

С3489  
А-64

Ананыев, В.Д. и др.

Б1-3-83-74.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2290/83

Б1-3-83-74

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1983

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

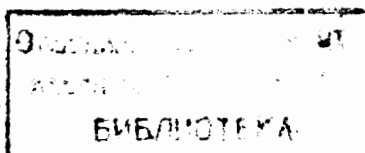
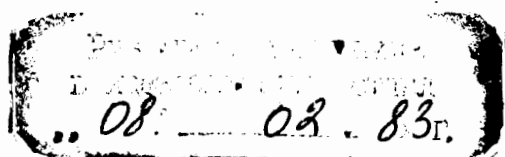
С 3489

А-64

В.Д.Ананьев, В.Л.Ломидзе, А.Д.Рогов,  
В.С.Смирнов, Е.П.Шабалин

Б1-3-83-74

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МОДУЛЯТОРОВ  
РЕАКТИВНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА  
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ



г. Дубна, 1982 г.

## Введение

Работа посвящена экспериментальному изучению характеристик и оптимизации модулятора реактивности импульсного реактора периодического действия. Исследовались физические модели как однородных (однородных), так и гетерогенных (типа "решетка") подвижных отражателей. Установлено, что гетерогенный модулятор оптимальных размеров позволит получить значительно более короткие нейтронные импульсы, чем подвижный отражатель однородной формы.

### I. Общее описание экспериментов

Пульсирующий режим работы импульсного реактора обеспечивается внешней модуляцией реактивности с помощью специального устройства - модулятора реактивности. Модулятор реактивности должен удовлетворять определенным требованиям как с точки зрения получения хороших характеристик импульса реактора, так и с точки зрения стабильной и безопасной работы импульсного реактора. Известно приближенное выражение для длительности импульса мощности импульсного реактора периодического действия:

$$Q_{1/2} \approx 2,35 \cdot \sqrt{\tau / \gamma}$$

где  $\gamma = dk/dt$  - скорость изменения реактивности в момент времени, когда мощность реактора достигает максимума;

$\tau$  - время жизни поколения мгновенных нейтронов.

Следовательно, модулятор реактивности должен обеспечить высокую скорость изменения реактивности для получения короткой вспышки нейтронов.

Для того, чтобы в импульсах генерировалась основная доля нейтронов, а в промежутке между импульсами - малая, модулятор реактивности должен обеспечивать большую глубину модуляции ( $\Delta K_{MP} \approx 10\beta$ ).

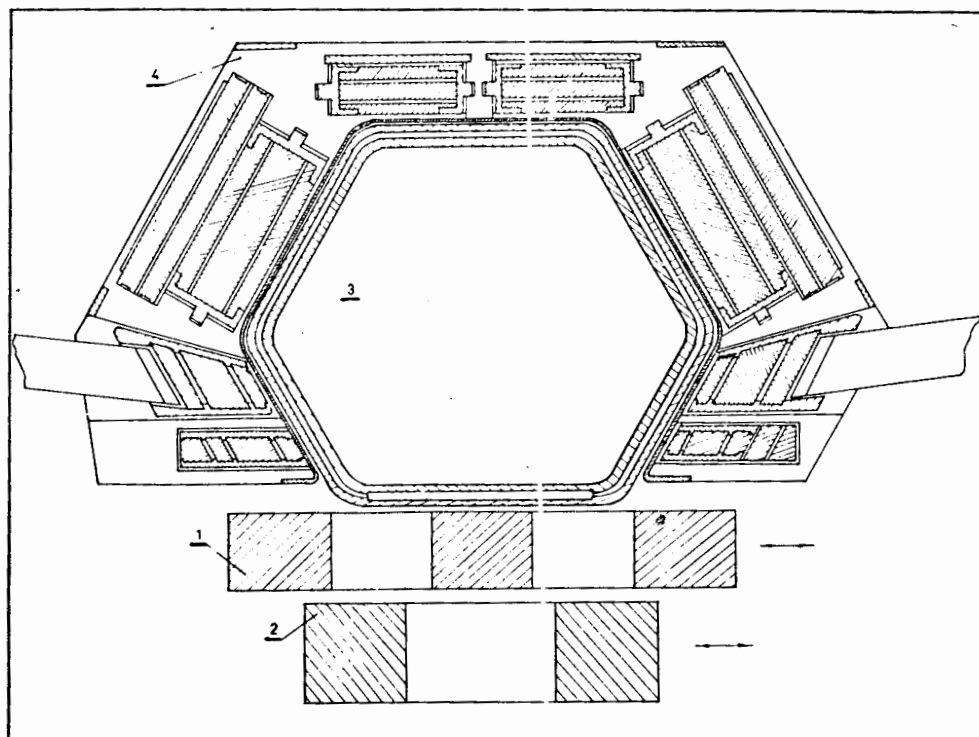


Рис. 1. Схема экспериментов ЭПС-2 с модулятором реактивности гетерогенной структуры:

- 1 - основной подвижный отражатель (ОПО),
- 2 - дополнительный подвижный отражатель (ДПО),
- 3 - активная зона реактора,
- 4 - стационарные отражатели с блоками регулирования



В данной работе были продолжены эксперименты /1,2/ по измерению характеристик и оптимизации модулятора реактивности для получения импульсов мощности минимальной длительности. Были исследованы физические модели однородных подвижных отражателей и модуляторов реактивности с гетерогенной структурой. Гетерогенный модулятор реактивности /3/ представляет собой два набора прямоугольных брусков, разделенных промежутками (рис. 1). При прохождении обоих наборов мимо активной зоны в разных направлениях (либо при движении одного из них), коэффициент размножения нейтронов меняется следующим образом: во-первых, происходит модуляция реактивности из-за движения отражателей как целого по известному параболическому закону; во-вторых, имеет место модуляция реактивности за счет периодического перекрытия щелей. Эта модуляция подчиняется приблизительно гармоническому закону с периодом  $\ell/v$ , где  $\ell$  - шаг решетки,  $v$  - относительная скорость отражателей. Сложение двух видов модуляции, параболической и гармонической, дает сложную зависимость реактивности от времени. Кроме того, скорость изменения реактивности будет зависеть от амплитуды центрального импульса реактивности (величина эффекта при перекрытии щелей модулятора).

Важнейшим в идее гетерогенного модулятора является то, что предельная скорость изменения реактивности у него выше, чем в случае однородного подвижного отражателя, поскольку она пропорциональна относительной скорости отражателей

$$j_{\text{гет.}} = v_{\text{отн.}} \frac{dk}{dx}, \quad j_{\text{одн.}} = 2 \cdot v_{\text{а.з.}} \sqrt{\alpha \cdot \epsilon_m} \quad (1),$$

где  $v_{\text{а.з.}}$  - скорость однородного модулятора реактивности относительно активной зоны;  $\alpha$  - параметр, описывающий ход реактивности для однородного МР.

В описываемых экспериментах исследовалась кривая изменения реактивности при медленном перемещении МР относительно активной зоны для различных вариантов отражателей. Тем самым, в частности, измерялись величины  $dk/dx$  и  $\alpha$ .

Условимся далее везде называть ближний к активной зоне элемент модулятора - основным подвижным отражателем (ОПО), а второй элемент - дополнительным подвижным отражателем (ДПО), по аналогии с используемым сейчас на ИБР-2 модулятором реактивности, который в данной работе называется "штатным модулятором реактивности" (вариант, изготовленный в 1979 г.)

## 2. Конструкция экспериментальной установки ЭПОС-2

Для изучения различных вариантов модулятора реактивности использовали специальный стенд ЭПОС-2 (фото 2, рис. 3). Стенд устанавливался на место штатного подвижного отражателя около реактора ИБР-2 на откатной тележке (1), положение которой строго фиксировалось около активной зоны. К тележке прикреплена сборная ферма (2,3) с механизмом перемещения решеток (4). Механизм перемещения можно устанавливать в трех положениях: горизонтально (Г), вертикально (В) и под углом 64 градуса относительно вертикальной оси реактора (Н). В механизме перемещения с помощью двух независимых электроприводов (9), перемещались две каретки, на которые с помощью съемных кассет набирались различные конфигурации ОПО и ДПО. Управление каретками производилось дистанционно, с пульта управления реактора. Скорость перемещения кареток была 30 мм/мин. Контроль перемещения осуществлялся двумя угловыми датчиками (10), (которые связывали вращательное движение винта с линейным перемещением кареток) по электронно-цифровому индикатору, также установленному на пульте управления ИБР-2.

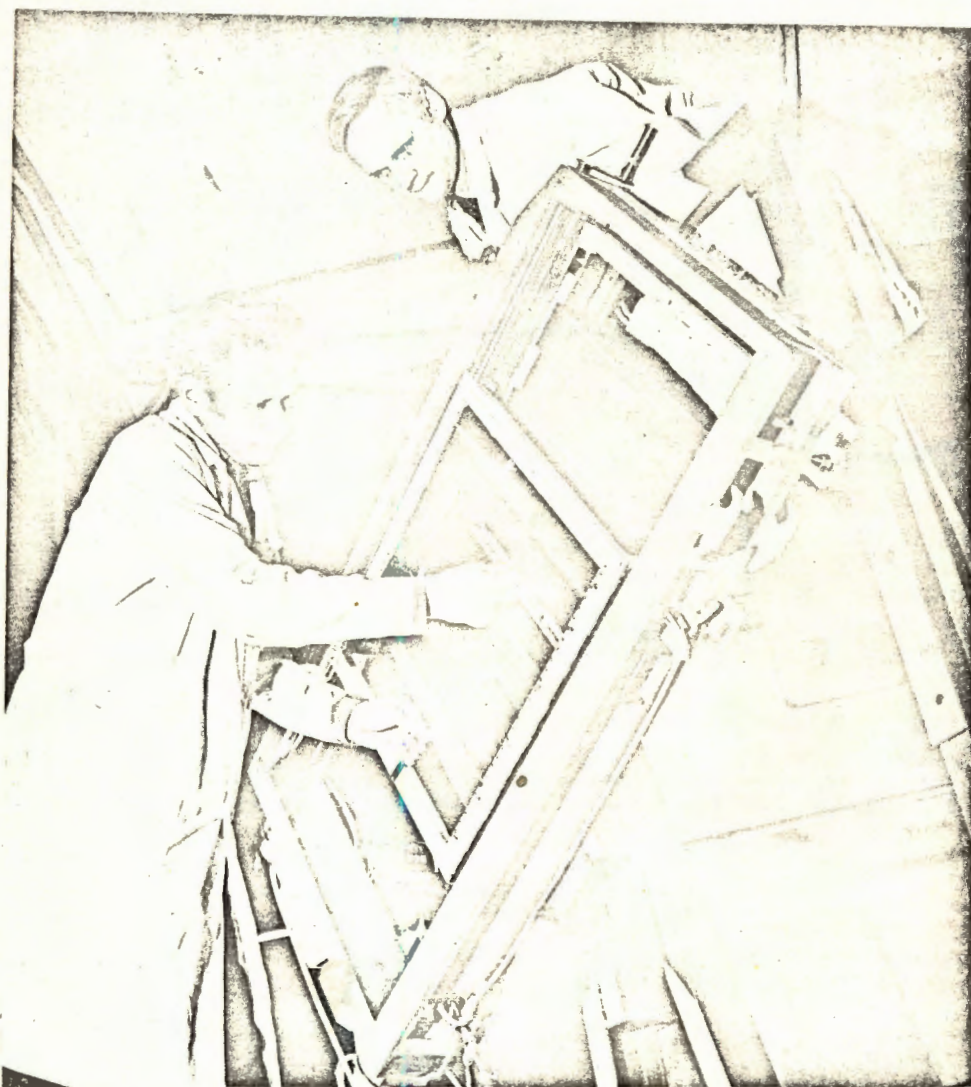


Рис. 2. Вид на стенд ЭЮС-2 со стороны активной зоны.  
Подготовка к эксперименту.



