

Министерство высшего и среднего специального образования

РСФСР

Ордена Трудового Красного Знамени

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Препринт № 43



ИРФИ

Б.А. Конюхов, И.Д.Конюхова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕРЕЗОНАНСНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ УПРУГИХ ВОЛН
В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

г. Горький,
1973

А н н о т а ц и я

Приводятся результаты экспериментальных исследований нерезонансных параметрических взаимодействий упругих волн в изотропных твердых средах, проведенных на базе модуляции звука звуком в алюминиевом сплаве. Показано, что результаты эксперимента хорошо согласуются с соответствующей теорией. Измерены константы упругости третьего порядка и абсолютные значения динамических упругих полей.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований некоторых взаимодействий упругих волн, теория которых рассмотрена в [1,2]. Очевидно, что экспериментальная реализация всех видов взаимодействий встречает ряд значительных технических трудностей. Поэтому в настоящей работе исследовались параметрические взаимодействия упругих волн, сравнительно легко реализуемые практически, и вместе с тем позволяющие довольно полно проверить соответствующие теоретические результаты. Нами исследовались модуляция высокочастотных продольных, сдвиговых и поверхностных упругих волн низкочастотным упругим полем стоячей волны.

§ 1. Методика исследования модуляции упругих волн и аппаратура

Поскольку из всех параметрических взаимодействий выбрана модуляция синусоидальных волн синусоидальными упругими полями, то очевидно, суть измерений должна состоять в изучении зависимостей индекса фазовой модуляции упругих волн от различных геометрических факторов (углов и расстояний). Измерения индекса фазовой модуляции упругих волн реализовывались с помощью установки, собранной по блок-схеме⁺), приведенной на фиг. 1. С генератора синусоидальных сигналов-1 электрический сигнал подается на пьезоизлучатель-2 (сдвиговых, продольных или рэлеевских волн). Волна, излученная пьезопреобразователем-2, проходит через образец твердого тела-3

⁺) Аналогичные электрические схемы использовались ранее в работах [3,4] для исследования фазовой модуляции звука в газах и жидкостях.

и принимается пьезоприемником—4. Фазово модулированный сигнал с приемника—4 поступает через фильтр—5 на фазочувствительную схему (радиоприемник или селективный вольтметр) 6. Фильтр—5 служит для ослабления нежелательного низкочастотного модулирующего сигнала, который может непосредственно приниматься пьезоприемником. Сигнал, выделенный и усиленный приемником—6, наблюдается на экране осциллографа—7 или измеряется вольтметром—8. Низкочастотное модулирующее поле в образце—3 возбуждается пьезопреобразователем—9, возбуждаемым электрическим сигналом, поступающим с генератора—10.

Высокочастотные упругие волны возбуждались пьезопреобразователями из пьезокерамики типа ЦТС—19 (пластины толщиной, соответствующей резонансу на частотах, излучаемых и принимаемых сигналов).

Низкочастотное синусоидальное (модулирующее) упругое поле возбуждалось двумя методами: методом составного вибратора и в стержне с закрепленным концом. В первом случае для этого стержень прямоугольного сечения склеивался из двух частей, так что в целом на длине стержня укладывалась длина волны модулирующего поля, а на коротком отрезке стержня четверть длины волны, т.е. стержень представлял из себя четверть волновой трансформатор. Между частями стержня клеивался пьезопреобразователь. Стержень с закрепленным концом возбуждался с помощью специального устройства. Стержень прямоугольного сечения с круглой резьбой головкой ввинчивался в специальный разъем с пьезопреобразователем.

В качестве генераторов синусоидальных сигналов использовались: для высокочастотных волн генератор типа ГСС—6, а для низкочастотных типа ЗГ—12. Селективным вольтметром (приемником) служил радиоприемник. Амплитуды сигналов измерялись визуально с экрана осциллографа.

При таком методе измерений ошибки в определении индекса модуляции определяются в основном ошибкой

визуализации. В частности ошибка определения относительных измерений индекса модуляции равна:

$$\delta\left(\frac{m}{m_0}\right) = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 \quad (1.1)$$

где δ_1 - ошибка визуализации несущей
 δ_2 - ошибка визуализации боковой
 δ_3 - ошибка установки коэффициента усиления приемника при измерении несущей δ_4 - боковой.

Средние значения всех величин, имеющих место в реальных опытах, которые входят в выражение (1.1), таковы, что $\delta\left(\frac{m}{m_0}\right) \sim 10 - 20\%$. Измерение абсолютного значения индекса модуляции сопровождается ошибкой, определяемой соотношением:

$$\delta(m) = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3' + \delta_4' \quad (1.2)$$

где δ_3' и δ_4' ошибка вольтметра генератора. Дело в том, что определение абсолютной величины амплитуды несущей и боковых в этом случае производится методом сравнения с известным сигналом калиброванного генератора. Обычно ошибка вольтметра генератора составляет не более 1-5%, т.е. в этом случае $\delta(m) \sim 5-10\%$.

