

С3450

Б-984

Бутслов М.М. и др.

Б.1-13-5467.



+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

x

Б1-13-5467

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1970

Б1-13-5467

Лаборатория ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований
ВНИИ оптико-физических измерений

сз450
Б-934

М.М.Бутслов, В.И.Комаров, Г.Е.Косарев,
О.В.Савченко, Л.М.Сороко

УМЕНЬШЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ МНОГО-
КРАТНОЙ МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ

с.ф. 3108

17 17 70 20 xi 70

- Дубна-Москва, 1970 г. -

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

А Н Н О Т А Ц И Я

Разработан и исследован метод устранения искажений изображений (дисторсий) в многокаскадных электронно-оптических преобразователях с использованием сильных магнитных полей напряженностью до 3000 э в режиме многократной магнитной фокусировки. Использовались аксиально-симметричные магнитные поля, как однородные, так и неоднородные. Во втором случае индекс модуляции аксиальной компоненты поля равнялся 0,31. Наблюдалась фокусировка вплоть до II фокуса. Изотропная и спиральная дисторсия были подавлены до 1% на максимальном радиусе, равном 4 см.

В системах с сильным магнитным полем отпадают жесткие требования к стабильности электрического и магнитного полей, а также к форме импульса напряжения при импульсном режиме питания.

Анализируются факторы, которые не позволяют использовать в существующих конструкциях ЭОП'ов типа УМ все преимущества режима фокусировки сильным магнитным полем.

І. ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных параметров электронно-оптического преобразователя (ЭОП), как усилителя яркости изображений объектов с малой интенсивностью свечения, является степень искажения изображения, получаемого на выходе ЭОП'а. Эти искажения затрудняют получение высокой геометрической точности отображения, например, при использовании ЭОП'ов в астрономии или при наблюдении следов частиц в трековых приборах ядерной физики. Появление дисторсий сильно уменьшает полезную площадь фотокатода, сокращает объём информации, передаваемой по электронно-оптическому каналу, а иногда делает применение ЭОП'ов вообще невозможным.

Изображение в преобразователях с магнитной фокусировкой искажено в основном анизотропной дисторсией, которая возникает в электронно-оптических системах с аксиально-симметричными электрическим и магнитным полями. Гауссово изображение в таких системах оказывается повернутым по отношению к объекту на угол θ

$$\theta = \sqrt{\frac{e H_m^2}{8 m \Phi_m}} \cdot \int_0^{z_i} \frac{G(z)}{\sqrt{W(z)}} dz - \pi, \quad (I)$$

где H_m - наибольшее значение напряженности магнитного поля на отрезке оси между плоскостью предмета $z=0$ и плоскостью изображения $z=z_i$; Φ_m - наибольшее значение потенциала на том же отрезке, e

$$G(z) = \frac{H(z)}{H_m}, \quad W(z) = \frac{\Phi(z)}{\Phi_m} \quad (2)$$

Из (I) видно, что для Гауссова изображения угол поворота не зависит от радиальной координаты z точки поля изображения. Однако, в непараксиальной оптике, имеющей место в преобразователях, угол поворота θ становится функцией z . Это создает aberrации, в результате чего появляется отступление от Гауссова изображения, пропорциональное кубу радиуса^{1/2}. Отрезок прямой линии превращается в характерную S -образную кривую. Такая дисторсия называется анизотропной или S -образной.

В однородных полях с взаимно параллельными силовыми линиями, когда

$$G(z) \equiv 1, \quad W(z) = \frac{z^2}{z_i}, \quad (3)$$

имеем

$$\int_0^{z_i} \frac{G(z)}{\sqrt{W(z)}} dz = 2z_i. \quad (4)$$

Из условия фокусировки следует

$$z = \frac{\pi}{\omega m} \cdot \sqrt{\frac{2e\Phi_m}{m}} \quad (5)$$

где

$$\omega = \frac{e H m}{m} \quad (6)$$

-циклотронная частота электрона в магнитном поле H_m . Угол поворота в этих условиях обращается в нуль

$$\theta = \frac{1}{2} \omega \sqrt{\frac{m}{2e\Phi_m}} 2z_i - \pi = 0. \quad (7)$$

Одновременно с этим пропадает анизотронная дисторсия. При такой идеальной конфигурации полей изотропная дисторсия также исчезает.

Однако, в реальных преобразователях, как правило, электрические поля в аксиальной конфигурации имеют заметную радиальную компоненту. Даже в тех случаях, когда приняты меры к достижению хорошей однородности электрического поля, возмущения однородного магнитного поля, создаваемые конструктивными элементами преобразователя, могут^{/3/} приводить к заметной анизотропной дисторсии на краях поля изображения.

Дисторсию изображения можно подавить с помощью специально подобранных конфигураций электрического и магнитного полей. В частности, уменьшение анизотропной дисторсии может быть достигнуто в конфигурации, когда направление магнитного поля совпадает с направлением параксиальных траекторий электронов только в одном электрическом поле, без учета магнитного. Еще в работе^{/4/} было показано, что поворот изображения в такой конфигурации отсутствует.

Возможна система съёма информации с экрана ЭОП'а, которая автоматически учитывает реальные искажения^{/5/}, либо такая программа математической обработки координатных данных точек на выходе ЭОП'а, которая учитывает однозначное и известное соответствие между координатами точек на входе и координатами точек на выходе^{/6/}.

Наконец, дисторсии любого вида можно уменьшить с помощью сильных магнитных полей, создающих фокусировку изображения в режиме многократной фокусировки. Данная работа посвящена этому последнему методу.

Величины α и d в (8) и (9) выражены в см., $U_{эм}$ - в вольтах, E - в вольтах на см, и H - в эрстедах.

Для достижения фокусировки порядка n в каскаде длиной L см с однородными полями величина

$$n' = \frac{L}{10,6} \cdot \frac{H}{\sqrt{U}} \quad (10)$$

должна принимать дискретные значения $n = 1, 2, 3$ и т.д.

Величина L ограничена снизу значением порядка нескольких киловольт, при котором еще достигается ^{необходимый} коэффициент усиления каскада, а сверху ограничение определяется максимальным напряжением, которое каскад выдерживает без пробоя (10-20 кв). Поэтому переход от однократной фокусировки к многократной обычно связан с повышением напряженности магнитного поля. Так как ларморовский радиус электрона уменьшается обратно пропорционально магнитному полю, то электронный пучок, выходящий из одной точки фотокатода, может так сжаться при больших магнитных полях, что его сечение в любой плоскости между катодом и экраном будет меньше размера предельно разрешаемого элемента изображения. Последний определяется свойствами системы из люминофора, разделительной пленки и фотокатода многокаскадного преобразователя.

Оценим напряженность магнитного поля, при котором сечение электронного пучка становится равным размеру предельно разрешаемого элемента. Эффективная разрешающая способность N пар линий на мм идеальной электронно-оптической системы определяется совместно как диаметром сечения электронного пучка D , так и размером кружка рассеяния $d \approx \frac{1}{N_n}$. При этом

$$\frac{1}{N} \approx \sqrt{\left(\frac{1}{N_n}\right)^2 + D^2}. \quad (11)$$

В пренебрежении хроматической аберрацией для однородных полей получаем

$$D = 2\bar{a} \cdot \sqrt{2(1 - \cos 2\pi \frac{H}{H_1})}, \quad (I2)$$

где \bar{a} - ларморовский радиус электрона, усредненный по углу эмиссии из фотокатода, H_1 - значение поля, при котором получается фокусировка первого порядка. Принимая для угла эмиссии фотоэлектронов ламбертовское распределение, получим

$$\bar{a}^2 = \int_0^{\pi/2} 2a^2 \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta = \int_0^{\pi/2} 2 \left(\frac{U_0 \sin\theta}{\omega} \right)^2 \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta = \frac{1}{2} \frac{2m U_{эм}}{e H^2} \quad (I3)$$