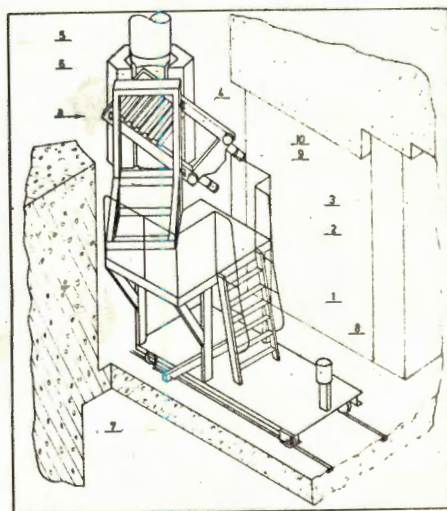
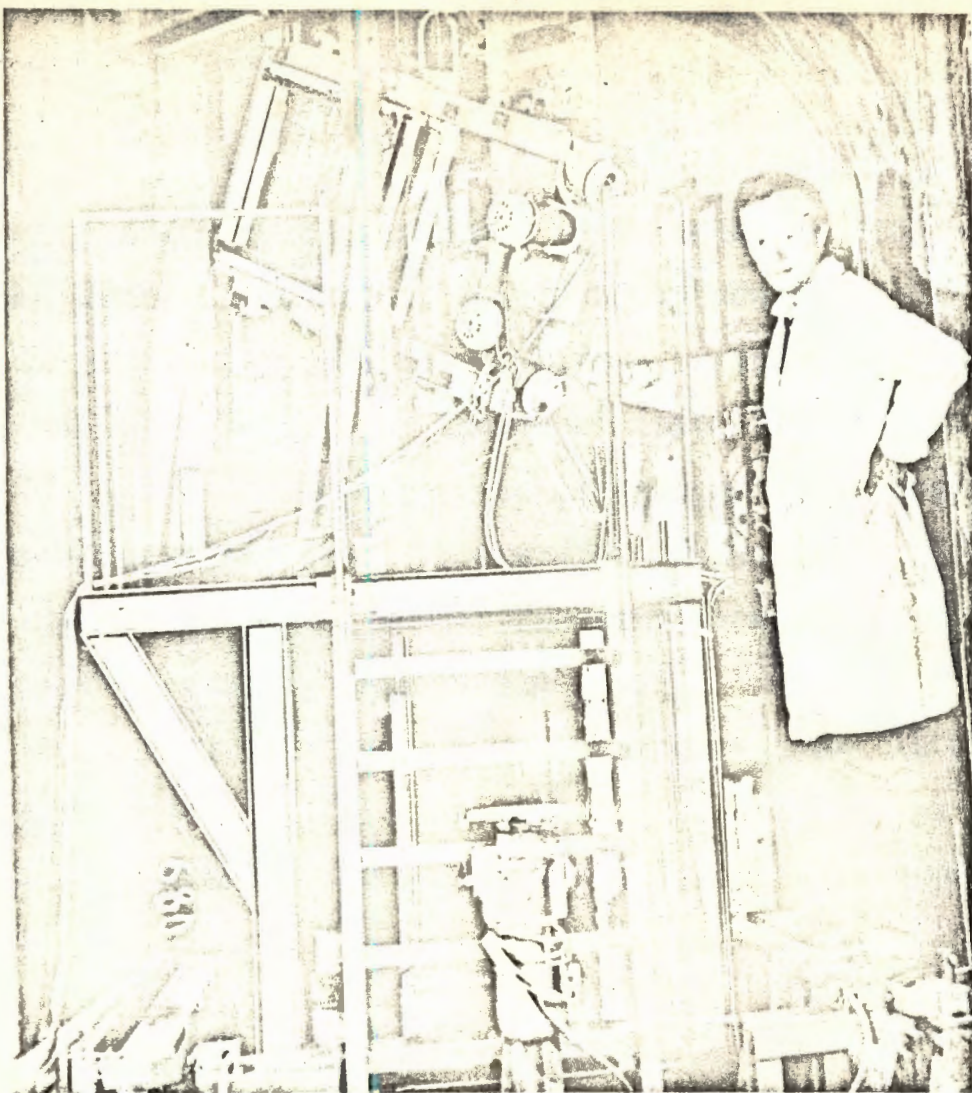


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки ЭПОС-2.

1 - откатная тележка, 2,3 - сборная ферма, 4 - механизм перемещения, 5 - открытая часть активной зоны ИБР-2, 6 - стационарный отражатель, 7 - регулируемые упоры, 8 - электродвигатель тележки, 9 - электродвигатели механизма перемещения, 10 - датчики положения.



Погрешность измерения линейного перемещения кареток не превышала 0,1 мм. Имелись индикаторы конечных положений.

На каретках собирались различные варианты модуляторов реактивности ОПО и ДПО в виде "решетки" (рис. 1) из стали и бериллия, ОПО в виде сплошного куска стали прямоугольного и непрямоугольного сечения (рис. 4), имитаторы штатных ОПО и ДПО. Изучалось влияние возможных конструктивных изменений: наклона, зазоров, наличие кожуха, замедлители и т.д.

Модуляторы реактивности из стали собирались из отдельных элементов сечением 18x18 мм и длиной 500 мм. Рисунки геометрических схем модуляторов реактивности (рис. 6-12) выполнены в масштабе 1:10.

### 3. Методика измерений

Все измерения проходились в подкритическом режиме реактора. Вначале на отодвинутой тележке набирался очередной вариант. Каретки с собранным вариантом сдвигались вправо от активной зоны. Активная зона реактора при этом была закрыта защитной дверью. Затем дверь открывали и тележку дистанционно придвигали к активной зоне до упоров и закрывали защитную дверь. Далее все измерения проводились дистанционно с пульта управления реактором. Решетки устанавливались в положение максимальной реактивности с контролем по датчику положения и по скорости счета нейтронных детекторов. Затем, поднимая компенсирующие блоки, выводили реактор на умножение порядка 1000. Сдвигая шагами одну из решеток, снимали кривую изменения реактивности  $K(X)$ . Реактивность в каждой точке определяли методом обратного умножения по скорости счета двух нейтронных детекторов (камеры деления с  $^{235}\text{U}$ ) - штатных пусковых каналов № 1 и № 2. Камеры размещены в биологической защите реактора

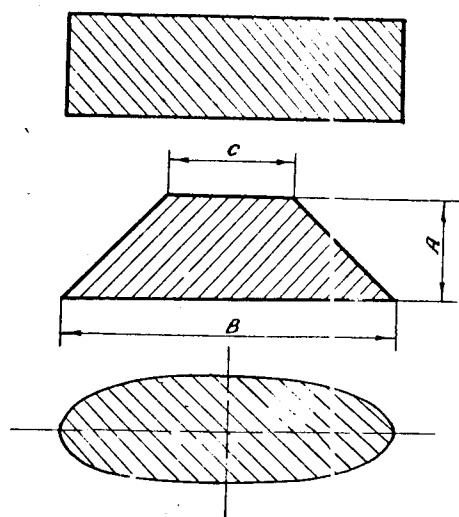


Рис. 4. Формы поперечного сечения гомогенных модуляторов реактивности.

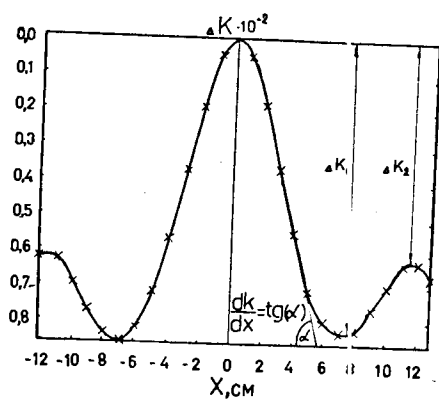


Рис. 5. Кривая реактивности модулятора реактивности гетерогенной структуры, где  $X$  - экспериментальные точки, сплошная кривая - результат интерполяции сплайнами третьего порядка.

на расстоянии 1150 мм от центра активной зоны со стороны, противоположной модулятору реактивности.

Изменение реактивности ( $\Delta K$ ) от смещения модулятора реактивности из одного положения в другое есть:

$$\Delta K = N_0 \cdot (1/N_1 - 1/N_2) \quad (2),$$

где  $N_1$  и  $N_2$  - скорости счета детектора в первом и во втором положениях модулятора,  $N_0$  - эффективный "нулевой счет", определяемый по той же формуле (2) для каждого детектора путем измерения скорости счета в двух положениях блока регулирования с известной эффективностью. Градуировка блока регулирования производилась методом разгона реактора с контролем реактивности по показаниям реактиметра. Значение  $\Delta K$  усреднялось по двум измерительным каналам. Погрешность в определении  $\Delta K$  складывается из систематической погрешности градуировки реактивности  $\pm 5\%$  и погрешности измерения скорости счета, составляющей 1-2%.

При изменении состояния реактора перед началом счета давалась выдержка 2-3 минуты до установления постоянного уровня мощности.