Отметим также еще две возможности ошибок, связанных с самим методом измерения индекса фазовой модуляции. Согласно [1] наряду с фазовой имеет место амплитудная модуляция, глубина которой для большинства твердых тел составляет 1 - 2% от индекса фазовой. Так как при измерении отношения амплитуды боковой к амплитуде несущей не разделяется амплитудная и фазовая модуляция, ошибка в определении индекса фазовой модуляции дополняется эффектом амплитудной модуляции. Кроме того, имеет место и ошибка, связанная с тем, что производится измерение амплитуды только одной боковой (а не всего спектра). Однако, при малых индексах модуляции (как указывалось в [1], этот случай здесь выполняется) эта

ошибка не более 1%, и ее можно не учитывать.

Теперь перейдем к описанию экспериментов и результатов, полученных при конкретных видах модулируемых волн. Укажем, что все исследования модуляции звука звуком проводились на образцах из алюминиевого сплава Д16Т.

§ 2. Модуляция продольных волн

Исследования модуляции продольных волн, также как других типов, проводились на бруске размерами 270x50x20 мм. Длина стержня в этом случае равна длине волны модулирующего поля при частоте 18,5 кГц. Деформации можно считать однородными, так как поперечные размеры стержня меньше длины волны. Исследования модуляции продольных волн включали в себя изучение индекса модуляции при распространении модулируемой волны поперек стержня в зависимости от координаты излучателя и приемника модулируемой волны вдоль стержня и зависимости от угла между направлением распространения модулируемой волны и модулирующего поля.

В первом случае продольные волны возбуждались и принимались пьезопреобразователями, оформленными в виде специальных экранированных датчиков, которые были жестко закреплены, и имелась возможность их одновременного перемещения вдоль стержня. В этом случае возбуждаемую в стержне продольную волну можно считать стоячей.

Во втором случае возбуждение и прием модулируемых волн производились с помощью датчиков, оформленных в виде клиньев из оргстекла, к которым приклеены пьезопреобразователи. Изменение угла между волновыми векторами взаимодействующих волн производилось одновременным вращением клиньев вокруг оси перпендикулярной боковой грани бруска. В этом случае волны, возбуждаемые клиновыми излучателями, можно считать бегущими.

Частота модулируемых продольных волн в нашем эксперименте составляла 2,5 мгц. Частота модулирующего поля - 19 кгц, т.е. на длине стержня укладывалась одна длина волны и 47,5 кгц, т.е. на длине стержня укладывалось 2,5 длины волны. Максимальное значение звукового давления в пучности модулирующего поля на частоте 19 кгц $\sim 5 \cdot 10^8$ дн/см², на частоте 47 кгц $\sim 10^7$ дн/см². Звуковое давление определялось по величине подведенного к пьезопреобразователю электрического напряжения, величине пьезомодуля и добротности составного вибратора. Точность определения давления $\sim 20\%$.

Полученная зависимость индекса модуляции от координаты вдоль стержня для частоты модулирующего поля 19 кгц приведены на фиг. 2, а для частоты 47,5 кгц на фиг. 3. На графиках по оси абсцисс отложено расстояние от края стержня в мм, а по оси ординат величина индекса модуляции, отнесенная к максимальному значению. Максимальное значение индекса модуляции - $3 \cdot 10^{-4}$. На графиках сплошная кривая соответствующая теоретическая зависимость. Из результатов работы [1] очевидно, что эта зависимость пропорциональна полю стоячей модулирующей волны. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что в пределах ошибки измерений экспериментальные точки совпадают с теоретической кривой. Кроме того, из полученных результатов очевидно, что структура модулирующего поля, определенная по модуляции упругих волн, близка к идеальной структуре стоячих волн в стержне.

Результаты экспериментального исследования углов и зависимости индекса модуляции приведены на графике фиг. 4. Частота модулирующего поля равнялась 19 кгц. Сось вращения преобразователей проходила через пучность давления модулирующего поля на расстоянии 67,5 мм от конца стержня. Угол, под которым волна падала в твердое тело, составлял 20° , т.е. угловая зависимость исследовалась в интервале углов от 20° до 90° . На графике по оси ординат отложен индекс модуляции по отношению к макси-

мальному теоретическому значению (при уг. э 0°). Здесь также имеет место хорошее согласие эксперимента с теорией. Отметим, что при построении теоретической кривой использовались значения констант третьего порядка сплава Д16Т, приведенные в работе [5]. При сравнении теоретических и экспериментальных результатов следует иметь в виду разброс констант упругости даже для одного и того же материала.