и

$$\bar{a} = 2,38 \sqrt{\frac{U_{эм}}{H^2}}. \quad (I4)$$

Средняя энергия электронов, испускаемых из сурмяноцезиевого фотокатода под действием света с длиной волны 4500-5900Å⁰, составляет ^{18/} 0,6 eV, отсюда

$$D(\mu\mu) = \frac{36,8}{H(\text{эрсг})} \cdot \sqrt{2(1 - \cos 2\pi \frac{H}{H_1})}. \quad (I5)$$

Подставляя это значение в (9), находим

$$N = \left\{ \left(\frac{74}{H} \right)^2 \cdot (1 - \cos 2\pi \frac{H}{H_1}) + \frac{1}{N_n^2} \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (I6)$$

Легко видеть, что если магнитное поле H равно или превышает значение

$$H_0 = \frac{104 \cdot N_n}{\sqrt{1 - \left(\frac{N}{N_n} \right)^2}}, \quad (I7)$$

то при непрерывном переходе от фокусировки n -го порядка к фокусировке $(n \pm 1)$ порядка разрешающая способность остается не хуже N линий на мм. Так, например, если принять $N_n = 20$ линий/мм, то для сохранения разрешения в пределах $N = 15$ линий/мм $H_0 = 3000$ э. Для типичных значений $L = 10$ см, $\bar{U} = 10$ кв/каскад такое поле согласно (10) соответствует фокусировке порядка $n \approx 30$. При столь сильной фокусировке отпадает необходимость в высокой стабильности напряжения на каскадах, а также электрического тока в возбуждающей обмотке соленоида. При меньших значениях n величина H/\sqrt{L} на каждом каскаде должна соответствовать фокусировке определенного порядка. Относительная расфокусировка

$$\Delta = \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta U}{U} - \frac{\Delta H}{H} \right) \quad (18)$$

если $n \cdot \Delta \ll 2\pi$, вызывает такое же ухудшение разрешающей способности, как и на первом фокусе.

В противоположность этому, требования к форме импульсов напряжения (короткий фронт, малый спад на плоской вершине) в режиме импульсного питания непрерывно снижаются при переходе от фокусировки I-го порядка к многократной фокусировке.

На отсутствие жестких требований к стабильности питающих напряжений и токов было указано в работе^{/9/}, авторы которой предложили и реализовали метод сильной фокусировки в однородных электрическом и магнитном полях. Описанный в^{/9/} 4-х каскадный преобразователь, помещаемый в поле 1,5 кэ ($n = 10$), имел разрешающую способность 10 линий/мм на рабочей части фотокатода диаметром 3 см. Искажения уменьшались благодаря однородной структуре поля.

Поведение ЭОП'ов в неоднородных электрических полях в режиме сильной фокусировки ранее не исследовалось. Имеются только данные о том, что описанный в работе^{/I0/} ЭОП испытывался в однородном магнитном поле напряженностью до 450 э при фокусировках I-го, 2-го и 3-го порядков. Было обнаружено заметное уменьшение S-образной дисторсии при переходе от $n=2$ к $n=3$. Данные о поведении ЭОП'ов в неоднородных электрическом и магнитном полях в режиме сильной магнитной фокусировки в литературе отсутствуют.

Теоретический анализ работы ЭОП'а в неоднородных полях показывает, что при достаточно большой напряженности магнитного поля должна наблюдаться слабая вариация разрешающей способности при изменении электрического и магнитного полей, а сильное повышение магнитного поля должно приводить к уменьшению искажений. Для этого необходимо, чтобы пространственные изменения стационарных магнитного и электрического полей были малы на протяжении ларморовского радиуса электрона, т.е., чтобы соблюдались неравенства

$$\frac{\alpha \left| \frac{\partial H_j}{\partial x_k} \right|}{|H_j|} \ll 1, \quad \frac{\alpha \left| \frac{\partial E_j}{\partial x_k} \right|}{|E_j|} \ll 1 \quad (19)$$

для любых компонент полей и любых пространственных координат. В этих условиях траекторию движения электронов $\vec{\rho}(t)$ можно представить в виде^{/II/}

$$\vec{\rho}(t) = \vec{C}(t) + \vec{\alpha}(t) \quad (20)$$

Функция $\vec{C}(t)$ описывает траекторию движения ведущего центра, а функция $\vec{\alpha}(t)$ задает вращательное движение вокруг траектории ведущего центра, с циклотронной частотой и радиусом,

близким к ларморовскому. Траектория ведущего центра практически совпадает с силовой линией магнитного поля. Условия (19) хорошо выполняются для типичных конфигураций полей, применяемых в ЭОП'ах. Поэтому перенос изображения будет происходить вдоль траекторий ведущих центров, выходящих из различных точек объекта на фотокатоде.

Уход ведущего центра с определенной силовой линии магнитного поля вызывается компонентной скорости

$$\vec{U}_\perp = \frac{d\vec{c}}{dt}, \quad (21)$$

перпендикулярной к направлению силовой линии в данной точке. В рассматриваемом здесь случае эта компонента равна ^{/II/}

$$\vec{U}_\perp = \vec{U}_B + \vec{U}_m + \vec{U}_E, \quad (22)$$

где

$$U_B \approx \left[\frac{m \cdot \frac{v_{0z}^2}{2H} (1 + 2 \frac{U_{II}^2}{v_{0z}^2})}{e H^2} \right] \cdot \vec{H} \times \nabla \vec{H}, \quad (23)$$

$$\vec{U}_m = \frac{m}{e H^2} \cdot \vec{H} \times \frac{d\vec{U}_\perp}{dt}, \quad (24)$$

$$\vec{U}_E = \frac{\vec{E} \times \vec{H}}{H^2} \quad (25)$$

Из (23), (24) и (25) видно, что все составляющие поперечной скорости U_\perp при неизменной конфигурации полей и фиксированном стремятся к нулю, когда H неограниченно возрастает. Поэтому при достаточно больших магнитных полях траектории электронов оказываются "привязанными" к силовым линиям магнитного поля. Это означает, что даже в неоднородных магнитных полях дисторсия изоб-

ражения должна уменьшаться. Максимальное подавление дисторсии будет достигаться в условиях, когда сильное магнитное поле обладает плоскостью симметрии, а сама плоскость симметрии расположена на равном расстоянии как от фотокатода, так и от экрана (рис. I). Смещение ЭОП'а относительно этой плоскости симметрии вдоль оси Z будет сопровождаться появлением дисторсии изотропного характера.

Описываемые ниже опыты были выполнены с ЭОП'ами типа УМ-95 и УМ-163^{/12/}, которые помещались в продольное магнитное поле напряженностью 4000 э.

3. ОПЫТЫ С ЭОП'ами В СИЛЬНОМ ОДНОРОДНОМ

МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Для изучения характеристик ЭОП'ов в сильном однородном магнитном поле был изготовлен соленоид длиной 100 см и внутренним диаметром 18 см. Соленоид собран из 51 секции, намотанной медной трубкой с наружным диаметром 0,8 см и внутренним 0,4 см. Секции содержат от 14 до 18 витков. Наружный и внутренний диаметры секции равны 34 см и 22 см, соответственно. Секции соединены по току последовательно с помощью медных накладок. Параллельное соединение секций по воде при давлении 3 атм позволяет снимать с соленоида рассеянную мощность до 75 квт. Электрическое сопротивление соленоида равно 0,3 ома, что соответствует максимально допустимому току в 500 а.

Спад поля на концах соленоида был скомпенсирован добавлением четырех витков в 10 крайних секциях. Торцы соленоида, изготовленные из железных фланцев толщиной 2,5 см с отверстием диаметром 18 см по оси соленоида, уменьшали эффект рассеянного поля. Фланцы соединялись между собой 12 железными пластинами сечением $8 \times 1 \text{ см}^2$ (Рис.2). Влияние такой "брони" на конфигурацию поля рассчитать трудно. Поэтому в нулевом приближении оценивалось поле, создаваемое безжелезным соленоидом. Наилучшая однородность поля была достигнута затем путем закорачивания отдельных концевых секций соленоида.

Распределение аксиальной компоненты поля H_z вдоль оси соленоида при закороченных секциях № 6 и № 42 дано на рис.3. В таком варианте соленоид создавал поле напряженностью до 4000 э с однородностью $\pm 1\%$ в цилиндрическом объеме с диаметром 10 см и длиной цилиндра 60 см. Неоднородность возрастала до $\pm 3\%$ на длине 79 см. ЭОП помещался в центральную часть соленоида, где однородность поля была лучше $\pm 1\%$.