Форма кривой реактивности с двух измерительных каналов обрабатывалась на ЭВМ СДС 6500. Строилась зависимость  $K(X)$  с помощью интерполяции её кубическими сплайнами. С зависимостью  $K(X)$  численно интегрировалась система уравнений кинетики реактора в рамках одноточечной модели:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{[\kappa(X) - 1 - \beta] \cdot N(t)}{\tau} + \frac{\sum \lambda_i c_i}{\tau} \quad (3),$$

при этом из критического условия

$$M \cdot \beta / T_p + \beta / |\epsilon_p| = 1 \quad (4)$$

находили равновесную импульсную надкритичность и определяли форму импульса мощности в критическом состоянии при заданной конфигурации модулятора и других параметрах реактора (скорости  $M_p$ , частоте повторения всплесков мощности, времена жизни мгновенных нейтронов). В ф-ле (4)  $|\epsilon_p| = \Delta K_{MP} - \epsilon_{mo}$ ,  $\Delta K_{MP}$  - полная эффективная реактивность модулятора,  $\epsilon_{mo}$  - равновесная импульсная надкритичность,



,  $M$  - фактор умножения нейтронов источника в импульсе (интегральный параметр реактора, зависящий и от  $\beta_{\text{тo}}$ ),  $T_p$  - период повторения импульсов в реакторе.

Для сравнения всех измеренных вариантов между собой мы рассматривали следующие параметры модулятора: 1 - полуширину импульса мощности,  $C_{4/2}$ , 2 - производную реактивности по перемещению в момент максимума мощности реактора,  $dk_1(x)/dx$ , 3 - глубину модуляции главного максимума реактивности  $\Delta K_1$ , 4 - разницу между двумя соседними максимумами реактивности,  $\Delta K_2$ , 5 - равновесную импульсную надкритичность,  $\beta_{\text{тo}}$  (рис. 5).

#### 4. Исследование однородных модуляторов реактивности

Основные результаты измерений эффектов реактивности для однородных подвижных отражателей приведены в табл. I. Эти измерения дополняют проведенные ранее (см. /1,2/). Зависимость  $\alpha$  от формы однородного подвижного отражателя (рис. 4) оказалась довольно слабой, разность между лучшим из измеренных вариантов (I-7Г, обратная трапеция  $30^\circ$ ) и худшим (I-5Г, трапеция  $60^\circ$ ) составила всего 20%. Скругление углов прямоугольного подвижного отражателя (вар. I-1г и I-2Г) уменьшает  $\alpha$  на 3%. При моделировании на стенде ЭПОС-2 штатного подвижного отражателя ИБР-2 (вариант I-8)  $\alpha$  получилось на 15% больше, чем для штатного модулятора, изученного во время физического пуска реактора. Здесь надо заметить, что в штатном варианте (U-0) и в модели штатного (I-8) были разные толщины отражателей - соответственно 60 мм и 54 мм, и в модельном варианте не было кожуха подвижного отражателя с мембраной.

Вертикальное перемещение отражателя (I-8В) уменьшает  $\alpha$  на 30% по сравнению с горизонтальным (I-8Г), а наклонное, под углом  $26^\circ$  к горизонтали (I-8И), увеличивает  $\alpha$  на 10%.

Таблица I

Эффекты реактивности гомогенных модуляторов  
реактивности

№	Вариант	$\alpha, 10^{-4} \text{ см}^{-2}$		$\Delta K_{\text{ОПО}}, \%$	Примечание
		I канал	2 канал		
I	-	0,798	-	2,65	Штатный МР ИБР-2
2	I-1Г	0,988	1,004	3,30	Сечение ОПО, прямоугольник 234x54 мм, ДПО - "вилка"
3	I-2Г <sup>х</sup>	1,045	1,095	3,01	ОПО-прямоугольник 198x54 мм, ДПО - "вилка"
4	I-2Г	1,014	1,036	2,95	ОПО-эллипс, ДПО-"вилка"
5	I-3Г	0,970	1,031	3,10	ОПО - трапеция 30°, ДПО - "вилка"
6	I-4Г	0,874	0,920	2,55	ОПО - трапеция 45°, ДПО - "вилка"
7	I-5Г	0,893	0,889	2,65	ОПО - трапеция 60°, ДПО - "вилка"
8	I-6Г	0,818	0,846	3,40	ОПО-прямоугольник 234x54 мм, ДПО - отсутствует
9	I-7Г	1,121	1,139	3,01	ОПО - обратная тра- пеция 30°, ДПО - "вилка"
10	I-8ГЗ	0,849	0,842	2,86	Модель штатного МР, + 50 мм замедлителя (H <sub>2</sub> O), + 10 мм карбида бора
11	I-8НЗ	0,925	0,931	2,77	То же с наклоном на 26° относительно го- ризонтиали
12	I-8ВЗ	0,587	0,612	2,70	Вертикальное движе- ние МР
13	I-9НЗ	0,876	0,794	3,23	Клинообразная форма лопасти (расширение вниз с 140 до 330мм) ДПО-трехзубец, замед- литель с прослойкой поглотителя

Продолжение таблицы № I

I4	I-IONЗ	0,901	0,919	2,67	ОПО из титана 234x68 мм ДПО - "трезубец", замедлитель с прослой- кой поглотителя
I5	I-IINЗ	0,831	0,849	2,45	ОПО из алюминия 234x50 мм ДПО - "трезубец", замедлитель с прослой- кой поглотителя

Геометрические схемы модуляторов реактивности I-ой серии опытов приведены на рис. 6 и 7.

Последний результат несколько неожиданен. Наклонный вариант, на первый взгляд, должен давать несколько меньшее значение  $\alpha$ , чем горизонтальный. Такой результат пока не понят. Если лопасть ОПО сделать расширяющейся вниз со 140 до 330 мм (клинообразная форма, вариант I-9НЗ), то это приведет к снижению  $\alpha$  на 10%.

В конце программы с однородными модуляторами реактивности были измерены два варианта с ОПО из титана (толщина 68 мм) и алюминия (толщина 50 мм). Подвижные отражатели из алюминия и железа мало отличаются (в пределах ошибки) по величине  $\alpha$ . Титановый отражатель после пересчета на одинаковую толщину оказывается заметно хуже железного (на 20%).



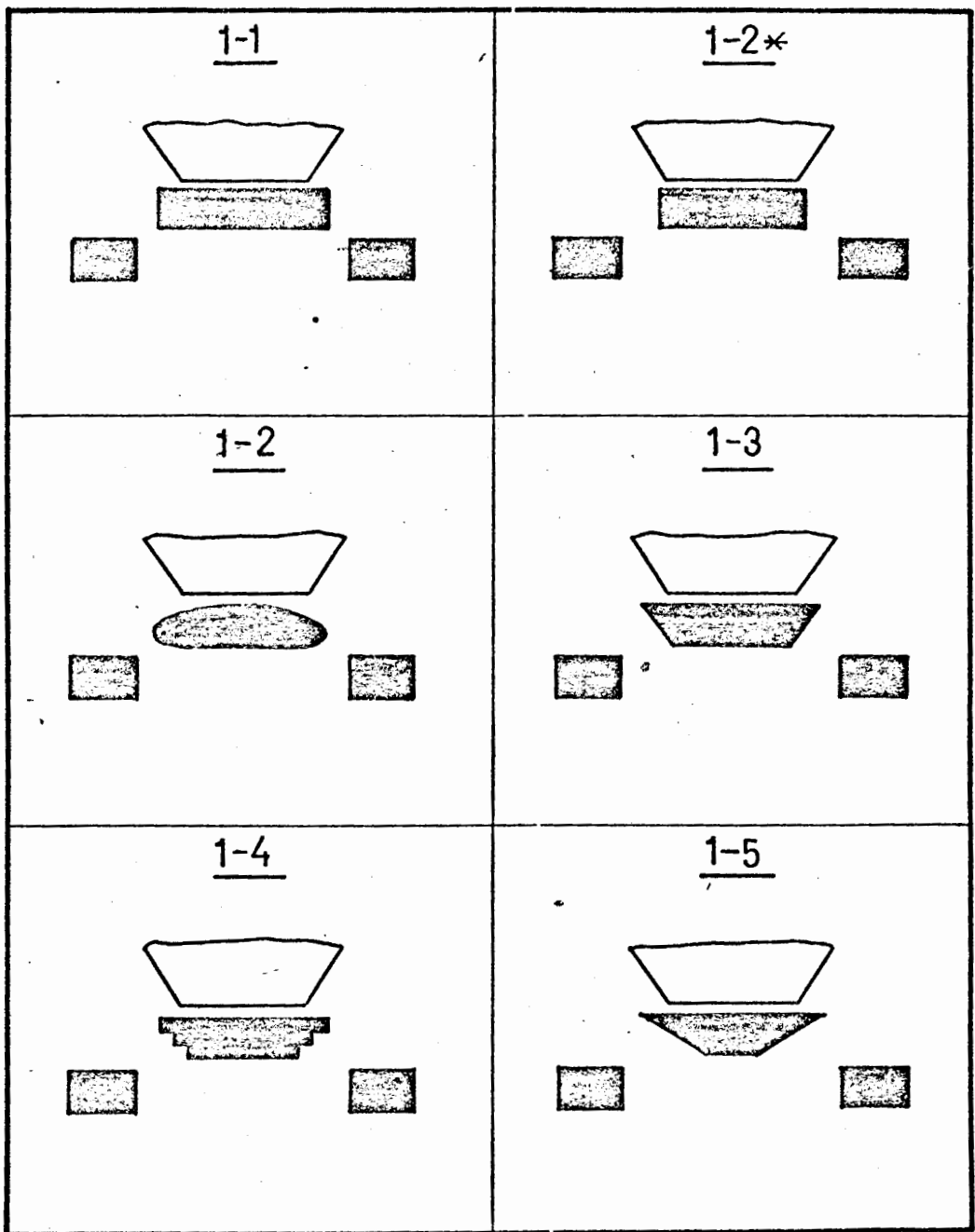


Рис. 6. Геометрические схемы модуляторов реактивности I-й серии опытов.