§ 3. Модуляция сдвиговых волн

Исследования модуляции сдвиговых волн, также как и продольных, осуществлялись на образцах в форме стержня прямоугольного сечения тех же размеров. Возбуждение модулирующего поля производилось при тех же условиях.

Возбуждение и прием сдвиговых модулируемых волн основывались на том известном факте, что при падении под углом на границу раздела двух сред продольная волна трансформируется в продольную преломленную и сдвиговую. Иными словами возбуждение сдвиговых волн осуществлялось с помощью клиновых преобразователей, аналогичных тем, что использовались для возбуждения продольных волн. Частота колебаний сдвиговой волны равнялась 2,5 МГц.

Исследования модуляции сдвиговых волн включали в себя изучение зависимости индекса модуляции от координаты вдоль стержня при волновом векторе модулируемой волны перпендикулярном продольной оси стержня и изучение угловых зависимостей. Здесь исследовались угловые зависимости двух типов: первый — когда угол между вектором поляризации и его проекцией на эту плоскость изменялся. Для этого в первом случае использовались клиновые излучатели с различным углом наклона, а во втором производилось одновременное вращение излучателя и приемника вокруг оси, проходящей через пучность модулирующего поля.

Результаты экспериментального исследования зависимости индекса модуляции от координаты вдоль стержня здесь не приведены, т.к. они аналогичны соответствующим

результатам для продольных волн. Здесь частота модулирующего поля равна 19 кгц. На графике индекс модуляции отложен в отношении к максимальному значению ($1,6 \cdot 10^{-4}$). Сплошная кривая на графике - соответствующая теоретическая зависимость. Результаты исследования угловых зависимостей приведены на графиках: первого типа - фиг. 5., второго типа - фиг. 6. Частота модулирующего поля в этих экспериментах равнялась 19 кгц. Малое число экспериментальных точек на графике фиг. 5 связано с тем, что для каждого угла в эксперименте использовались свои преобразователи (это связано с трудностью изготовления большого числа преобразователей). Сплошные кривые на графиках - теоретически рассчитанные угловые зависимости. Индекс модуляции на графике приведен в относительных единицах (по отношению к максимальному значению).

Из анализа полученных результатов можно заключить, что при модуляции сдвиговых бегущих волн стоящими продольными также имеет место удовлетворительное согласие эксперимента с соответствующей теорией. Кроме того, при сравнении абсолютных значений индекса модуляции продольных волн и сдвиговых (при одинаковых параметрах модулирующего поля) можно заметить, что индекс модуляции продольных волн имеет вдвое большую величину, что хорошо согласуется с соответствующими теоретическими расчетами (здесь значения констант упругости взяты так же из работы [5]).

§ 4. Модуляция поверхностных волн

В настоящей работе проводилось экспериментальное исследование модуляции бегущих рэлеевских волн с частотой колебаний 1,8 мгц. Возбуждение и прием рэлеевских волн производились с помощью стандартных (от дефектоскопа ДУК-6в) клиновых преобразователей. Схема размещения преобразователей на образце приведена на фиг. 7. Так

как при работе с поверхностными волнами имеются широкие возможности перемещения излучателя и приемника друг относительно друга, то здесь круг исследуемых зависимостей индекса фазовой модуляции шире, чем для продольных и поперечных волн. В частности, кроме тех зависимостей, что были исследованы для продольных волн, здесь исследовались также зависимости индекса модуляции от координаты вдоль стержня при распространении рэлеевской волны вдоль модулирующего поля (при заданном пути взаимодействия 50 мм) и от пути взаимодействия. Зависимость индекса модуляции от пути взаимодействия измерялась так, что излучатель помещался в узел модулирующего поля, а приемник перемещался вдоль стержня (поверхностная волна так же распространялась вдоль стержня).

Результаты экспериментального исследования зависимости индекса модуляции от угла между волновыми векторами взаимодействующих волн приведены на фиг.8. Здесь частота модулирующего поля равна 18 кгц. Значения индекса модуляции, как и выше, приведены в относительных единицах, а сплошная кривая – теоретическая зависимость. Максимальное значение индекса модуляции было равно $0,5 \cdot 10^{-3}$, т.е. на порядок выше, чем в случае продольных волн (этого и следовало ожидать согласно выводам работы [2]).

Зависимости индекса модуляции от координаты вдоль стержня при продольном распространении и от пути взаимодействия приведены на фиг. 9 и 10 соответственно. Здесь непрерывные кривые – теоретически рассчитанные по соответствующим формулам работы [2], значения индекса модуляции отложены в отношении к максимальному значению. Очевидно, что эти результаты также хорошо согласуются с теорией.