Испытания сводились к визуальному и фотографическому наблюдению изображения **мири** на экране ЭОП'а, и к измерению фонового свечения экрана с помощью ФЭУ, работающего в линейной области (рис.4)

Результаты испытаний показали следующее:

I. Как и ожидалось, искажения изображения быстро уменьшаются при увеличении напряженности магнитного поля и переходе от первого фокуса к более высоким (Рис.5). Было найдено, что для УМ-95

$$n \approx 0,48 \frac{H}{\sqrt{LI}}, \quad (26)$$

где H - в эрстедах, U - в вольтах.

Остаточная анизотропная дисторсия $\Delta \theta$ на расстоянии 2 см от центра фотокатода приведена в табл. I.

Таблица I

H	935	1280	1680
$\Delta \theta, \text{рад}$	$(4,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$(1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$

Изотропная дисторсия $\frac{\Delta z}{z}$ равна $(0,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-2}$ при $H=1680$ э на том же расстоянии от центра фотокатода. Таким образом, уже при поле $H \approx 1,7$ кэ и $U=6$ кв/каскад, искажения изображения в круге радиусом 2 см не превышают 1%.

Разрешающая способность равна 32 линий/мм на негативе и 14 линий/мм на экране. Последнее значение следует рассматривать как нижнюю границу разрешающей способности ЭОП'а в поле $H=1,7$ кэ, так как при фотографировании разрешающая способность всей установки определялась качеством объектива. O_2 , Гелиос - 40, $D/f=1:6$

2. При испытаниях было обнаружено, что повышение магнитного поля при фиксированном напряжении на каскадах сопровождается усилением фонового свечения экрана, имеющего характер нефокусированного мерцания. По мере увеличения магнитного поля свечение становится нестабильным и затем переходит в яркие вспышки. Это явление препятствует дальнейшему повышению магнитного поля.

На рис.6 показана типичная зависимость максимально допустимой напряженности магнитного поля от напряжения на каскаде.

Измерения тока утечки каскадов показали, что без магнитного поля при $U = 10$ кв/каскад ток утечки равен $5 \cdot 10^{-9}$ а. Повышение магнитного поля сопровождается быстрым ростом тока утечки, который достигает $\sim 10^{-7}$ а в поле $H = 1,5$ кэ. ^{В поле $H = 3$ кэ,} ток утечки становится очень нестабильным, и в некоторых образцах ЭОП'ов достигает величины 10^{-4} а при напряжении на каскаде всего несколько киловольт. Дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к электрическому пробоев каскада. Зависимость яркости свечения от напряженности магнитного поля дана на рис.7. Эта зависимость становится более крутой, если напряжение подать на четыре последние каскада (рис.8).

Испытания 20 образцов каскада типа УМ-95 позволяют сделать вывод о том, что такое поведение каскадов является типичным, хотя от образца к образцу наблюдается разброс кривых, аналогичных приведенным на рис.7 и рис.8.

Устойчивой работы преобразователя также не удается достигнуть при импульсном режиме подачи напряжения. В частности, был испытан такой вариант импульсной передачи напряжения на ЭОП'е, при котором прямоугольный импульс напряжения подавался на все каскады шестикамерного ЭОП'а через емкостной делитель. Импульс от генератора имел следующие параметры: амплитуда - от 10 кв до 50 кв, длительность - от 1 мсек до 100 мсек, время нарастания переднего фронта - короче 0,1 мсек, спад амплитуды на плоской вершине - менее 1%.

Для выяснения природы этого явления однокаскадные образцы ЭОП'ов помещались в зазор электромагнита с примерно однородным магнитным полем в зазоре и наблюдались визуально. Было замечено,

что в магнитном поле напряженностью в несколько сот эрстед появляется локальная люминесценция боковых стенок колбы ЭОП'а (рис.9). При дальнейшем повышении магнитного поля область свечения сдвигается от экрана в сторону фотокатода. Образцы с наибольшей нестабильностью работы в сильном магнитном поле имели наиболее четко выраженное свечение стенок колбы.

Эти наблюдения позволяют сделать вывод о том, что свечение стенок колбы вызвано электронами, которые образуются вблизи краев металлизации вокруг фотокатода вследствие автоэлектронной эмиссии и затем, ускорившись, попадают на боковую стенку колбы. Это приводит, с одной стороны, к люминесценции стекла и подсветке фотокатода, и, с другой стороны, к накоплению поверхностных зарядов на стекле с последующим электрическим пробоем в вакууме по поверхности стекла. Этот вывод подтверждается также тем, что в специально изготовленных образцах преобразователей, не имеющих металлизации вокруг фотокатода и снабженных металлическим кольцом - ловушкой, которое помещалось около стеклянной стенки колбы, появление свечения наблюдалось при существенно больших магнитных полях, чем в обычных образцах (рис.10). Конструктивное исполнение обычного и модифицированного образцов показано на рис.11.

Испытания трехкаскадного преобразователя с модифицированными каскадами показали, что такой преобразователь работает устойчиво вплоть до 15 кв/каскад при магнитном поле до 3 кэ (рис.12, рис.13).

На экране диаметром 5 см искажения не наблюдались в пределах точности измерений $\approx 0,3\%$.

Такой преобразователь устойчиво работал также и в импульсном режиме. Так, в поле $H=2,65$ кэ напряжением $U=12,5$ кв/каскад и импульсе длительностью $0,1$ мксек с амплитудой $4,5$ кв при статическом "подпоре" напряжением $4,5$ кв на третьем каскаде была получена разрешающая способность в 8 линий/мм на фотокатоде.

Аналогичные результаты были получены на четырехкаскадных ЭОП'ах типа УМ-163 (рис.14). Если в поле $H=230$ э ($n=2$) анизотропная дисторсия порядка 1% появляется, начиная с расстояния

$Z=1,2$ см, то в поле $H=2000$ э ($n=20$) искажения величиной в 1% появляются на расстоянии $3,7$ см от центра, а на краю поля изображения достигают только 2% .

3. При исследовании эффекта расфокусировки в магнитном поле 3 кэ электрическое и магнитное поле плавно менялось, чтобы получить переход от исходного порядка фокусировки к соседним порядкам. Не обнаружено ухудшения разрешающей способности в пределах 10 линий/мм.

Результаты проведенных опытов позволяют утверждать, что искажение изображения на экране ЭОП'а существенно уменьшается, если ЭОП с неоднородным электрическим полем поместить в однородное магнитное поле напряженностью около 3 кэ. Разрешающая способность остается практически неизменной при небольших изменениях напряженности полей.

Однако, испытанные образцы ЭОП'ов работают в однородном магнитном поле нестабильно. Причина такой нестабильности состоит в том, что электроны, вырываемые с краев фотокатода или окружающей его металлизации, попадают при ускорении на боковые стеклянные стенки колбы и вызывают свечение экрана или пробой.

Поэтому рабочее напряжение на каскадах ЭОП'ов типа УМ-95 приходится снижать, даже при напряженности магнитного поля ниже 1 кэ. Тем не менее, помещение ЭОП'а в однородное магнитное поле оказалось технически выполнимым и полезным. Так, например, эксперименты /13+16/ были выполнены с помощью ЭОП'а, используемого в качестве яркости изображения треков в изотропной разрядной камере. Напряжение на каскаде равнялось 9 кв/каскад, магнитное поле $0,8 + 0,9$ кэ и $n=4+5$.

Для того чтобы продвинуться в область более высоких магнитных полей при существующей конструкции ЭОП'ов и получить еще более сильный эффект подавления искажений изображения, необходимо было устранить нестабильность работы ЭОП'ов в сильных магнитных полях. Из сказанного выше ясно, что для этого необходимо отвести потоки электронов от боковых стенок колбы ЭОП'а. Этого можно достигнуть путем такого изменения конфигурации сильного магнитного поля, чтобы силовые линии поля при удалении от фотокаатода сходились к оси. Если кроме этого плоскость симметрии сильного магнитного поля совместить со средней плоскостью каскада, то в этих условиях можно ожидать полного подавления дисторсий. Магнитное поле для многокаскадного ЭОП'а должно иметь период модуляции, равный длине каскада.