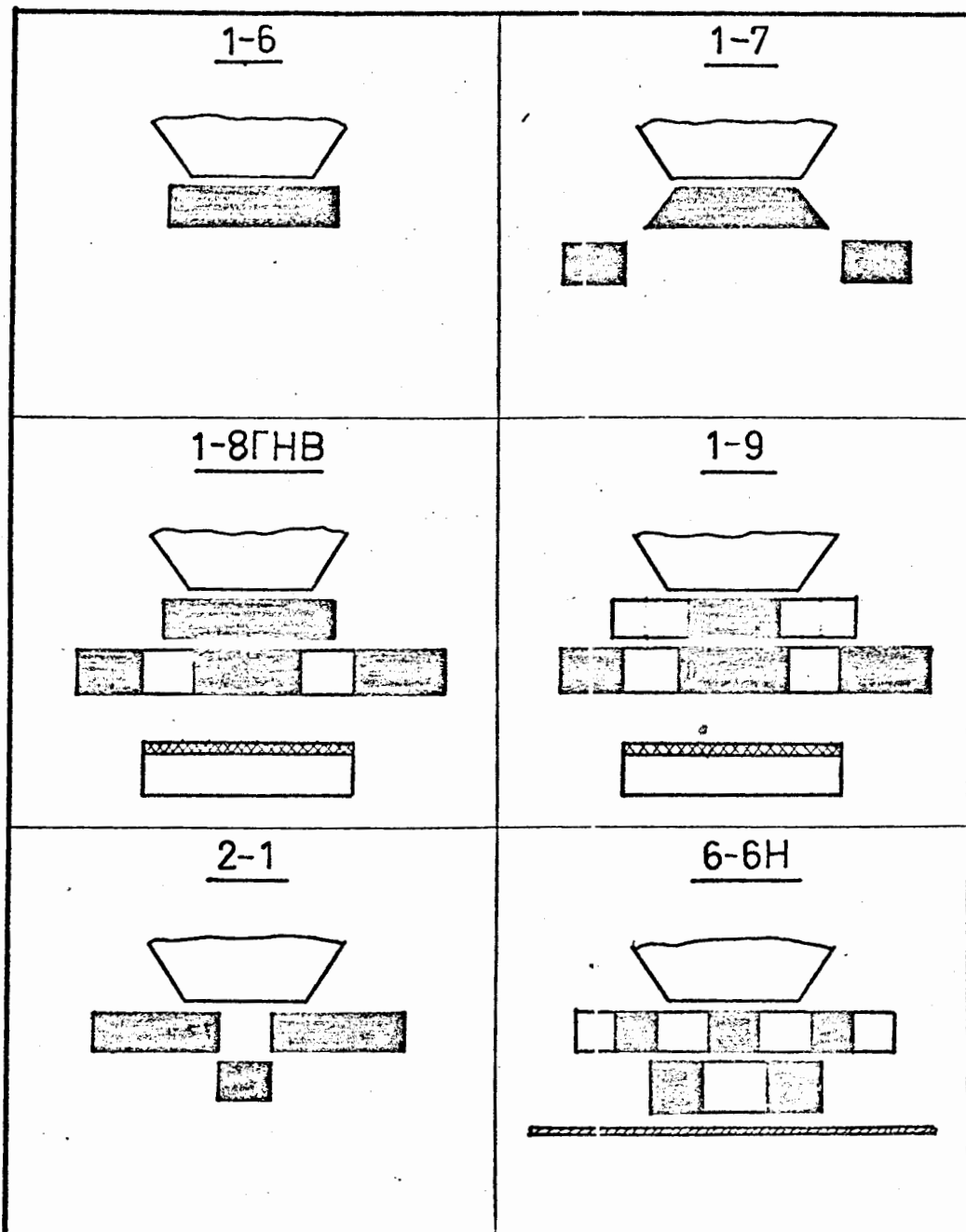


Рис. 7. Геометрические схемы модуляторов реактивности I-й и 6-й серии опытов.

## 5. Исследование гетерогенных модуляторов реактивности

### 5.1. Изучение "решеток" из бериллия.

В 3-й серии опытов измеряли  $K(X)$  для восьми вариантов модулятора реактивности из бериллия. Результаты экспериментов и расчетов характеристик реактора с такими модуляторами реактивности приведены в табл.2. Геометрия экспериментов представлена на рис. 8,9. Все рисунки выполнены в масштабе 1:10.

Первые же измерения  $K(X)$  для гетерогенного модулятора реактивности из бериллия показали правильность первоначальной идеи и значительный выигрыш в полуширине импульса мощности по сравнению с гомогенным вариантом. Отсутствие бериллиевых блочков, необходимых размеров, не позволило провести полную оптимизацию размеров бериллиевой "решетки". Из табл. 2 видно, что лучшим из измеренных вариантов является вариант 3-5. Оптимальное число зубьев для модулятора реактивности в виде "решетки" будет 3 - для ближнего к активной зоне (ОПО) и 2 - для ДПО. Оптимальная толщина для "решетки" ОПО будет лежать между 20 и 40 мм. Толщина ДПО может быть 50-80 мм и определяется скорее конструктивными соображениями. Вариант 3-8 интересен с точки зрения получения эффекта самогашения импульсов мощности в импульсном реакторе периодического действия (см. /4/) из-за близости максимумов реактивности. Вообще, для получения кривой реактивности с близкими по высоте максимумами ( $\Delta K_2 \rightarrow 0$ ) необходимо, чтобы число зубьев решетки (в смысле длительности импульса) было больше оптимального - 4 и 3 или 5 и 4.



Таблица 2

Результаты исследований гетерогенных  
модуляторов реактивности из бериллия

№	Вариант		$\frac{dK}{dx} (\text{см}^{-1}) 10^{-3}$	$\tau_{1/2}, \text{мкс}^*$	$\Delta K_1, 10^{-2}$	$\Delta K_2, 10^{-2}$	$\epsilon_{\text{ср}}, 10^{-3}$
1	3 - 1	ОПО	1,5-1,6	142 $\pm$ 2	0,48	0,39	0,190
		ДПО	1,1-1,2	159 $\pm$ 2	0,37	0,22	0,194
2	3 - 2	ОПО	1,3-1,4	149,5 $\pm$ 2	0,36	0,17	0,197
		ДПО	1,0-1,1	161 $\pm$ 2	0,31	0,05	0,165
3	3 - 3	ОПО	1,5-1,6	137,5 $\pm$ 2	0,47	0,35	0,200
		ДПО	1,1-1,2	159 $\pm$ 2	0,40	0,30	0,194
4	3 - 4	ОПО	1,65-1,75	129 $\pm$ 2	0,51	0,36	0,204
		ДПО	1,3 -1,4	146 $\pm$ 2	0,44	0,30	0,191
5	3 - 5	ОПО	1,85-1,95	128 $\pm$ 2	0,87	0,63	0,208
		ДПО	1,45-1,55	146 $\pm$ 1	0,71	0,48	0,181
6	3 - 6	ОПО	1,4-1,45	154 $\pm$ 2	0,41	0,23	0,183
		ДПО	1,35-1,4	153 $\pm$ 2	0,38	0,30	0,183
7	3 - 7	ОПО	0,30-0,40	-	0,15	0,15	-
		ДПО	0,1 - 0,2	-	0,11	0,10	-
8	3 - 8	ОПО	1,8 -2,05	123 $\pm$ 2	0,89	0,74	0,217
		ДПО	1,4-1,55	-	0,65	0,07	0,186

\* Расчет полуширины импульса  $\tau_{1/2}$  проведен для  $f = 5 \text{ Гц}$ ,  $\tau = 80 \text{ нс}$ ,  $v_{\text{взаимн}} = 157,0 \text{ м/с}$

Геометрические схемы модуляторов реактивности 3-й серии опытов приведены на рис. 8, 9. Оценка  $dK/dx$  проведена графическим путем (по графику  $K(x)$ ) при сдвиге модулятора на 3 см.

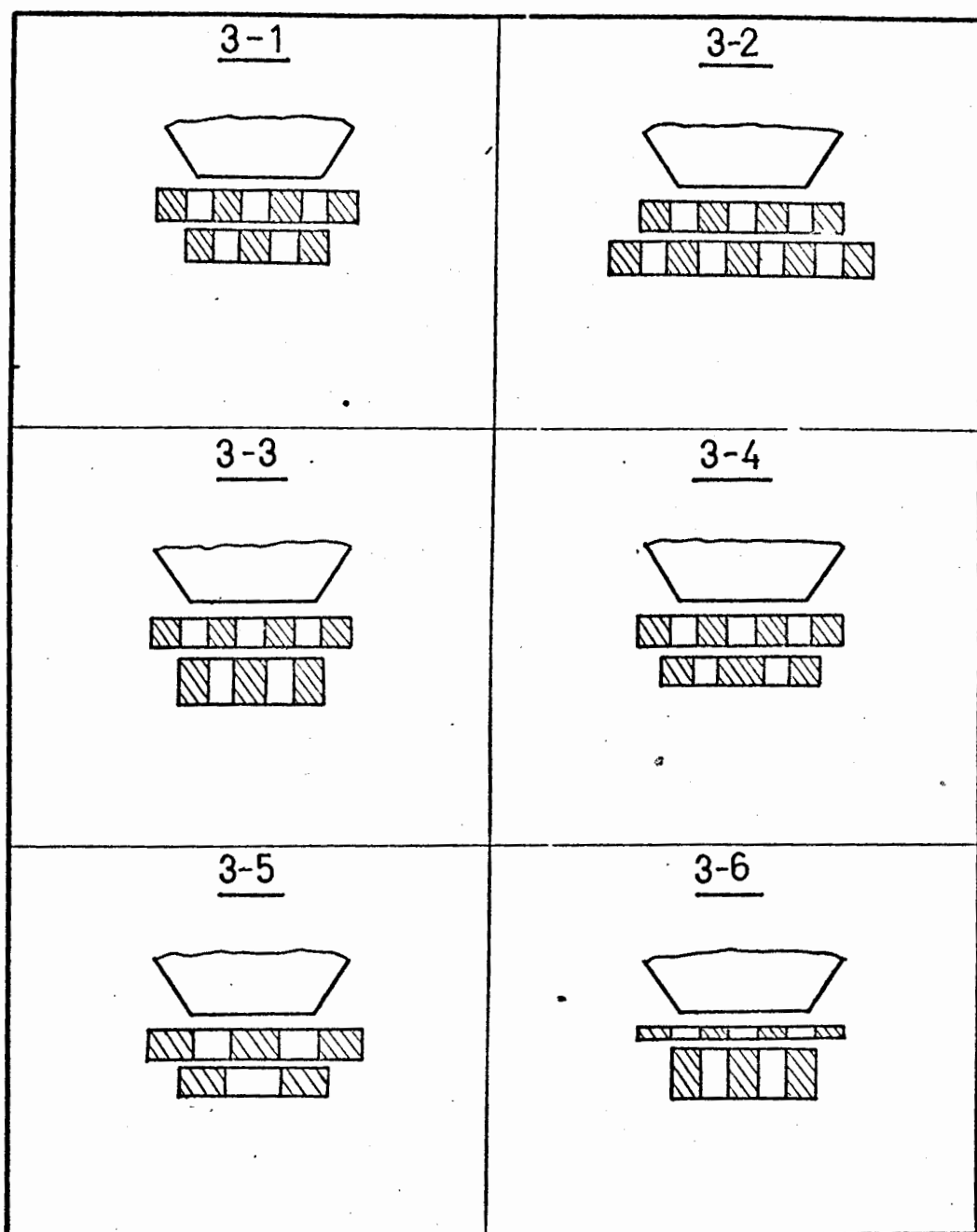


Рис. 8. Геометрические схемы модуляторов реактивности 3-й серии опытов (модулятор реактивности из бериллия).

