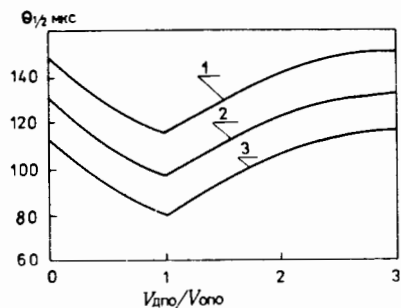


Рис. 6. Зависимость полуширины импульса мощности от абсолютной величины отношения скоростей ДПО и ОПО при их встречном движении для трех значений предельно допустимой скорости вращения: 1000 /1/, 1500 /2/ и 3000 /3/. Слева от точки 1 предельную скорость имеет ОПО, справа от нее - ДПО.

келевыми отражателями нейтронов при скоростях вращения ОПО и ДПО 1500 и 1200 об/мин соответственно. Длительность нейтронной вспышки при этом стала короче в 2 раза по сравнению с существующим значением /рис. 3/.

Таблица 1

Экспериментальные значения крутизны и глубины модуляции реактивности МР-3 при разных отношениях скоростей ДПО и ОПО

$-\omega_2/\omega_1$	0	0,33	0,8	1	1,4	1,5	1,67	2	3	∞
$-d\epsilon/d\phi$										
$10^{-3}/\text{град.}$	1,9	2,2	2,9	3,2	2,65	2,55	2,4	2,2	1,9	1,5
$\Delta K_1, 10^{-3}$	5,3	4,0	3,4		3,2			3,2	3,9	4,8

В табл. 1 приведены основные параметры кривой модуляции реактивности, измеренные при разных значениях отношения скорости ДПО к скорости ОПО: крутизна модуляции в основном и глубина модуляции в побочных максимумах реактивности. Значения угловой производной /крутизны модуляции/ приведены в табл. 1 с таким расчетом, чтобы можно было сразу вычислить параметр γ , домножив их на предельно допустимую скорость вращения, не зависящую от того, какой из отражателей вращается быстрее. В случае $-\omega_2/\omega_1 < 1$, представляющем наибольший практический интерес, быстрее вращается ОПО, и под ϕ подразумевается угол поворота ОПО (ϕ_1). В случае $-\omega_2/\omega_1 > 1$, наоборот, с предельной скоростью вращается ДПО, и здесь $\phi = \phi_2$ - угол поворота ДПО. В любом случае $\gamma = -\omega d\epsilon/d\phi$, где $\omega = \dot{\phi}$ - скорость наиболее быстро вращающегося отражателя, в частности - предельная скорость вращения, заданная из соображений надежности и прочности конструкции МР.

Из табл. 1 видно, что отношение скоростей желательно выбирать как можно ближе к единице. Для предельной скорости вращения 1500 об/мин частота следования импульсов мощности 5 Гц обеспечивается, например, при $-\omega_2/\omega_1 = 0,8$ и 1,25. Значение 0,8 несколько более выгодно и в отношении величины угловой производной, и в отношении глубины модуляции побочного максимума реактивности ΔK_1 , которая тоже должна быть как можно выше. Зависимость $\Delta K_1(\omega_2/\omega_1)$ имеет, согласно табл. 1, пологий минимум в районе $\omega_2/\omega_1 = -1,5$, т.е. заметно правее точки 1. Более высокая крутизна функции $\epsilon(\phi)$ слева от точки 1 объясняется тем, что ОПО более эффективен, чем ДПО, поэтому он и вращаться должен быстрее. Действительно, формулу /2/ можно записать в виде

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_1} + \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_2} \right) + \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_1} - \frac{\partial \epsilon}{\partial \phi_2} \right). \quad /2a/$$

Поскольку изменение знака у ω автоматически ведет к перемене знака у соответствующей угловой производной реактивности, то все величины в /2a/ можно заменить их абсолютными значениями независимо от направления вращения ОПО или ДПО. Тогда вклад последнего слагаемого в /2a/ будет положительным, если при большей эффективности ОПО ($|\partial \epsilon / \partial \phi_1| > |\partial \epsilon / \partial \phi_2|$) выбрать и большую скорость его вращения ($|\omega_1| > |\omega_2|$).