Первые эксперименты были проведены с помощью системы железных колец диаметром 18/14 см, толщиной 7 см и зазором между кольцами 3 см. Глубина модуляции аксиальной компоненты поля равнялась

$$\left. \begin{aligned} m(r=0) &= \frac{H_z^{\max} - H_z^{\min}}{H_z^{\max} + H_z^{\min}} = 0,12 \\ m(r=4,5 \text{ см}) &= 0,42 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Испытание в таком поле ЭОП'а типа УМ-95 показало определенное уменьшение нестабильностей, и полезность введения модуляции. Однако, система железных колец не позволяла сформировать поле с большой глубиной модуляции, в объеме, требуемом размерами преобразователя УМ-163 с полезным диаметром фотокатода 8,9 см. Поэтому для дальнейших экспериментов была изготовлена система бронированных железных катушек, формирующих поле требуемой конфигурации.

4. ОПЫТЫ С ЭОП'ами В СИЛЬНОМ НЕОДНОРОДНОМ

МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Неоднородное магнитное поле формировалось системой из 6 магнитных катушек, смонтированных соосно на общей ферме (рис.15). Основные параметры системы: расстояние между средними плоскостями катушек 16 см, число витков в катушке - 40, диаметры трубки 0,7 и 0,4 см. Максимальный рабочий ток при водяном охлаждении - 300а, мощность, снимаемая с 6 катушек, равна 22 квт, максимальная напряженность поля на оси - 1150 э. Распределение поля вдоль оси показано на рис.16. По этим данным можно оценить конфигурацию силовых линий поля на расстоянии около 5 см от оси катушек (рис.17).

Глубина модуляции аксиальной компоненты поля равна

$$m(\tau=0)=0,14 ; \quad m(\tau=5,5\text{см})=0,31 \quad (28)$$

Для получения тождественной картины поля во всех каскадах 4-х каскадного преобразователя, число катушек было выбрано равным 6. При этом наблюдался спад поля в области фотокатода по сравнению с полем на средних каскадах, примерно на 4%. Этот спад можно было устранить путем незначительного повышения тока возбуждения в крайних катушках, однако из-за сложности электрической схемы питания от этого пришлось отказаться и все катушки были соединены последовательно.

Испытания заключались в наблюдении оптической миры, которая проектировалась на фотокатод ЭОП^а через объектив типа Г-53 с фокусным расстоянием $f = 20$ см светосилой $\frac{D}{f} = 1:8$ и разрешающей способностью в центре поля 35 линий/мм. Геометрическое линейное уменьшение равнялось 4. Изображение на экране ЭОП^а фотографировалось с уменьшением в 2,6 раза объективом того же типа со светосилой 1:8 на пленке Микрат-300. При этом второй объектив передавал с экрана не более 14 линий/мм. На Рис. 18 приведены значения тока в катушках, при которых реализуется фокусировка вплоть до II-го порядка при напряжении 9 кв/каскад. Порядок фокусировки в УМ-163 подчиняется зависимости

$$n = 1,07 \cdot \frac{H}{\sqrt{LI}} \quad (29)$$

Фотографии изображения миры на экране при $LI = 9$ кв/каскад показаны на рис. 19.

Результаты испытаний показали следующее:

I. При повышении напряженности магнитного поля и переходе к фокусировкам более высокого порядка, наблюдается резкое уменьшение дисторсий. На Рис.20 приведены значения изотропной дисторсии, измеренные при двух значениях тока в катушках. По оси абсцисс отложено расстояние от центра фотокатода до измеряемой точки. По оси ординат - величина относительного отклонения $\left(\frac{\Delta z}{z}\right)$ наблюдаемого изображения от гауссова изображения. Кривые, проведенные по экспериментальным точкам, описываются квадратичными парабололами

$$\left. \begin{aligned} -\left(\frac{\Delta z}{z}\right) &= 7,6 \cdot 10^{-5} \cdot z^2 \quad (n=3) \\ -\left(\frac{\Delta z}{z}\right) &= 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot z^2 \quad (n=11) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Остаточная дисторсия, наблюдаемая при $n = II$, может быть уменьшена путем более точного совмещения центральной плоскости каскада с плоскостью симметрии магнитного поля. Знак изотропной дисторсии зависит от порядка следования этих плоскостей.

Фотографии, приведенные на рис.19, и данные рис.20 были получены в условиях, когда сдвиг между плоскостями равнялся 1 см.

Спиральная дисторсия, измеренная в тех же условиях, приведена на рис.21. В качестве характеристики дисторсии взят угол $\Delta \theta$ на расстоянии $z = 4$ см от центра фотокатода. Кривая, проведенная на рисунке, соответствует зависимости

$$\Delta \theta = 9,2 \cdot 10^6 (\bar{H}_z)^{-3}, \quad (31)$$

удовлетворительно описывающей зависимость $\Delta \theta$ от напряженности поля при $H_z > 500$ э.

Таким образом, при напряженности магнитного поля около 1 кэ изотропная и спиральная дисторсия не превышают 1% в круге радиусом 4 см, а в центральной части фотокатода имеют значительно меньшую величину.

2. Яркость фонового свечения экрана и степень нестабильности напряжения на каскадах сильно зависят от положения ЭОП'а относительно катушек соленоида. Фоновое свечение становится минимальным, когда центральная плоскость каскада совпадает в пределах ± 1 см с плоскостью симметрии катушек.

3. Фоновое свечение экрана и нестабильность оказались наибольшими при токах 75 + 180 а, а при повышении тока свыше 200а несколько уменьшаются. Именно это позволяет работать в режиме многократной фокусировки при достаточно больших напряжениях на каскаде. В однородном поле такого явления не наблюдается: повышение напряженности магнитного поля приводит к монотонному возрастанию яркости фонового свечения и нестабильности напряжения.

4. Разрешающая способность в статическом режиме равна 10 линий/мм по всему экрану или 710 линиям на весь диаметр. изображения на экране. При этом искажения составляют меньше 1%, а требуемая точность поддержания постоянства электрического поля соответствует

$$\frac{\Delta U}{U} \approx 3\% \quad , \quad (32)$$

а магнитного поля

$$\frac{\Delta H}{H} \approx 1\% \quad (33)$$

Разрешающая способность в импульсном режиме подачи напряжения измерялась в следующих условиях. Установка содержала 5 катушек с обмоткой по 10 витков в каждой. Глубина модуляции имела то же значение, $m = 0,14$, но среднее поле заметно падало из-за краевого эффекта на 15% в области первого каскада. При максимальном токе в 360 а и напряжении 10 кв/каскад было получено изображение 3-го фокуса. Блок-схема импульсного питания дана на рис.22, где указаны исходные значения потенциалов.

Окончательные рабочие значения потенциалов подбирались по-каскадно, придерживаясь в пределах 3% зависимости вида

$$\bar{H}_{z_i} \sim \sqrt{V_i} \quad (34)$$

где V_i -напряжение на i -ом каскаде, а \bar{H}_{z_i} - среднее значение H_z в области i -го каскада. Эти потенциалы затем подстраивались для достижения наилучшее значение разрешающей способности.

Фотографирование производилось на фотопленку изопанхром с чувствительностью 1200 ед. ГОСТ через объектив Г-40 со светосилой 1:2,8 и линейным уменьшением 3,3. В этих условиях измеренная разрешающая способность равнялась:

- 6 линий/мм в статическом режиме,
- 5 линий/мм в импульсном режиме,
- по всему экрану.

Данная установка с оптической системой, изображенной на рис.23 и 5 катушками была использована для фотографирования слабо светящихся треков в изотропной разрядной камере при проведении опытов /17/ на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

5. В Ы В О Д Ы

1. Разработан и исследован метод устранения искажений изображений на многокаскадных ЭОП'ах с использованием сильных магнитных полей напряженностью до 3000 э в режиме многократной магнитной фокусировки.