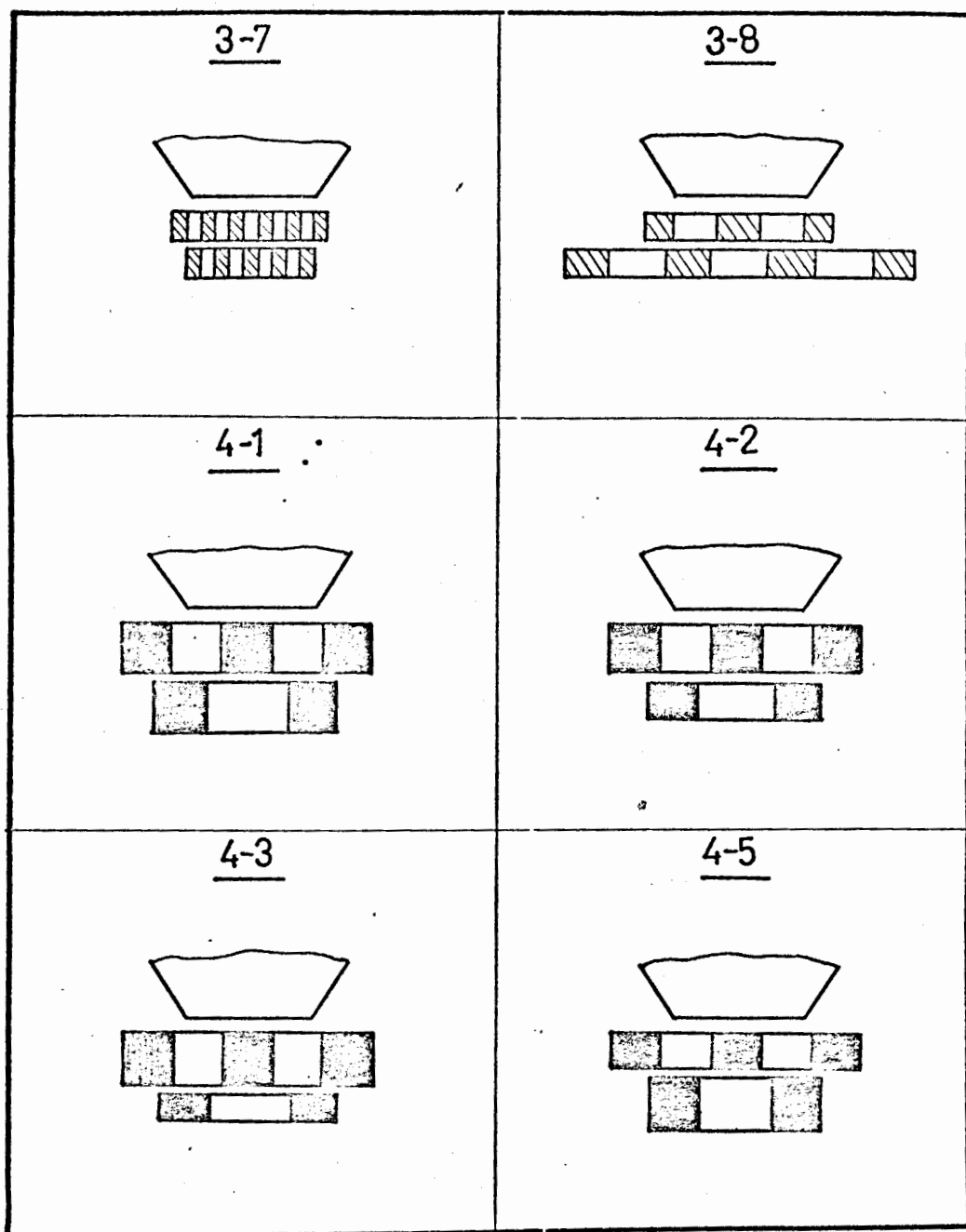


Рис. 9. Геометрические схемы модуляторов реактивности 3-й и 4-й серии опытов.

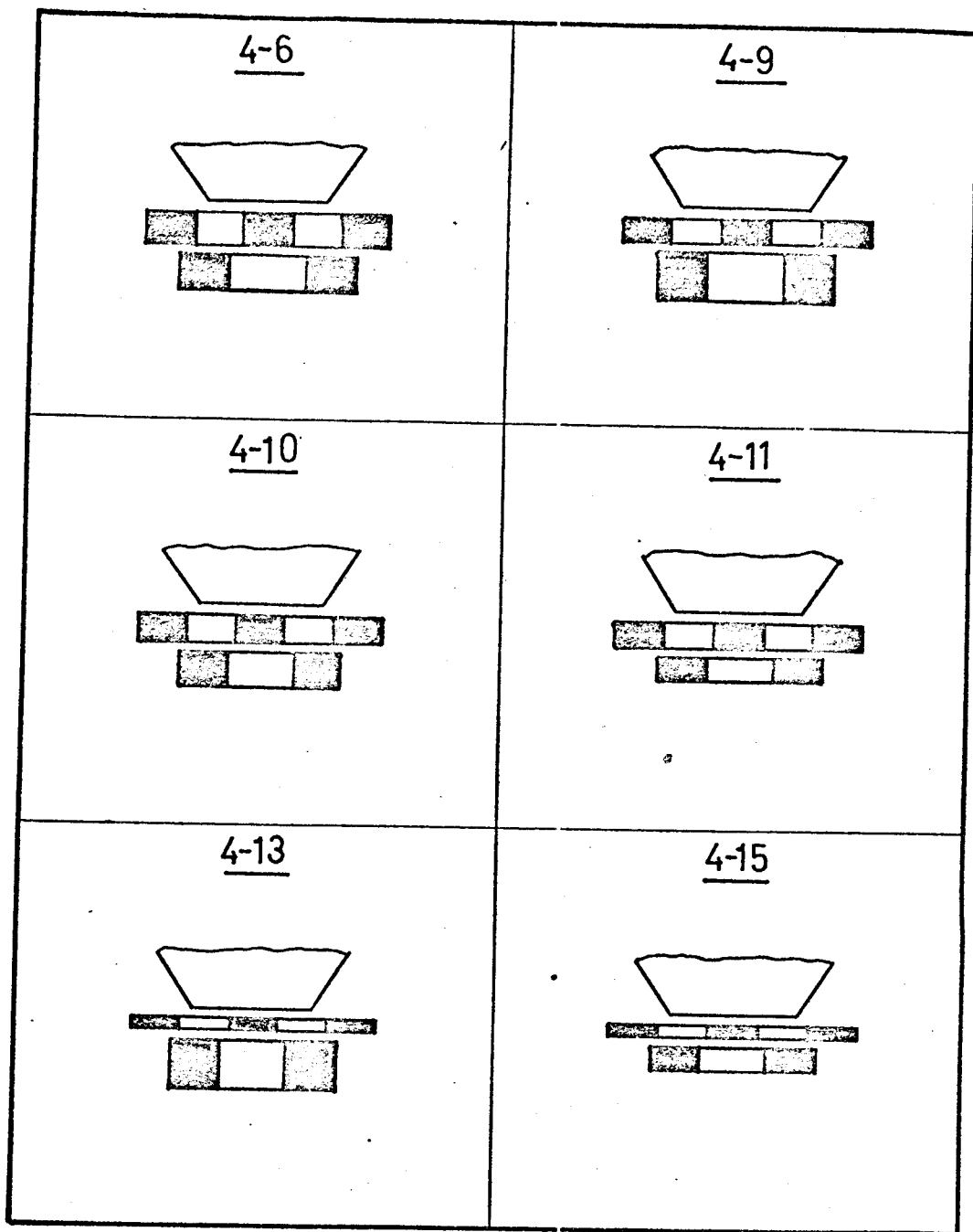


Рис. 10. Геометрические схемы модуляторов реактивности 4-й серии опытов.

## 5.2. Изучение решеток из стали.

В 4-й серии опытов проводили выбор оптимальной толщины элементов модулятора реактивности (табл.3); зависимость от толщины элементов модулятора оказалась довольно слабой. В интервале толщины ОПО от 18 мм до 72 мм изменение  $dK/dx$  не превышает 40%. Оптимальная толщина ОПО для стали составляет 50-60 мм (вариант 4-5). По толщине ДПО оптимум не обнаружен.

В 5-й серии выбирали оптимальный шаг "решетки" и число зубьев. Из табл. 4 можно заключить, что оптимальное число зубьев 3 - для ОПО и 2 - для ДПО. Вообще оптимальное число зубьев на ОПО и ДПО зависит от того, какой из них вращается быстрее. Быстрее вращающийся модулятор должен иметь нечетное число зубьев - 3 или 5. Другой же - 2 или 4. Увеличение числа зубьев дает прирост второго импульса реактивности, что будет способствовать самогашению импульсов мощности. Для ОПО ширина зуба равна промежутку между ними, а для ДПО промежуток между зубьями должен быть несколько шире, чем ширина зуба ОПО. В этой серии оптимальным оказался вариант (4-5) или (6-1), т.е. лучший шаг решетки 70-80 мм.

В предыдущих экспериментах измеряли кривую реактивности при смещениях только ОПО или только ДПО. Для ОПО величина всегда больше, чем для ДПО. Для практики важно знать кривую  $K(X)$  при взаимном перемещении ОПО и ДПО навстречу друг другу. Для такого рода перемещения значение  $dK/dx$ , как было проверено, лежит в промежутке между движением только ОПО и ДПО; при равной скорости ОПО и ДПО - несколько ближе к ДПО. В последующих экспериментах снимали кривую  $K(X)$  как для ОПО, так и для взаимного перемещения ОПО и ДПО навстречу друг другу, как при равной скорости, так и при соотношениях скоростей 3:1.