Длительность вспышки, рассчитанная по данным табл. 1 для трех значений предельной скорости вращения, представлена на рис. 6 как функция отношения $-\omega_2/\omega_1$. Здесь, как и в табл. 1, излом функций в точке 1 обусловлен переменной ролью ОПО и ДПО: слева от точки 1 с фиксированной предельной скоростью вращается ОПО, а справа от нее - ДПО. Среднее время жизни поколения мгновенных нейтронов принималось в этих расчетах /см. /1// равным $6,3 \cdot 10^{-8}$ с.

В целях получения прямых сравнительных данных о рассеивающих свойствах выбранного материала решеток ОПО и ДПО модулятора МР-3 в экспериментах ЭПОС-3 исследовались также отражатели из углеродистой стали, имеющие ту же конфигурацию, что и решетки из сплава ЭИ-437.

В табл. 2 приведены данные о длительности вспышки и величине равновесной импульсной надкритичности для наиболее оптимального режима работы МР-3 $\omega_2/\omega_1 = -0,8$ при разных ограничениях на предельно допустимую скорость вращения /в данном случае, ОПО/. Наряду со стальным вариантом МР-3 в таблице сравниваются и характеристики действующего модулятора реактивности МР-2. Прочерк в 4 столбце табл. 2 означает, что для стального МР-3 скорость ОПО 3000 об/мин нереальна, т.к. превышает свой нейтронно-физический предел ($\epsilon_{\text{мо}} > \Delta K_1$).

Таблица 2

Данные о длительности вспышки и величине равновесной импульсной надкритичности для наиболее оптимального режима работы МР-3 $\omega_2/\omega_1 = -0,8$ при разных ограничениях на предельно допустимую скорость вращения

ω (об/мин)	МР-3, никель $\theta_{1/2}$, мкс	$\epsilon_{mo} 10^{-3}$	МР-3, сталь $\theta_{1/2}$, мкс	$\epsilon_{mo} 10^{-3}$	МР-2, сталь $\theta_{1/2}$, мкс	$\epsilon_{mo} 10^{-3}$
1000	143	1,61	231	1,49	260	0,74
1500	116	2,19	171	1,83	215	1,06
2000	102	2,71	146	2,15	160	1,34
3000	88	3,45	-	2,59	120	1,88

Примечание. Значения длительности вспышки мощности и равновесной импульсной надкритичности - результат обработки измеренной формы кривой модуляции реактивности на основе точечной модели кинетики. Данные приведены для режимов $\omega_2/\omega_1 = -4/5$ /МР-3/ и $\omega_2/\omega_1 = 1/5$ /МР-2/, обеспечивающих частоту 5 Гц при скорости ОПО 1500 об/мин. Погрешность не более 3±5%.

Полный перечень основных параметров модуляции реактивности МР-3 в режиме $\omega_2/\omega_1 = -4/5$ представлен в табл. 3. Там же приведены расчетные параметры МР-3, полученные методом Монте-Карло по описанной выше методике. Расчеты, как видно из табл. 3, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Суммарная эффективность отражателей МР-3, равная, согласно табл. 3, 3,4%, почти совпадает с эффективностью МР-2 /3,5%/, т.е. фоновое значение мощности ИБР-2 практически не изменяется при установке модулятора МР-3.

В табл. 4 приведены экспериментальные данные основных параметров МР-3 при трех различных положениях места встречи ОПО и ДПО относительно физического центра / $\Delta\phi = 0$ / - положения, соответствующего минимальному запасу реактивности. Сдвиг места встречи осуществлялся в направлении вращения ОПО на 1 и 2°.

При таком сдвиге кривая модуляции становится явно асимметричной: ее левая часть приподнимается, а правая часть, определяющая длительность вспышки, опускается, увеличивая и свою крутизну, и глубину модуляции побочного максимума. В таблице указано также, как при этом увеличивался запас реактивности.