2. В первой серии опытов многокаскадные ЭОП'ы помещались в однородное магнитное поле. Наблюдалось существенное уменьшение искажений изображения. Разрешающая способность при этом практически не изменялась. Однако, в однородном магнитном поле испытанные образцы ЭОП'ов типа УМ работают нестабильно.

3. Исследование причин такой нестабильности показало, что в ЭОП'ах существующих конструкциях типа УМ обнаружено паразитное явление, заключающееся в том, что поток электронов, эмитированных с краев фотокатода и окружающей его металлизацией, при ^{в сильном магнитном поле} ~~увеличении~~ падают на боковые стеклянные стенки колбы, создают свечение экрана и вызывают пробой. Из-за этого все преимущества сильной фокусировки не удается использовать полностью в испытанных образцах ЭОП'ов типа УМ.

4. Во второй серии опытов ЭОП'ы помещались в неоднородное магнитное поле, обладающее плоскостями симметрии. Аксиальная компонента магнитного поля было промодулирована до значения $m = 0,31$. Наблюдалась фокусировка вплоть до II порядка (УМ-163). Изотропная и спиральная дисторсия были уменьшены до 1% на максимальном радиусе, равном 4 см.

5. Проведенные исследования доказывают высокую эффективность метода уменьшения искажений изображения на экране многокаскадных ЭОП'ов с помощью сильных магнитных полей напряженностью до 3000 э в режиме многократной магнитной фокусировки.

Отсутствие жестких требований к величине напряжения на каскадах, к форме импульса напряжения и стабильности магнитного поля представляет большое преимущество данного метода перед другими методами уменьшения дисторсий. Существенным достоинством метода является стабильность изображения, необходимая для точных измерений. Такие факторы, как слабые внешние магнитные поля, изменение напряжений, которые в обычных системах вызывают смещение изображения первого фокуса, не сказываются в режиме сильной фокусировки, так как изображение "жестко" привязано к магнитным силовым линиям, т.е. фактически к тем конструктивным элементам, ^{ток В} которых создаёт сильное магнитное поле.

Серьезным ограничением при использовании режима сильной фокусировки в отечественных многокаскадных преобразователях является возрастание ^{до} ~~стабильности~~ фонового свечения экрана при увеличении магнитного поля.

Копия
Ан
Косов
Александр
Жуков

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1. Схематическое изображение фокусировки в сильном неоднородном магнитном поле. М - силовые линии магнитного поля, ФК - фотокатод, Э - экран, S - плоскость симметрии магнитного поля, А,В,С, (А', В', С') - точки объекта (изображения), Т - траектория электрона, испускаемого в точке С.
- Рис.2. Магнитный соленоид для многократной фокусировки изображения в электроннооптическом преобразователе. Одна из железных пластин снята.
- Рис.3. Распределение аксиальной компоненты поля вдоль оси соленоида. Кривая 1 - на оси соленоида, кривая 2 - на расстоянии 5 см от оси.
- Рис.4. Схема испытания преобразователей, работающих в сильном однородном магнитном поле.
ИС-источник света; М - мира; З - зеркало; O_1, O_2 - объективы; ФК-фотокамера; Д-диафрагма.
- Рис.5. Изображение мира на экране 6 каскадного ЭОП'а типа УМ-95, помещенного в однородное магнитное поле Н.
-Н=150 эВ-напряжение на каскадах 1-6 $U_{1-6}=6$ кВ,
 $n=1$; б-Н=935 эВ, $U_{1,2}=5$ кВ, $U_{3-6}=5,5$ кВ,
 $n=6$; в - Н=1.680 эВ, $U_{1,2}=4$ кВ, $U_{3-6}=5,5$ кВ,
 $n_{1,2}=13$, $n_{3-6}=11$.
- Рис.6. Зависимость предельно допустимого напряжения на каскад от напряженности магнитного поля. а - для одного каскада, б - для 4-х каскадов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. И.И.Цуккерман "Электронная оптика в телевидении"
Госэнергоиздат, 1958.

2. В.М.Кельман, С.Я.Явор "Электронная оптика" изд."Наука", 1968.

3. J.D. Mc Gee et al., "Advances in Electronics and Electron Physics",
22A, 113, Academic Press, New York (1966)

4. И.И.Цуккерман, ЖТФ, 25, 950 (1955).

5. Г.Б.Бондаренко, М.М.Бутслов, С.В.Сомов, А.П.Цитович,
ПТЭ, 4, 181, (1967).

6. P. Izedale et al., "Adv. in El. and El. Phys." 16, 333 (1962)

7. R.L. Burle, W.M. Wreathall, "Adv. in El. and El. Phys." 16, 333 (1962)

8. Д.К.Шалабутов, Н.С.Масленникова, ЖТФ, 26, 1166, (1956).

9. O. Greldemeister, R. Giese, "Adv. in El. and El. Phys." 16, 113 (1962)
Nucl. Instr. and Meth. 20, 233 (1963)

10. R.P. Randell, "Adv. in El. and El. Phys." 22A, 87 (1966)

11. Б.Ленарт "Динамика заряженных частиц" "Атомиздат, (1967).

12. Е.К.Завойский, Г.Е.Смолкин, А.Г.Плахов, М.М.Бутслов,
ДАН СССР, 100, 241 (1955).

М.М.Бутслов, В.И.Комаров, О.В.Савченко, ПТЭ № 3, 75 (1965).

13. В.И.Комаров, О.В.Савченко, Н.С.Федяев. Препринт ОИЯИ,
2741, (1966);

14. V.I. Komarov, O.V. Savchenko, N.S. Fedjaev, Nucl. Instr.
and Meth. 50, 105 (1967).

15. В.И.Комаров, В.И.Петрухин, О.В.Савченко. Препринт ОИЯИ,
PI-2802 (1966).

16. В.И.Комаров, Г.Е.Кисарев, О.В.Савченко. Препринт ОИЯИ PI-~~3721~~
Я.Ф, 8, 415 (1968) (1969)

17. В.И.Комаров, О.В.Савченко. Препринт ОИЯИ PI-4876 (1968),
~~.....~~

Рис. 7. Зависимость яркости фонового свечения экрана ЭОП'а от напряженности магнитного поля. По оси ординат отложен ток фотоумножителя, регистрирующего свечение экрана. Цифры на кривых обозначают напряжение на каскаде в киловольтах. Каждое из семейств кривых снято на определенном образце преобразователя типа УМ-95 при включении только последнего каскада.

Рис. 8. Зависимость яркости фонового свечения экрана ЭОП'а от напряженности магнитного поля при включении 4-х последних каскадов УМ-95. Обозначения те же, что и на рис.6,3.

Рис.9. Люминесценция стекла колбы преобразователя, помещенного в сильное магнитное поле. Хорошо видно равномерное свечение экрана и локальная люминесценция боковых стенок.

Рис.10. Зависимость яркости фонового свечения экрана нескольких образцов одного каскада типа УМ-95 (образцы без металлизации и с "ловушкой") от напряженности магнитного поля. Обозначения те же, что и на рис. 6.3.

Рис. 11. Конструкция обычного (а) и модифицированного (в) каскадов; ф-фотокатод; э - экран; ФЦ - фокусирующий цилиндр; М-металлизация; СК - стеклянная колба; ТЭ - траектории электронов автоэмиссии; КМ - край металлизации; АП-аквадаговое покрытие; ОК - охранный кольцо.

Рис.12. Зависимость яркости свечения экрана 3-х камерного ЭОП'а (камеры типа УМ - 95 — — — обычного типа и — . — . — модифицированного типа) от напряженности однородного магнитного поля. Цифры около кривых обозначают напряжение на каскаде в киловольтах.

Рис.13. Изображение миры на экране 3-х камерного ЭОП'а с модифицированными каскадами.

а) $N=250$ э; $L=12$ кв/каскад

б) $N=3$ кэ; $L=15$ кв/каскад

Рис.14. Изображение мира на экране 4-х каскадного ЭОП'а типа УМ-163 в однородном магнитном поле

а. $U = 8$ кв/каскад, $N = 280$ э;

б. $U = 6,5$ кв/каскад, $N = 2.000$ э.

Рис.15. Установка с неоднородным магнитным полем.