Таблица 3

Результаты измерений по выбору оптимальной  
толщины элементов модулятора реактивности из стали

№	Вариант		$\frac{dK}{dX} \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$	$\Theta_{1/2}, \text{ мкс}^*$	$\Delta K_1 \cdot 10^{-2}$	$\Delta K_2 \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon_{\text{мс}} \cdot 10^{-2}$
1	4-1	ОПО	1,0-1,1	164 ± 2	0,60	0,44	0,154
		ДПО	0,7-0,8	212 ± 2	0,43	0,26	0,113
2	4-2	ОПО	1,0-1,1	164 ± 2	0,65	0,44	0,156
		ДПО	0,7-0,75	214 ± 2	0,41	0,26	0,112
3	4-3	ОПО	1,0-1,05	173 ± 2	0,55	0,42	0,150
		ДПО	0,65-0,7	-	0,35	-	-
4	4-5	ОПО	1,2-1,25	160 ± 2	0,61	0,38	0,155
		ДПО	0,8-0,85	210 ± 2	0,48	-	0,115
5	4-6	ОПО	1,1-1,15	166 ± 2	0,60	0,38	0,158
		ДПО	0,6-0,7	-	0,46	-	-
6	4-9	ОПО	1,05-1,1	166 ± 2	0,57	0,29	0,151
		ДПО	0,75-0,8	-	0,51	-	-
7	4-10	ОПО	1,0-1,05	166 ± 2	0,57	0,30	0,167
		ДПО	0,6-0,7	-	0,51	-	-
8	4-11	ОПО	1,0-1,05	171 ± 2	0,53	0,29	0,161
		ДПО	0,65-0,7	-	0,44	-	-
9	4-13	ОПО	0,8-0,85	182 ± 2	0,45	0,16	0,151
		ДПО	0,55-0,60	-	0,47	0,47	-
10	4-15	ОПО	0,7-0,75	192 ± 2	0,41	0,13	0,150
		ДПО	0,6-0,65	-	0,36	0,21	-

\* Расчет полуширины импульса  $\Theta_{1/2}$  проведен для  $f = 5 \text{ Гц}$ ,  $\tau = 80 \text{ нс}$ ,  $V_{\text{вз}} = 157,0 \text{ м/с}$ ; геометрические схемы модуляторов реактивности 4-й серии опытов приведены на рис. 9, 10.



Таблица 4

Результаты измерений по выбору параметров шага решетки

№	Вариант		$\frac{dK}{dx}, 10^{-3} \text{ см}^{-1}$	$\sigma_{1/2}, \text{ мкс}^*$	$\Delta K_1, 10^{-2}$	$\Delta K_2, 10^{-2}$	$\varepsilon_{\text{по}}, 10^{-2}$
1	5-1	ОПО	0,9-1,0	176 $\pm$ 2	0,34	0,13	0,145
		ОПО- ДПО	0,8-0,85	-	0,33	0,13	-
2	5-2	ОПО	0,8-0,85	187 $\pm$ 2	0,38	0,33	0,147
		ОПО- ДПО	0,6-0,65	-	0,23	0,08	-
3	5-3	ОПО	0,95-1,05	178 $\pm$ 2	0,65	0,23	0,149
		ОПО- ДПО	0,8-0,85	194 $\pm$ 2	0,58	0,30	0,131
4	5-4	ОПО	0,5-0,65	222 $\pm$ 3	0,54	0,62	0,109
		ОПО- ДПО	0,6-0,65	-	0,50	0,40	-
5	4-5*	ОПО	1,15-1,20	163 $\pm$ 2	0,61	0,43	0,150
		ОПО- ДПО	0,85-0,95	186 $\pm$ 2	0,51	0,40	0,143

\* Расчет пошулирины импульса  $\sigma_{1/2}$  проведен для  $f = 5 \text{ Гц}$ ,  $\tau = 80 \text{ нс}$ ,  $v_g = 157 \text{ м/с}$ .

Геометрические схемы модуляторов реактивности 5-ой серии опытов приведены на рис. II.

### 5.3. Изучение влияния конструкционных элементов.

В 6-ой серии проверяли влияние различных конструкционных деталей и зазоров на параметры модуляции модулятора оптимальной конфигурации варианта 4-5\*. В последующих измерениях он обозначен 6-1 (см. табл. 5). Результаты получились такие:

Таблица 5

Результаты измерения по исследованию влияния различных конструкционных деталей и зазоров<sup>жж)</sup>

№	Вариант	$\frac{dK}{dx}, 10^{-3} \text{ см}^{-1}$	$\Theta_{4/2}, \text{ мкс}^{\#}$	$K_1, 10^{-2}$	$K_2, 10^{-2}$	$\epsilon_{\text{мо}}, 10^{-2}$	Примеч.	
1	6-1Г	ОПО	1,15-1,20	163 $\pm$ 2	0,61	0,43	$\delta_1 = 0,8 \text{ см}$	
	(4-5 <sup>ж</sup> )	ОПО- ДЮ	0,85-0,95	186 $\pm$ 2	0,51	0,40		
2	6-1В	ОПО	0,6-0,7	218 $\pm$ 3	0,32	0,21	-	
		ОПО- ДЮ	0,6-0,65	-	0,32	0,10		
3	6-1Н	ОПО	0,95-1,0	175 $\pm$ 2	0,46	0,18	0,160	
4	6-2Г	ОПО- ДЮ	0,75-0,80	201 $\pm$ 3	0,53	0,31	0,132	$\delta_1 = 1,3 \text{ см}$
5	6-3Г	ОПО- ДЮ	0,85-0,90	182 $\pm$ 2	0,49	0,30	0,151	$\delta_0 = 1,0 \text{ см}$
6	6-4Н	ОПО	0,7-0,8	201 $\pm$ 3	0,37	0,30	0,137	
		ОПО- ДЮ	0,7-0,75	-	0,36	0,23		
7	6-5Н	ОПО	0,75-0,85	190 $\pm$ 3	0,42	0,31	0,140	
		ОПО- ДЮ	0,8-0,9	186 $\pm$ 2	0,46	0,38		
8	6-6Н	ОПО	0,75-0,85	193 $\pm$ 2	0,43	0,38	0,140	

\*) Расчет полуширины импульса  $\Theta_{4/2}$  проведен для  $f' = 5 \text{ Гц}$ ,  $\tau = 80 \text{ нс}$ ,  $v_g = 157 \text{ м/с}$ .

жж) Геометрические схемы модуляторов реактивности 6-й серии опытов приведены на рис. 11, 12.

$\delta_0$  - расстояние между активной зоной и модулятором реактивности,  $\delta_1$  - расстояние между элементами модулятора (ОПО и ДЮ).

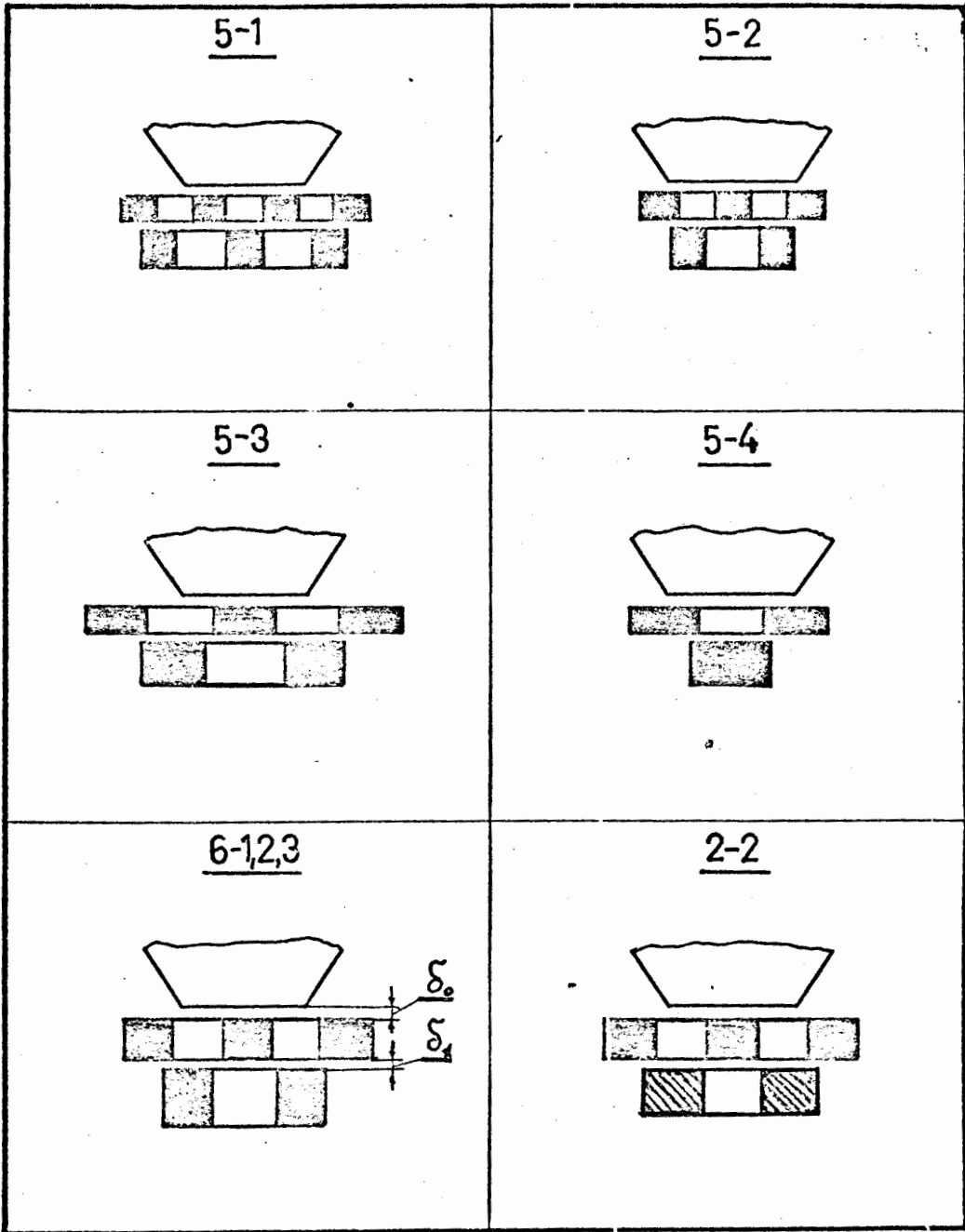


Рис. II. Геометрические схемы модуляторов реактивности 5,6 и 2 серий опытов,  
 $\delta_0$  - расстояние между активной зоной и модулятором,  
 $\delta_1$  - расстояние между элементами модулятора.