В заключение приведем результаты определения констант упругости третьего порядка сплава Д16Т, на базе выше приведенных экспериментов. Принципиальные основы такого определения рассматривались в [6]. Для

удобства сравнения с результатами других авторов [5] здесь определялись константы Мурнагана. Результаты измерений приведены в таблице.

Константы	Измеренные	Работа [5]
$l \cdot 10^{10}$ н/м ²	- 29 ± 5,8	- 35
$m \cdot 10^{10}$ н/м ²	- 31 ± 6,2	- 37
$n \cdot 10^{10}$ н/м ²	- 26 ± 5,2	- 27

Значение плотности взято из литературы. Константы упругости второго порядка измерялись по скорости упругих волн.

Из таблицы видно, что константы упругости третьего порядка, определенные по модуляции звука звуком, в пределах ошибки измерения совпадают со средними значениями констант, приведенными в 3. Причем, необходимо учесть разброс констант упругости, зависящий от обработки материала и т.д.

Кроме того из выше проведенных результатов эксперимента была вычислена амплитуда давлений в пучности модулирующего поля. Вычисленная по результатам измерения величины индекса модуляции упругих волн при частоте модулирующего поля 19 кгц, амплитуда давления $5 \cdot 10^6$ дин/см². Этот результат хорошо согласуется с результатом определения амплитуды давлений по величине пьезомодуля пьезопреобразователя и величине электрического модулирующего сигнала. В данном случае при добротности стержня на частоте 19 кгц - 60 амплитуда давлений в пучности имела значение $5,8 \cdot 10^6$ дин/см².

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.А.Конюхов, Г.М.Шалашов. К теории нерезонансных параметрических взаимодействий упругих волн в изотропных твердых телах, ПМТФ (в печати).
2. Б.А.Конюхов, Г.М.Шалашов. О нерезонансных параметрических взаимодействиях поверхностных волн в изотропных твердых телах ПМТФ, № 4, 1973.
3. H. Mross, K. Brinkmann. Phasemodulation einer ultraschallwelle in Luft verursacht durch die Einwirkung einer zweiten Schallwelle. *Acustica*, 14, 4, 1964.
4. В.А.Зверев, А.И.Калачев, Модуляция звука звуком при пересечении акустических волн, *Акуст. ж.*, 16, 2, 1970.
5. Г.Н.Савин, А.А.Лукашев, Е.М.Лыско, С.В.Веремеенко, С.М.Вожевская, Распространение упругих волн в твердом теле в случае нелинейно-упругой модели сплошной среды, *Прикладная механика*, 6, № 2, 1970.
6. И.Д.Гиц, Б.А.Конюхов, Об оценке констант упругости третьего порядка изотропных твердых тел по модуляции звука звуком, *Акуст. ж.*, 19, 2, 1973.