а - общая схема, ИС - источник света, Р - диффузный рассеиватель; М - мира; МК - магнитная катушка; O_1, O_2 - объективы.

б - конструкция магнитной катушки.

Рис.16. Распределение аксиальной H_z и радиальной H_r компонент магнитного поля вдоль оси системы.

Рис.17. Конфигурация силовых линий магнитного поля на расстоянии 5,5 см от оси системы.

Рис.18. Зависимость порядка фокусировки n от тока в катушках (и средней напряженности \bar{H}_z аксиальной компоненты магнитного поля).

Рис.19. Изображение мира, сфотографированное с экрана ЭОП'а при $U = 9$ кв/каскад и нескольких значениях тока катушек:

а) $i = 48a$, $n = 2$

б) $i = 75a$, $n = 3$

в) $i = 300a$, $n = 11$

г) один из элементов мира ($i = 300a$) в увеличенном масштабе.

Рис.20. Характеристика изотропной дисторсии при двух значениях тока в катушках. Пояснение в тексте.

Рис.21. Анизотропная дисторсия в зависимости от поля в катушках.

Рис.22. Упрощенная блок-схема импульсного питания преобразователя:
а - ждущий режим. Заштрихован нормально закрытый каскад
б - потенциалы на электродах ЭОП'а во время импульса длительностью 140 мксек, подаваемого с задержкой 5 мксек.

Рис.23. Оптикоэлектронная схема установки. Л - лампы подсвечивания для настройки в статическом режиме. ИИС - импульсный источник света; Р - диффузный рассеиватель; НМ (ВМ) - нижняя (верхняя) мира; З - зеркало; O_1 , O_2 - объективы, МК - магнитная катушка; РФК - регистрирующая фотокамера; к - камера, Э - прозрачные (сетчатые) электроды.