а) изменение зазора между решетками ОПО и ДПО с 8 мм до 13 мм ( $\delta_1$ ) приводит к уменьшению  $dK/dx$  на 10-15%,

б) увеличение зазора между активной зоной и ОПО ( $\delta_2$ ) с 5 мм до 10 мм приводит к уменьшению  $dK/dx$  на 10%,

в) изменение направления движения модулятора реактивности с наклонного на вертикальное приводит к уменьшению  $dK/dx$  на 25-35% (или увеличению  $\sigma_{1/2}$  на 13%),

г) изменение направления движения модулятора реактивности с горизонтального на наклонное ( $64^\circ$  относительно вертикальной оси реактора) приводит к уменьшению  $dK/dx$  на 20-23% (или увеличению  $\sigma_{1/2}$  на 10%),

д) установка клиньев с боковых торцов ОПО (увеличение ширины с 344 мм до 534 мм) приводит к незначительному снижению  $dK/dx$  (примерно 3-4%),

е) установка за модулятором реактивности водяного замедлителя толщиной 50 мм с прослойкой 10 мм карбида бора приводит к снижению  $dK/dx$  на 6-7% (или увеличению  $\sigma_{1/2}$  на 3-4%),

ж) установка за модулятором реактивности стального листа толщиной 10 мм, имитирующего кожух отражателя, приводит к снижению  $dK/dx$  на 5-8% (или увеличению  $\sigma_{1/2}$  на 4-5%),

з) замена стального ДПО модулятора реактивности на бериллиевый приводит к заметному возрастанию  $dK/dx$  примерно на 40%,

и) установка 10 мм прослойки из карбида бора за зубьями ОПО (вариант 2-3) в пределах ошибок измерений на параметры модулятора не влияет,

к) заключение бериллия в стальной кожух толщиной 10 мм в элементах ДПО (вариант 2-5) приводит к снижению  $dK/dx$  на 25% (или увеличению  $\sigma_{1/2}$  на 12%),

Таблица 6

Результаты измерений и расчетов по исследованию  
железо-бериллиевых решеток

№	Вариант		$\frac{d\kappa}{dx}, 10^{-3} \text{ см}^{-1}$	$\Theta_{1/2}, \text{ мкс}^{\text{ж}}$	$\Delta \kappa_1, 10^{-2}$	$\Delta \kappa_2, 10^{-2}$	$\epsilon_{\text{тн}}, 10^{-2}$
1	2-2Г	ОПО	1,6-1,7	$142 \pm 2$	0,76	0,43	0,194
		ОПО- ДПО	1,4-1,45	-	0,74	0,42	-
2	2-2ГЗам	ОПО	1,5-1,6	$146 \pm 2$	0,82	0,51	0,174
		ОПО- ДПО	1,2-1,3	$160 \pm 2$	0,69	0,40	0,169
3	2-2Н	ОПО	1,2-1,35	$156 \pm 2$	0,67	0,40	0,167
		ОПО- ДПО	1,15-1,20	-	-	-	-
4 <sup>жж</sup>	2-2Г <sup>(ж)</sup>	ОПО	1,7-1,8	143	0,85	0,49	0,174
		ОПО- ДПО	1,3-1,35	160	0,75	0,61	0,164
5	2-3Г	ОПО	1,65-1,75	$139 \pm 2$	0,86	0,48	0,179
6	2-4Г	ОПО	1,3-1,4	$155 \pm 3$	0,68	0,41	-
		ОПО- ДПО	1,05-1,1	-	0,57	0,31	-
7	2-5Н	ОПО	0,95-1,05	$175 \pm 2$	0,49	-	0,147
		ОПО- ДПО	0,9-0,95	$188 \pm 2$	0,50	-	0,147

ж) Расчет полуширины импульса  $\Theta_{1/2}$  проведен для  $f = 5$  Гц,  $\tau = 80$  нс,  $v_g = 157$  м/с.

Геометрические схемы модуляторов реактивности 2-й серии опытов приведены на рис. 11, 12.

жж) Увеличено расстояние между зубьями ДПО до 100 мм.

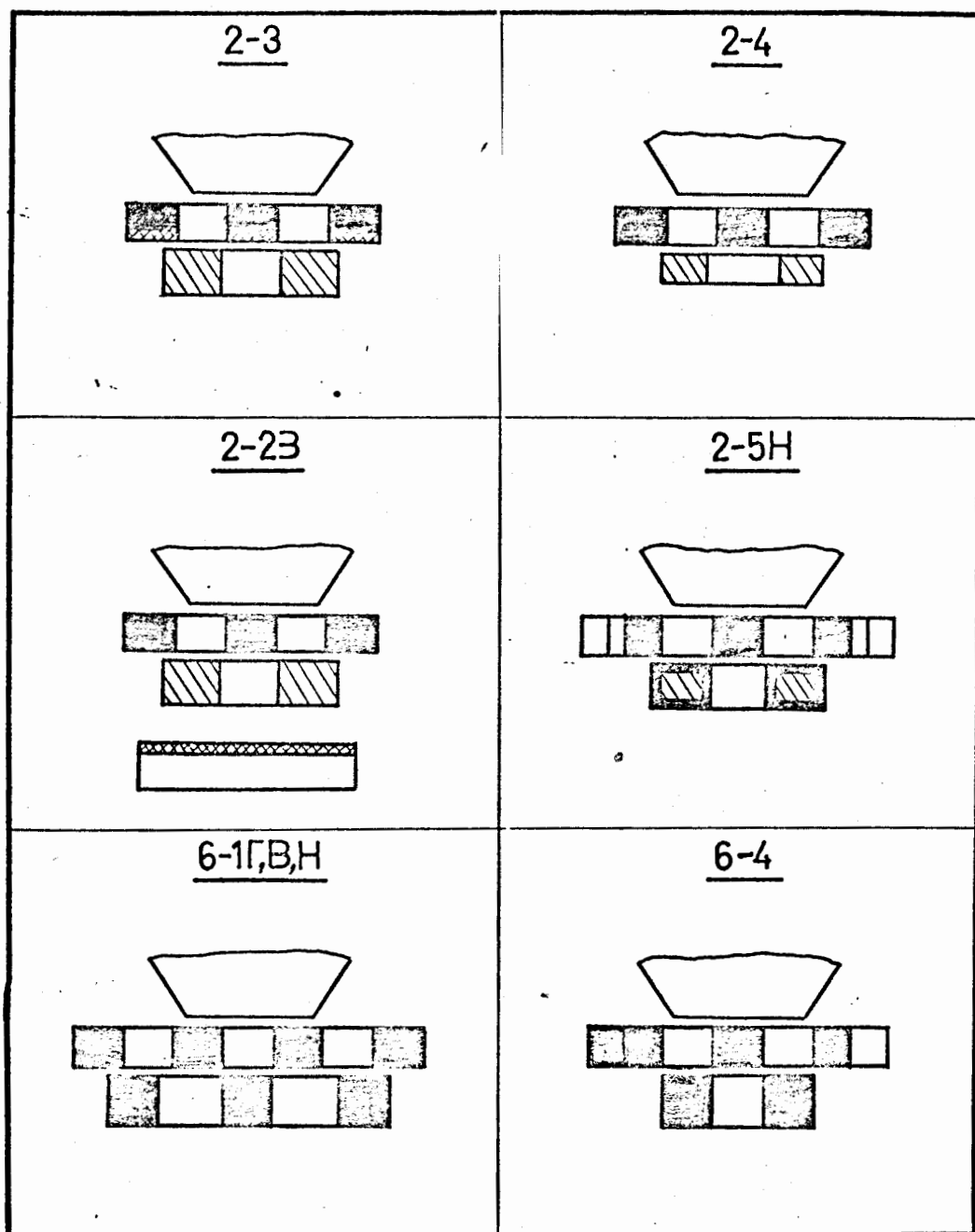


Рис. 12. Геометрические схемы модуляторов реактивности 2 и 6 серии опытов.



л) при движении ОПО со скоростью в 3 раза больше, чем ДПО ( $\Delta X_{\text{ОПО}} = 3 \cdot \Delta X_{\text{ДПО}}$ ) (вар. 2-5Н)  $dK/dx_{\text{башки}} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ . Это на 25% хуже, чем в варианте 2-2Н, где ОПО и ДПО движутся навстречу друг другу с одинаковой скоростью. На столько же хуже и глубина модуляции  $\Delta K_1$ ;

м) в варианте 6-3 изучалось влияние сдвига места встречи ОПО и ДПО из физического центра. Величина  $dK/dx$  постепенно возрастает и при сдвиге на 30 мм по ходу вращения ОПО достигает максимума (увеличивается на 15%), затем резко спадает.

## 6. Анализ результатов и выводы

Сравним между собой три модулятора: I-й штатный модулятор реактивности ИБР-2 образца 1979 года. Параметры реактора с таким модулятором:  $dK/dx_{\text{гом. ст.м.}} = (0,6-0,7) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ,  $\Delta K_{\text{нр}} = 3,2\%$ ,  $\Theta_{1/2} = 216 \text{ мкс}$  для  $f = 5 \text{ Гц}$ ,  $\tau = 80 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ,  $v_{\text{ОПО}} = 157 \text{ м/с}$ .

2 - модулятор реактивности гетерогенной структуры из стали. Параметры реактора с таким модулятором:  $dK/dx_{\text{ге ст.м.}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ,  $\Delta K_{\text{нр}} = 3,6\%$ ,  $\Delta K_1 = 0,65\%$ ,  $\Theta_{1/2} = 194 \text{ мкс}$  для  $f = 5 \text{ Гц}$ ,  $\tau = 80 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $v_{\text{ОПО}} = 107 \text{ м/с}$  ( $v_{\text{ДПО}} = 50 \text{ м/с}$ ).

3 - модулятор реактивности гетерогенной структуры из бериллия:  $dK/dx_{\text{бер макс}} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  ( $dK/dx_{\text{бер ст.м.}} = (2,2-2,3) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ),  $\Delta K_{\text{нр}} = 4,0\%$ ,  $\Delta K_1 = 0,9\%$ ,  $\Theta_{1/2} = 146 \text{ мкс}$  для  $f = 5 \text{ Гц}$ ,  $\tau = 80 \text{ нс}$ ,  $v_{\text{ОПО}} = 107 \text{ м/с}$ ,  $v_{\text{ДПО}} = 50 \text{ м/с}$ .