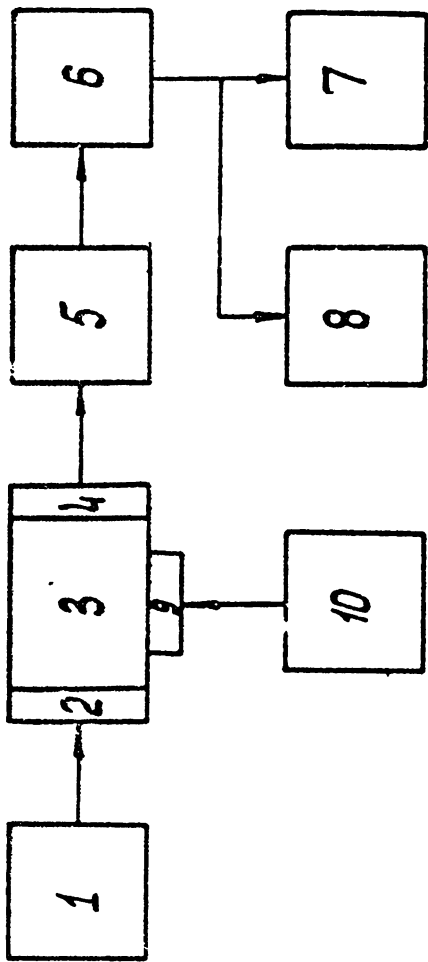


Рис. 1

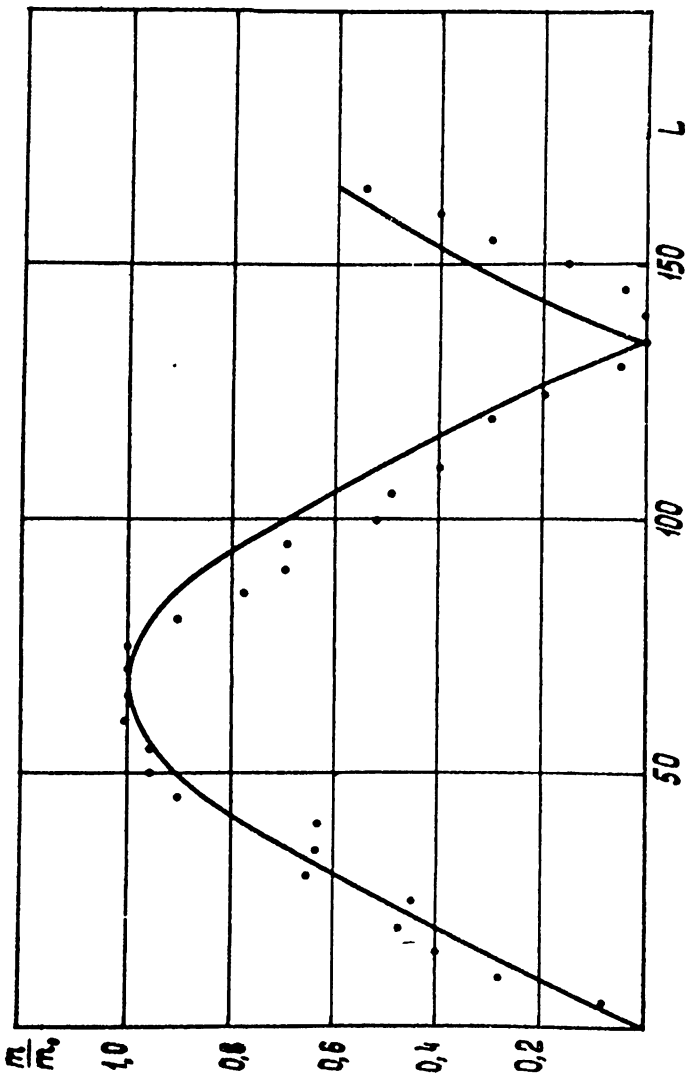


Рис. 2

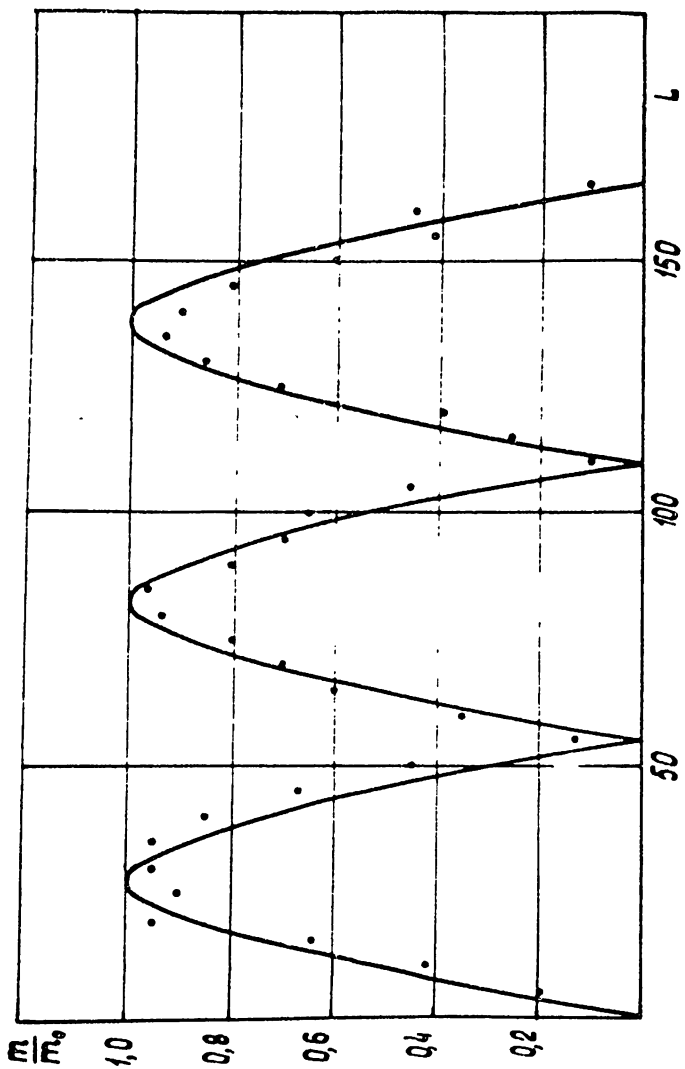


Рис. 3