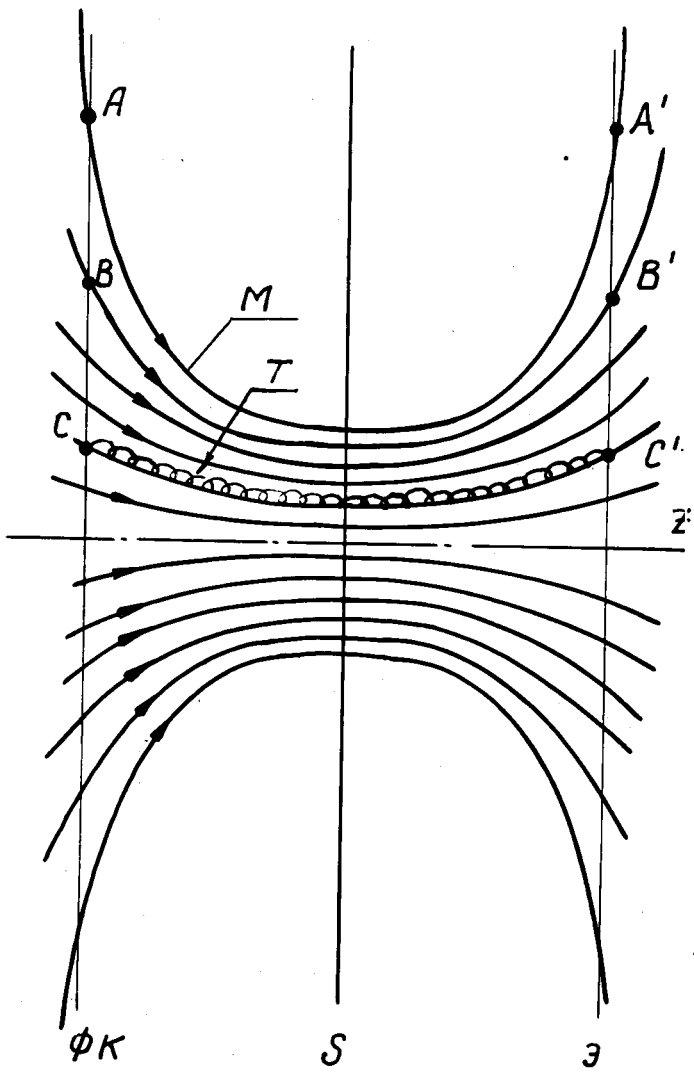


Рис. 1

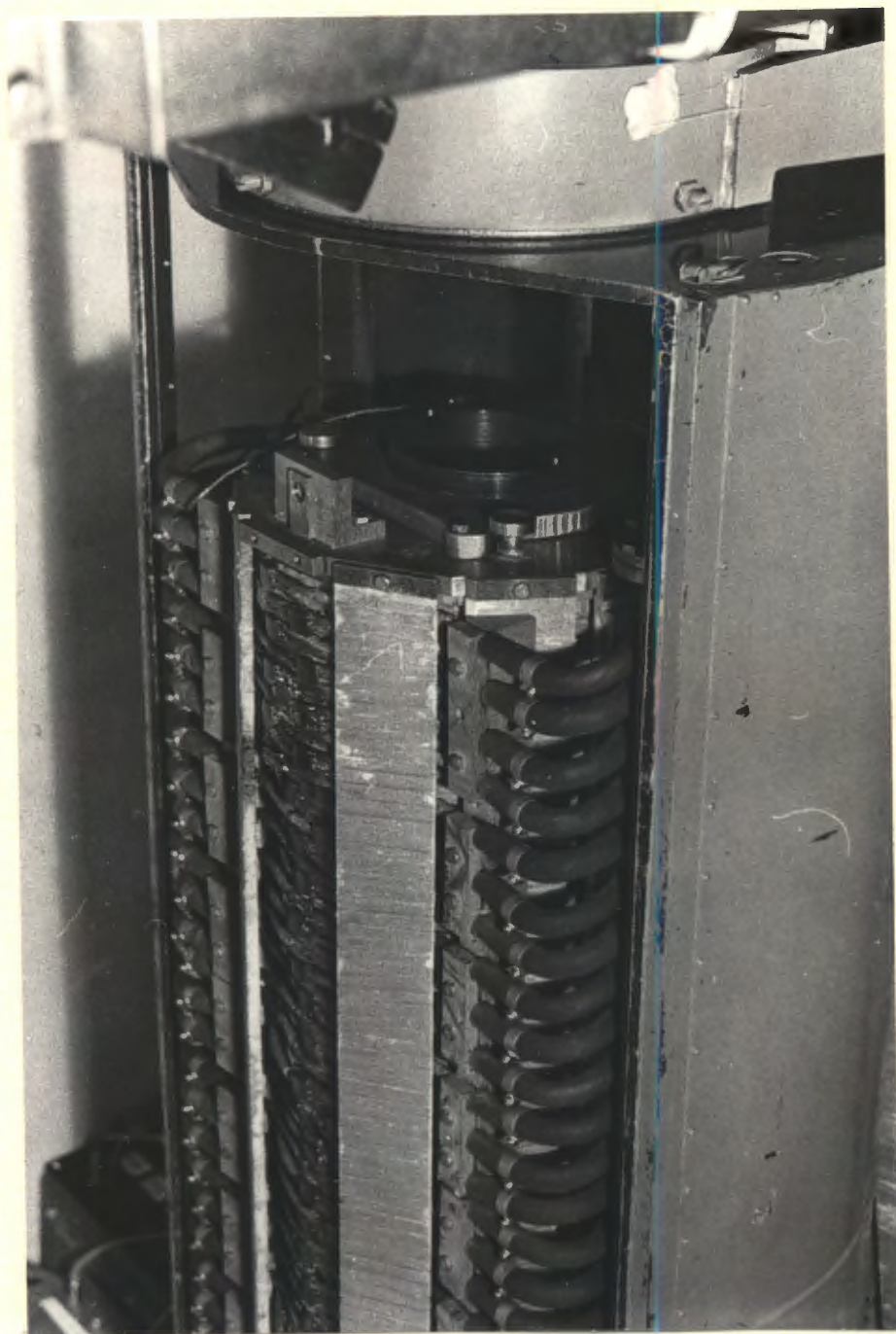


Рис. 2

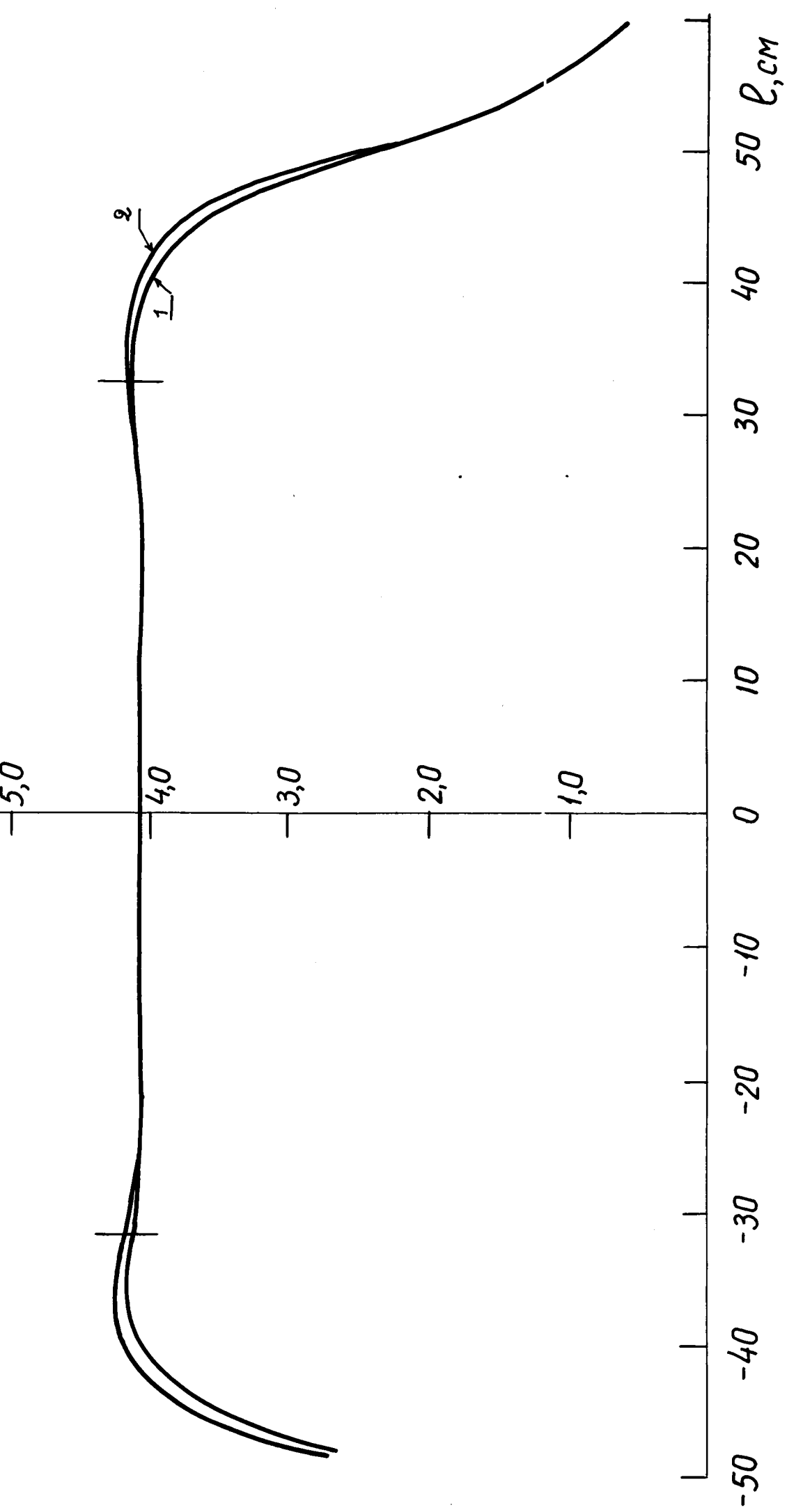


Рис. 3

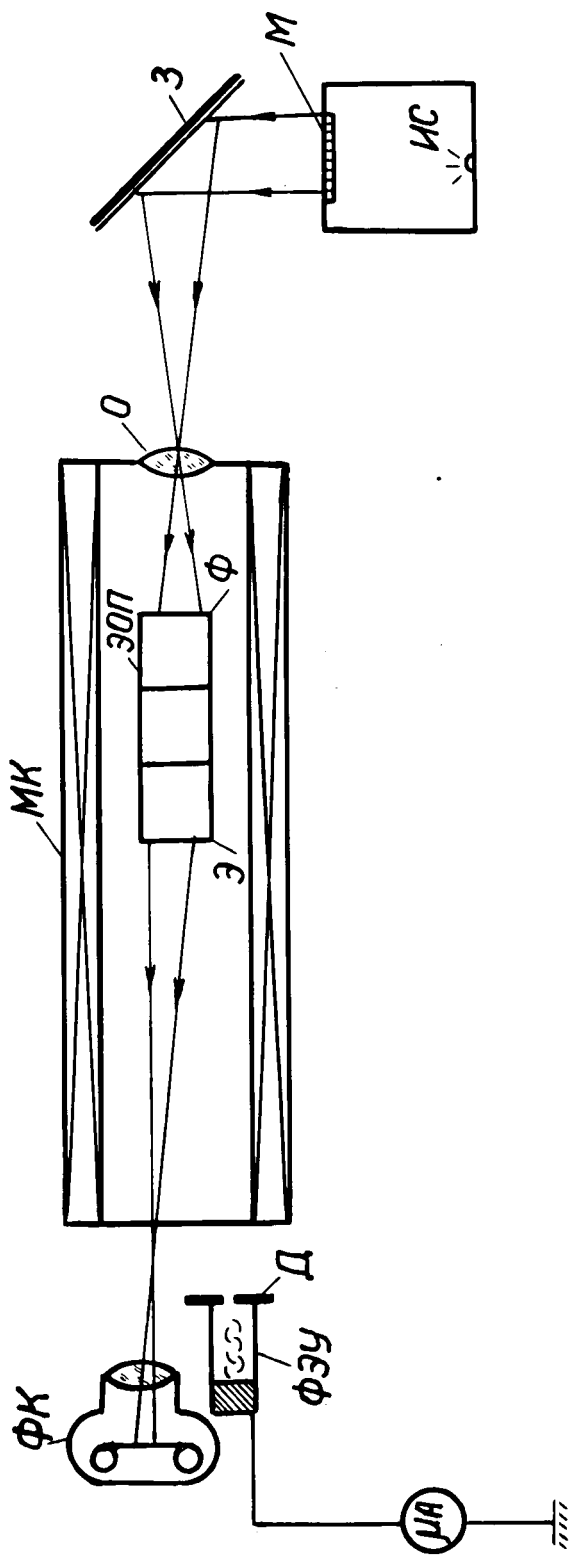