Выводы: 1. Модулятор реактивности гетерогенной структуры из бериллия имеет лучшие характеристики, чем штатный модулятор реактивности ИБР-2. 2. Модулятор реактивности гетерогенной структуры из стали имеет хорошие характеристики, но хуже, чем модулятор реактивности гетерогенной структуры из бериллия. 3. Модулятор реактивности гетерогенной структуры из бериллия имеет лучшие характеристики, чем модулятор реактивности гетерогенной структуры из стали.

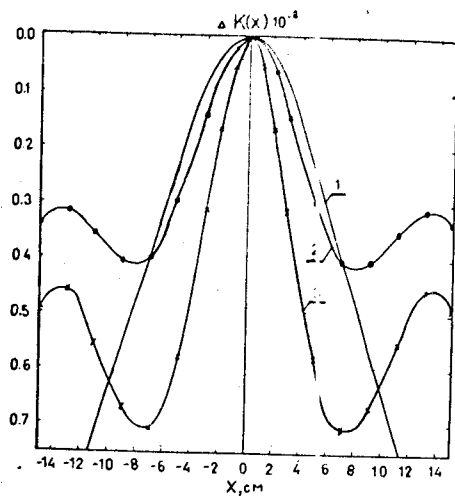


Рис. 13. Кривые изменения реактивности для трех типов модуляторов:  
 1 - штатный модулятор ИЕР-2 (модель 1979 г.),  
 2 - гетерогенный модулятор из стали (—●—●—),  
 3 - гетерогенный модулятор из бериллия (—×—×—)

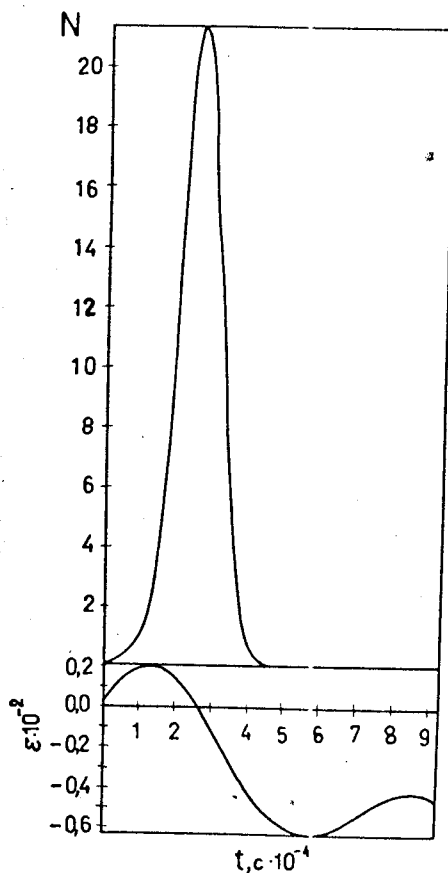


Рис. 14. Форма импульса мощности и кривая изменения реактивности для модулятора реактивности из бериллия (критическое состояние).

А поскольку скорость изменения реактивности у модулятора с гетерогенной структурой зависит от взаимной скорости ОПО и ДПО, а не скорости относительно активной зоны, как в случае гомогенного модулятора реактивности, следовательно с отражателем гетерогенной структуры можно получать более короткие импульсы при одинаковых скоростях ОПО и ДПО.

В табл. 7 приведены зависимости полуширины импульса мощности  $C_{1/2}$  от скорости ОПО относительно активной зоны реактора при скорости ДПО, равной 50 м/с для трех вышеуказанных модуляторов реактивности. В табл. 8 даны полные эффекты реактивности гетерогенных модуляторов.

Форма импульса мощности для всех трех вариантов практически не отличается. Для примера на рис. 14 приведена форма импульса мощности и кривая реактивности для гетерогенного модулятора из бериллия. Форма импульса мощности для 3 типов МР в логарифмическом масштабе приведена на рис. 15.

Приведем для сравнения значения уровня фона для трех типов модулятора:

$$\frac{W_p}{W_{max}} = \frac{\beta \cdot n \cdot C_{1/2}}{\Delta K_{MP}(\%)} = \frac{C_{1/2}}{\Delta K_{MP}} = \begin{cases} 7,2 \cdot 10^{-5} & (1) \\ 5,6 \cdot 10^{-5} & (2) \\ 3,5 \cdot 10^{-5} & (3) \end{cases}$$

$$\frac{W_p}{W_{cp}} = \frac{\beta}{\Delta K_{MP}} = \begin{cases} 6,8\% & (1) \\ 6,0\% & (2) \\ 5,4\% & (3) \end{cases}$$

Побочные импульсы мощности (спутники) для гетерогенного модулятора реактивности будут меньше по амплитуде, чем для гомогенного:

$$\frac{W_{сам}}{W_{фон}} = \frac{S/|\epsilon_{car}|}{S/|\epsilon_{фон}|} = \frac{\epsilon_{фон}}{\epsilon_{сам}} = \frac{|\epsilon_m - \Delta K_{MP}|}{|\epsilon_m - \Delta K_{ДПО}|} = \begin{cases} 4,45 & (1) \\ 3,60 & (2) \\ 3,65 & (3) \end{cases}$$

Таблица 7

Зависимость полуширины импульса от скорости модулятора реактивности для разных вариантов<sup>жж)</sup>

№	$v_{ж}$ (м/с)	Бериллиевая решетка		Стальная решетка		Штатный модулятор	
		$\theta_{1/2}$ , мкс	$\epsilon_{\bar{m}0}$ , $10^{-3}$	$\theta_{1/2}$ , мкс	$\epsilon_{\bar{m}0}$ , $10^{-3}$	$\theta_{1/2}$ , мкс	$\epsilon_{\bar{m}0}$ , $10^{-3}$
1	100	196	1,18	253	0,92	293	0,828
2	157	146	1,80	194	1,39	216	1,22
3	200	127	2,23	171	1,71	182	1,36
4	250	112	2,70	152	2,05	157	1,80
5	300	101	3,15	140	2,32	139	2,09
6	400	90	3,97	128	2,77	120	2,45
7	500	84	4,71	128	3,13	99,5	3,12

ж) Для решеток  $v$  означает взаимную скорость ОПО и ДПО, для гомогенного модулятора  $v$  - абсолютная скорость ОПО.

жж) Расчет выполнен для  $f = 5$  Гц,  $\tau = 80$  нс,  $v_{\text{ДПО}} = 50$  м/с

Таблица 8

Эффекты реактивности гетерогенных модуляторов

№	Вариант	$\Delta K, \%$		$\Delta K_{\text{МР}}, \%$	Примечание
		О П О	Д П О		
1	3-1	2,70	1,10	3,80	толщина ОПО Ве-Ве, ДПО 40/40 мм
2	3-5	2,80	1,20	4,00	Ве-Ве, 40/40 мм
3	4-5	2,45	1,15	3,60	Fe-Fe, 54/72 мм
4	6-2	2,30	1,05	3,35	Fe-Fe, 54/72 мм
5	6-3	2,25	1,10	3,35	Fe-Fe, 54/72 мм
6	6-5	2,51	1,10	3,61	Fe-Fe, 54/72 мм
7	2-2	2,50	-	-	Fe-Ве, 54/60 мм

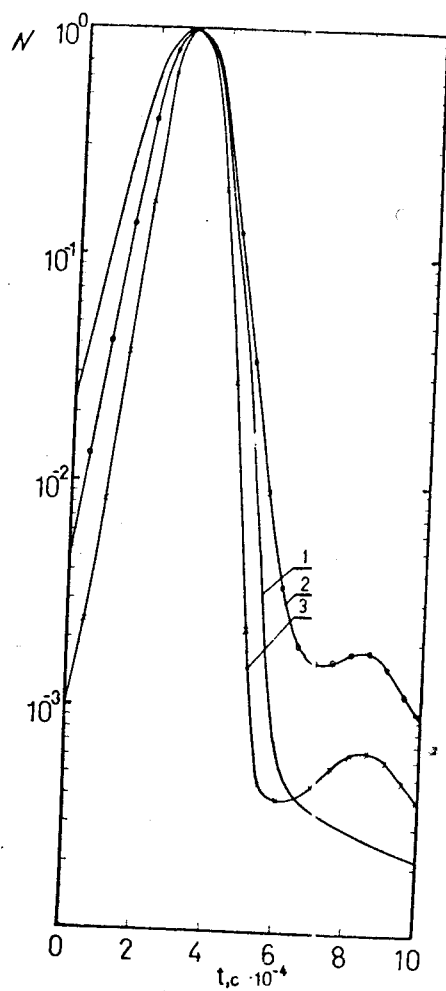


Рис. 15. Форма импульса мощности для трех типов модуляторов в логарифмическом масштабе.

- 1 - штатный модулятор ИБР-2 (модель 1979 г.)
- 2 - гетерогенный модулятор из стали,
- 3 - гетерогенный модулятор из бериллия.

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о реальной возможности создания модулятора реактивности гетерогенной структуры с лучшими параметрами, чем достигнутые в настоящее время.

В заключение сформируем основные полученные закономерности:

- 1) гетерогенный модулятор оптимальной конфигурации (геометрия варианта 4-5) имеет значительно лучшие параметры модуляции, чем штатный модулятор, образца 1979 года;
- 2) гетерогенный модулятор из бериллия дает  $dx/dx$  не менее чем в 2 раза больше, чем стальной модулятор;
- 3) оптимальное число зубьев на ОПО и ДПО зависит от того, какой из них вращается быстрее. Быстрее вращающийся модулятор должен иметь нечетное число зубьев - 3 или 5. Другой же - 2 или 4 зуба. Увеличение числа зубьев дает прирост второго импульса реактивности, что способствует самогашению импульсов мощности;
- 4) оптимальная толщина ОПС стального модулятора лежит в интервале 50-60 мм, ДПО - более 70 мм;
- 5) оптимальная толщина ОПО бериллиевого модулятора лежит в интервале 20-40 мм, ДПО - более 50 мм;
- 6) ширина зуба ОПО равна промежутку между ними, а для ДПО промежуток между зубьями должен быть несколько шире, чем ширина зуба ОПО. Для стального и бериллиевого варианта оптимальный шаг решетки 70-80 мм.

*В. М. Маслов*

*Жив*      *Резерв*



## Литература

1. Гудовский В. и др. ОИЯИ, Р13-12483, Дубна, 1979.
2. Ананьев В.Д. и др. Атомная энергия, 1972, т. 31, вып. 4, с. 352.
3. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах, Атомиздат, М., 1976, с. 139.
4. Ломидзе В.Л., Нго Куанг Зуй, Шабалин Е.П. ОИЯИ, Р3-80-675, Дубна, 1980.