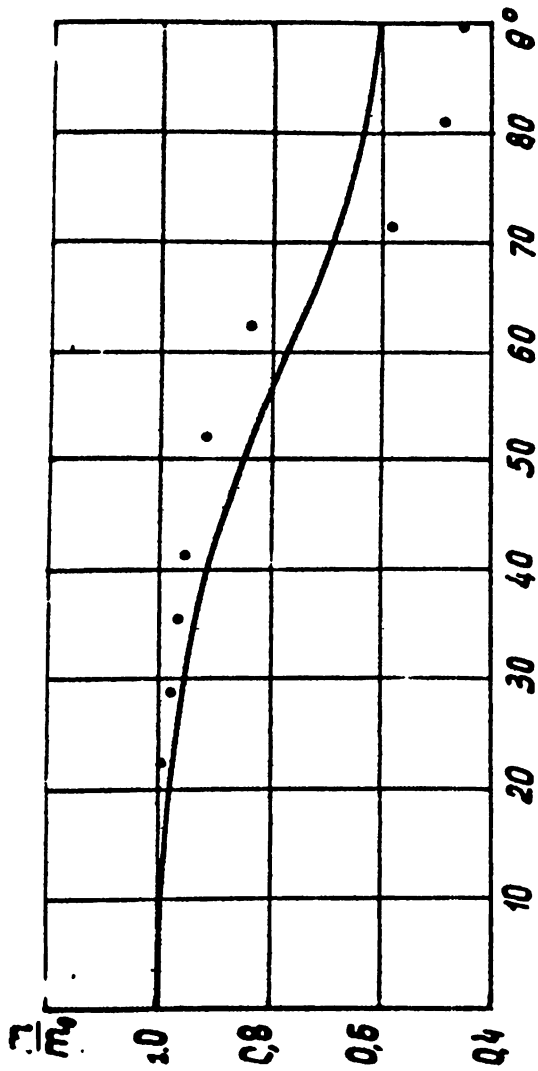


Рис. 4

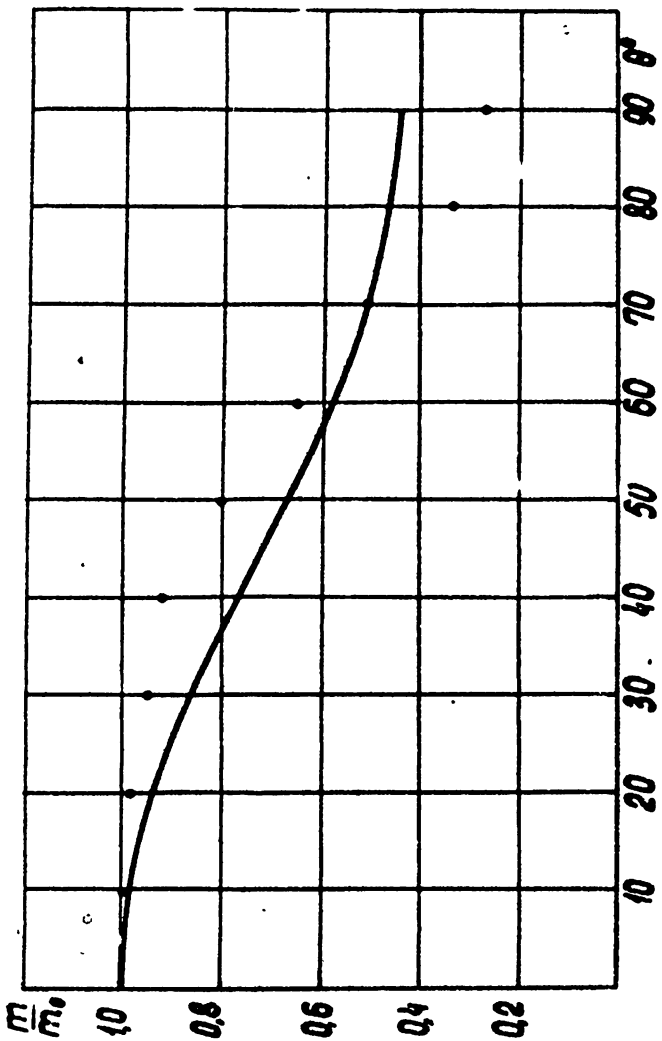


Рис. 5

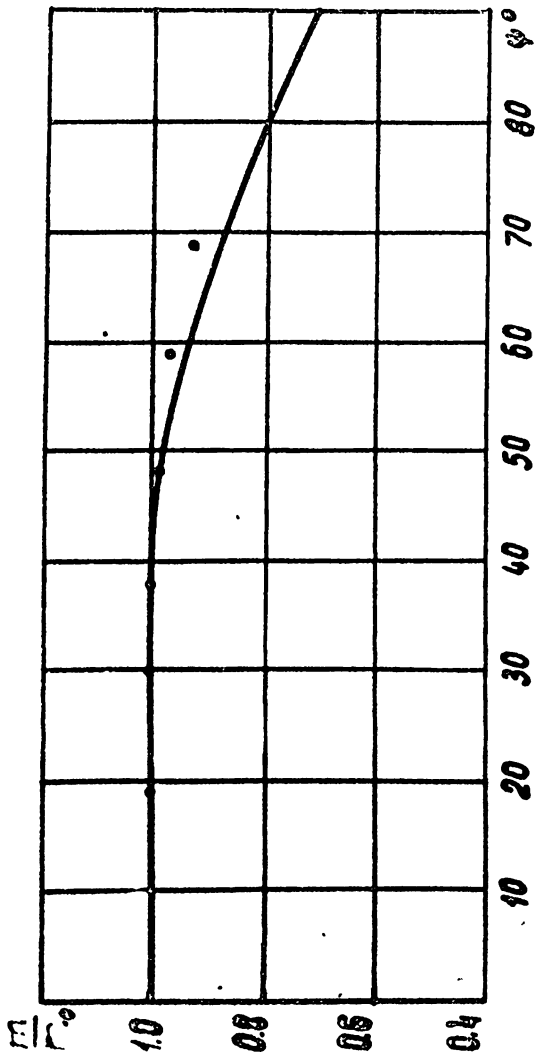


Рис. 6.