Положительный эффект сдвига места встречи ОПО и ДПО объясняется тем, что при удалении от физического центра в направлении вращения более эффективного отражателя /ОПО/ выведение реактивности за счет параболической составляющей усиливается. Соответственно возрастает крутизна правого крыла главного мак-

Таблица 3

Основные параметры перспективного модулятора МР-3

Параметр МР-3*	Эксперимент		Расчет
	никель	сталь	никель
$\Delta K_{OPO} 10^{-2}$	2,3	1,7	2,10±0,25
$\Delta K_{DPO} 10^{-2}$	1,1	0,8	1,10±0,15
$-d\epsilon/d\phi, 10^{-3}/\text{град.}$	2,9	1,7	3,1±0,3
$\Delta K_1, 10^{-3}$	3,3	2,0	3,6±0,3
$\epsilon_{mo}, 10^{-3}$	2,19	1,83	-

* ΔK_{OPO} - полная эффективность ОПО, измеренная в отсутствие ДПО, ΔK_{DPO} - эффективность ДПО, затененного блоком ОПО. Их сумма - полная эффективность модулятора. Погрешность измерений не более 3±5%.

Таблица 4

Изменение параметров модуляции и запаса реактивности при сдвиге места встречи ОПО и ДПО модулятора МР-3 ($X = -4/5$)

$\Delta\phi$, град.	0	1	2
$-d\epsilon/d\phi, 1/\text{град.}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
ΔK_1	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
1 - К	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$

симула реактивности и более сильно подавляется побочный максимум. Использовать этот эффект на практике можно лишь в ограниченных пределах, поскольку увеличение запаса реактивности снижает безопасность реактора.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы показывают, что гетерогенный модулятор реактивности МР-3, изготовленный из никелевого сплава ЭИ-437, позволяет снизить длительность импульса мощности реактора ИБР-2 с имеющихся на сегодня 215 мкс до /115±5/ мкс без изменения скорости вращения ОПО (1500 об/мин), но с увеличенной

до 1200 об/мин скоростью ДПО. При скорости ДПО 300 об/мин длительность вспышки составляет 130 ± 5 мкс. Для стального варианта МР-3 приведенные значения "полуширины" импульса возрастают до 170 и 190 мкс соответственно.

При длительности 115 мкс амплитуда главного пика мощности составляет 2700 МВт /средняя мощность 2 МВт/. Первый побочный всплеск мощности, обусловленный размножением запаздывающих нейтронов, имеет амплитуду 3,2 МВт, длительность на уровне соседнего минимума мощности 320 мкс и появляется на 600 мкс раньше основной вспышки. Второй побочный импульс, с амплитудой 3,7 МВт и длительностью 240 мкс, появляется спустя 430 мкс после основной вспышки. Мощность реактора при выведенных ОПО и ДПО /"мощность фона"/ равна 0,14 МВт. Работа реактора ИБР-2 с модулятором МР-3 рассчитана на режим повторения вспышек 5 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. - М.: Атомиздат, 1976.
2. Ананьев В.Д. и др. - АЭ, 1971, т.31, вып.4, с.352.
3. Гудовски В. и др. Сообщение ОИЯИ, Р13-12484, Дубна, 1979.
4. Ananiev V.D. et al. - Atomkernenergie. Kerntechnik, 1983, v.43, No.4, p.253.
5. Emmett M.V. The MORSE Monte-Carlo Radiation Transport Code System, ORNL-4972, 1975.
6. A Capsule Review of the Computer Code Collection, Peripheral Shielding Routines and Data Library Collection. RSIC, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 мая 1988 года.

Ломидзе В.Л. и др.

Р13-88-346

Результаты экспериментальных и расчетных исследований перспективного модулятора реактивности реактора ИБР-2

Перспективный модулятор реактивности гетерогенного типа из никелевого сплава позволяет вдвое сократить длительность нейтронной вспышки реактора ИБР-2 при прежнем ограничении на скорость вращения подвижных отражателей 1500 об/мин. Ожидаемое значение "полуширины" вспышки быстрых нейтронов 115 ± 5 мкс. Результат получен путем оптимизационных расчетов методом Монте-Карло и подтвержден прямыми измерениями параметров модулятора непосредственно на реакторе.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Lomidze V.L. et al.

Р13-88-346

Results of Experimental and Computational Studies of Perspective Reactivity Modulator for the IBR-2 Pulsed Reactor

The perspective reactivity heterogeneous modulator for the IBR-2 reactor from nickel alloy permits to cut down twice the duration of power pulse in the periodically-pulsed reactor IBR-2 at previous limitations on moving reflector rotation velocity of 1500 rev/min. The expected value of power pulse halfwidth for fast neutrons is (115 ± 5) mks. The results are derived by optimization calculations using the Monte-Carlo method. It is confirmed by direct measurements of modulator parameters on the reactor.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988