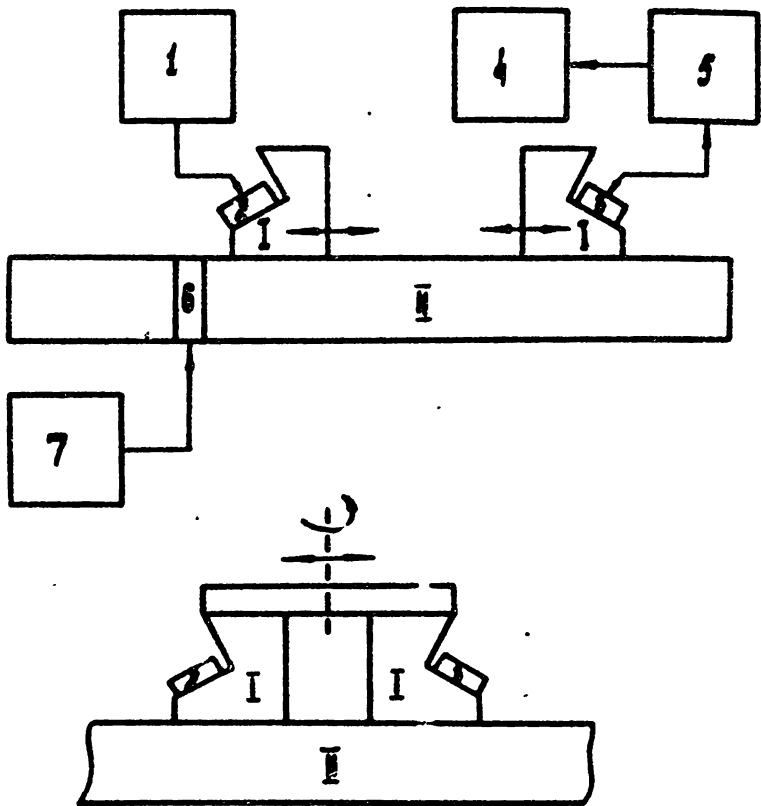


Рис. 7

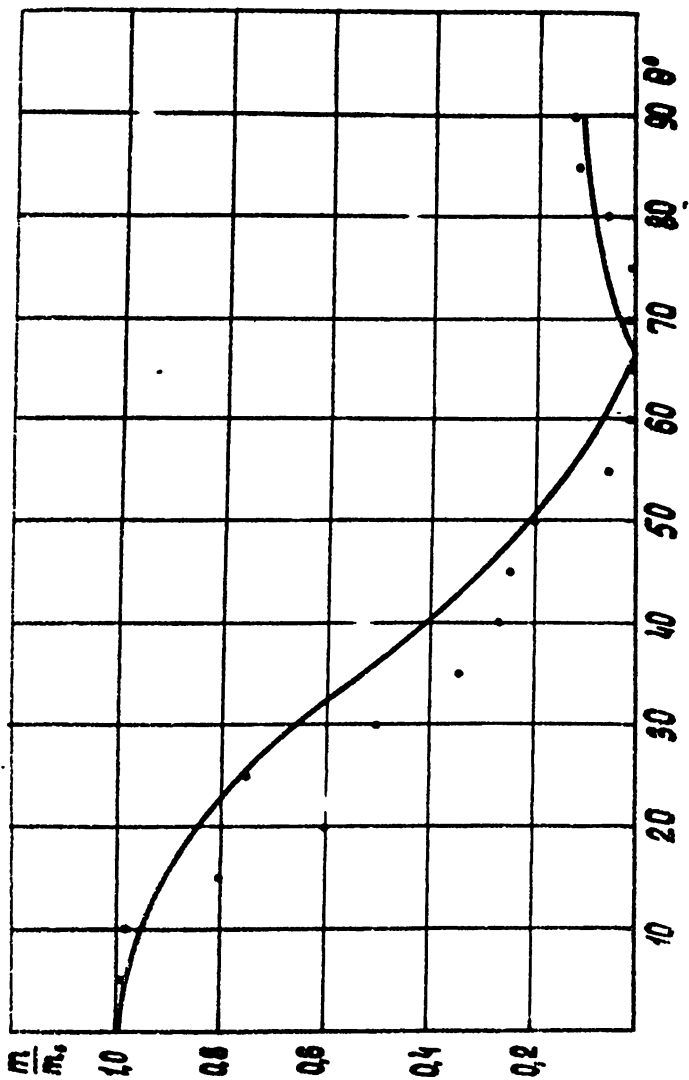


Рис. 8

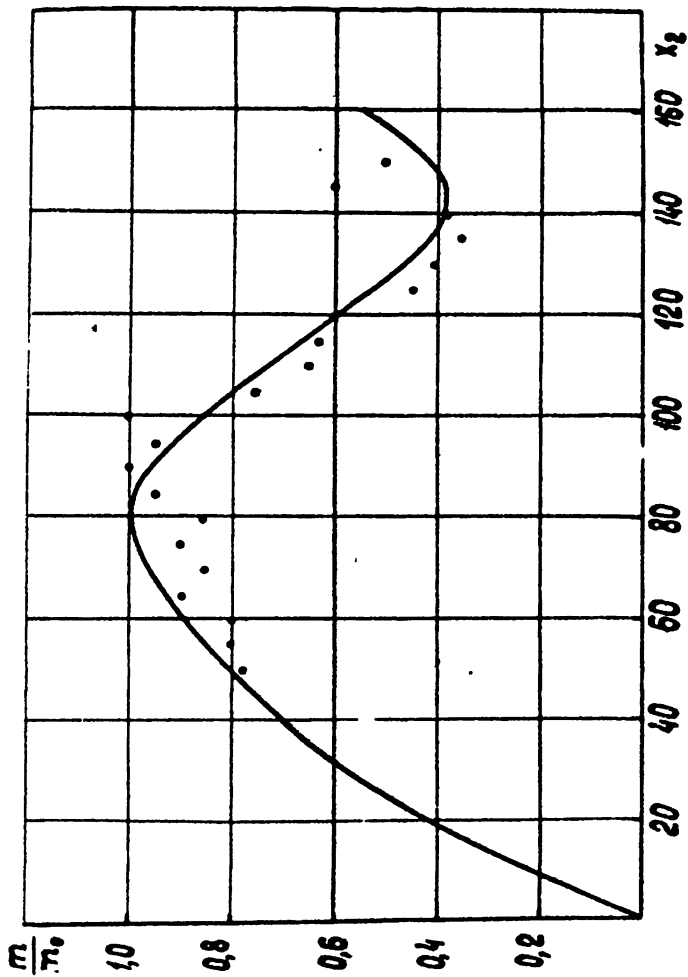


Рис. 9.

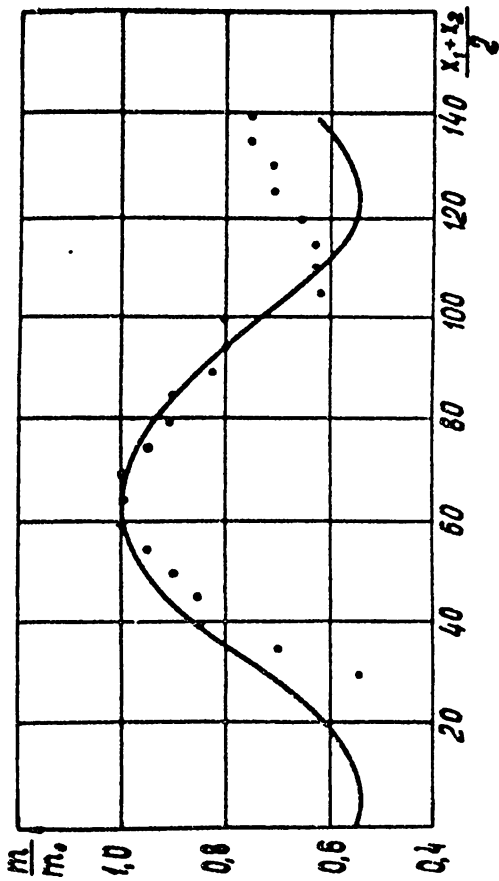


Рис. 10