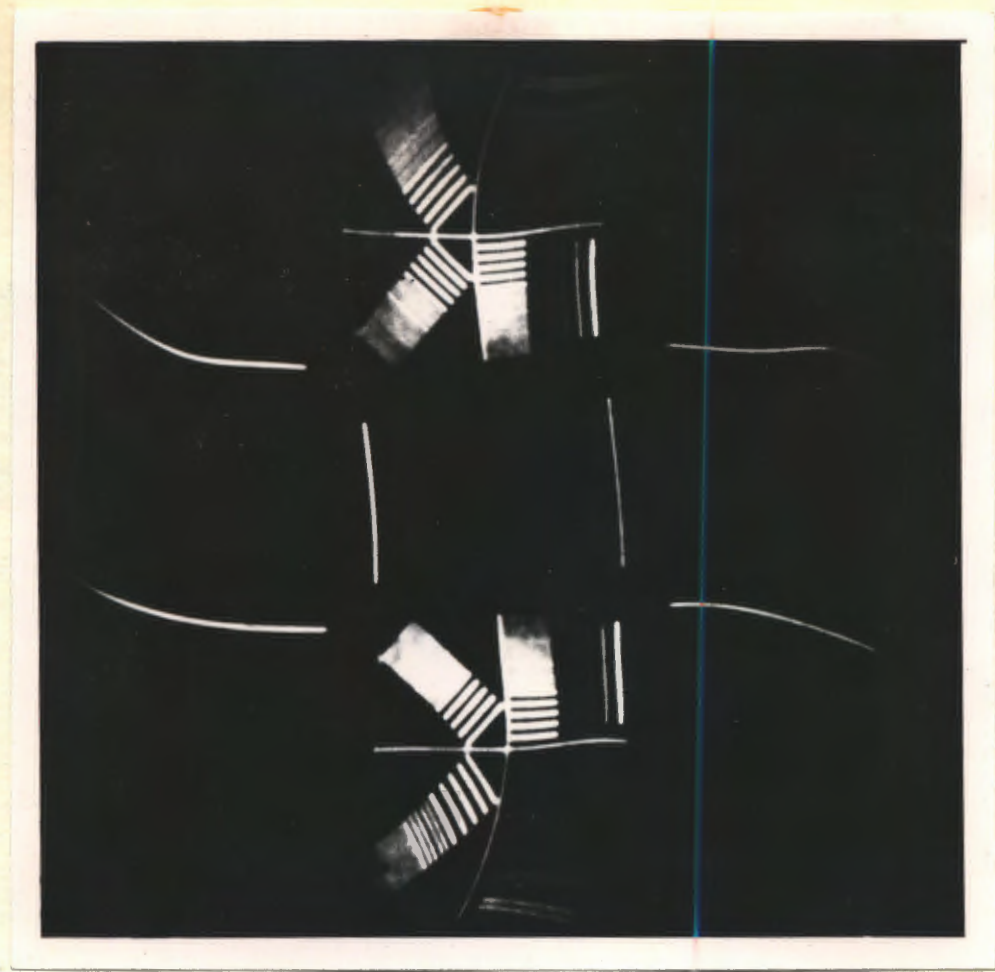
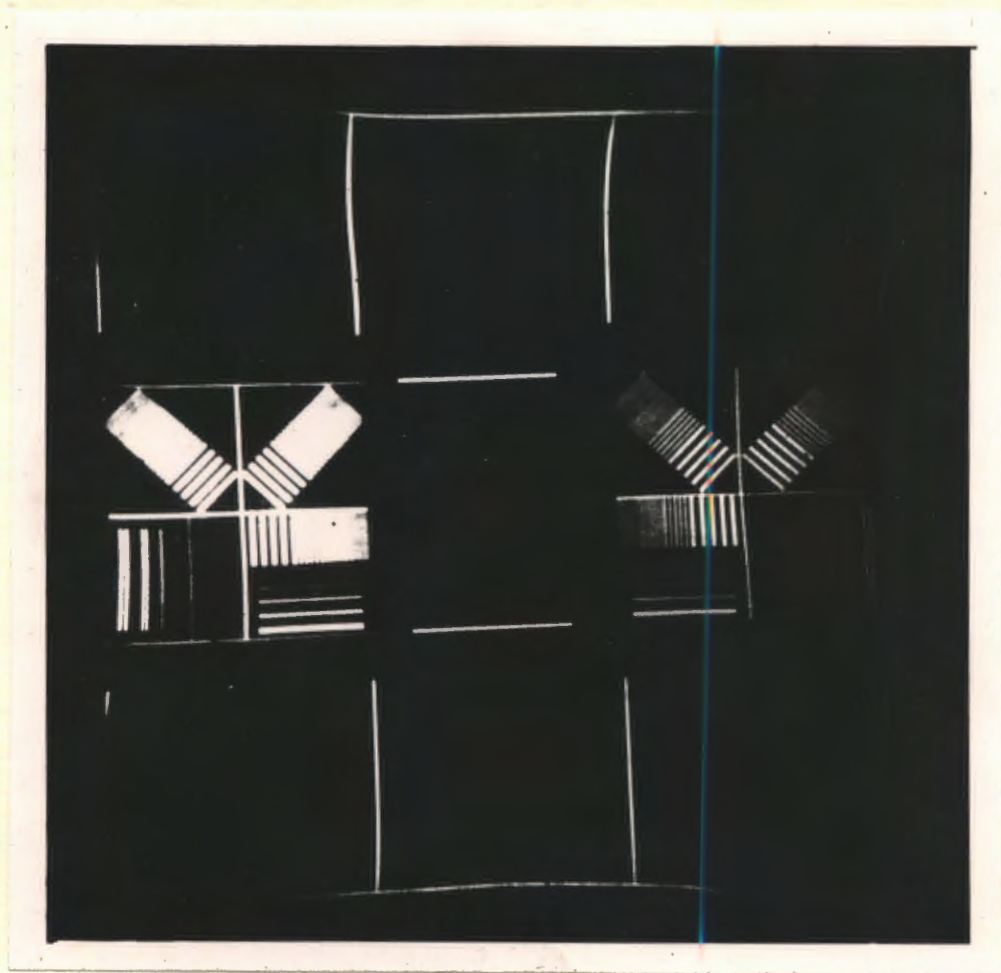


Рис. 4.

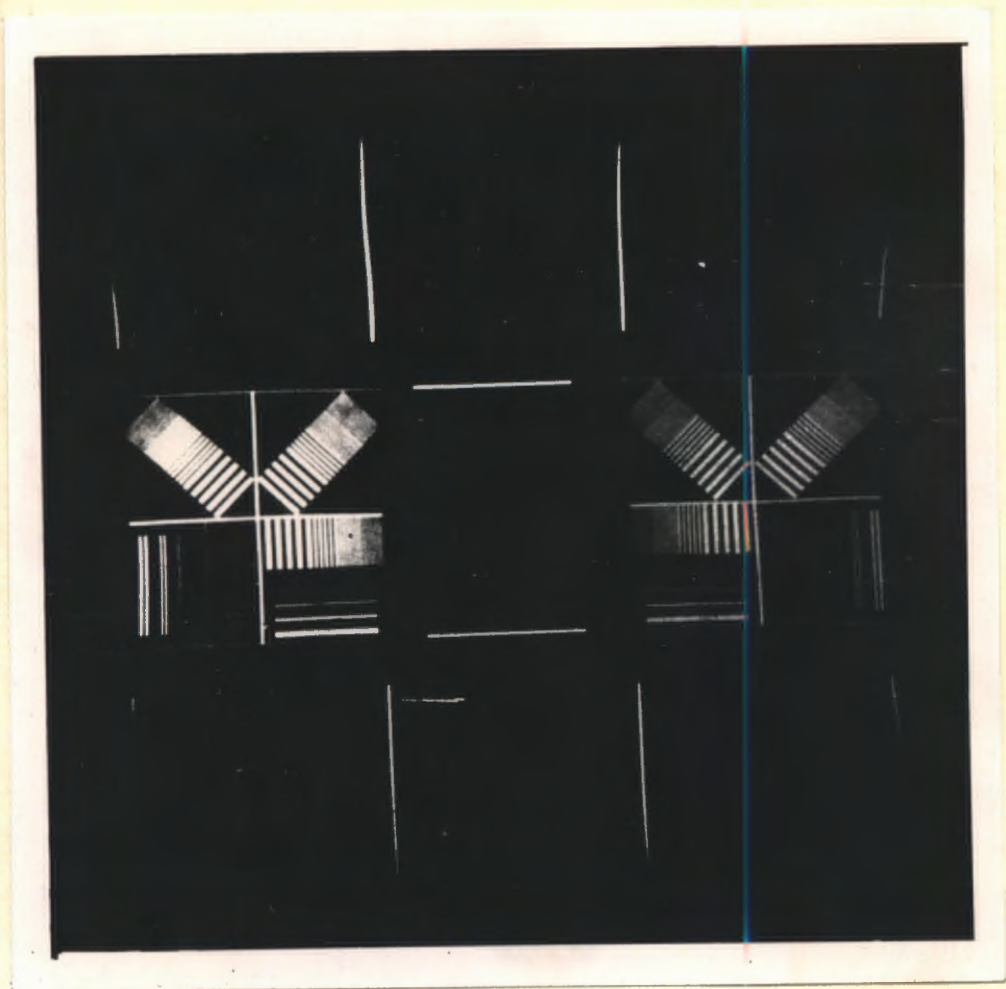


α.



δ.

Рис. 5



B.

Рис. 5

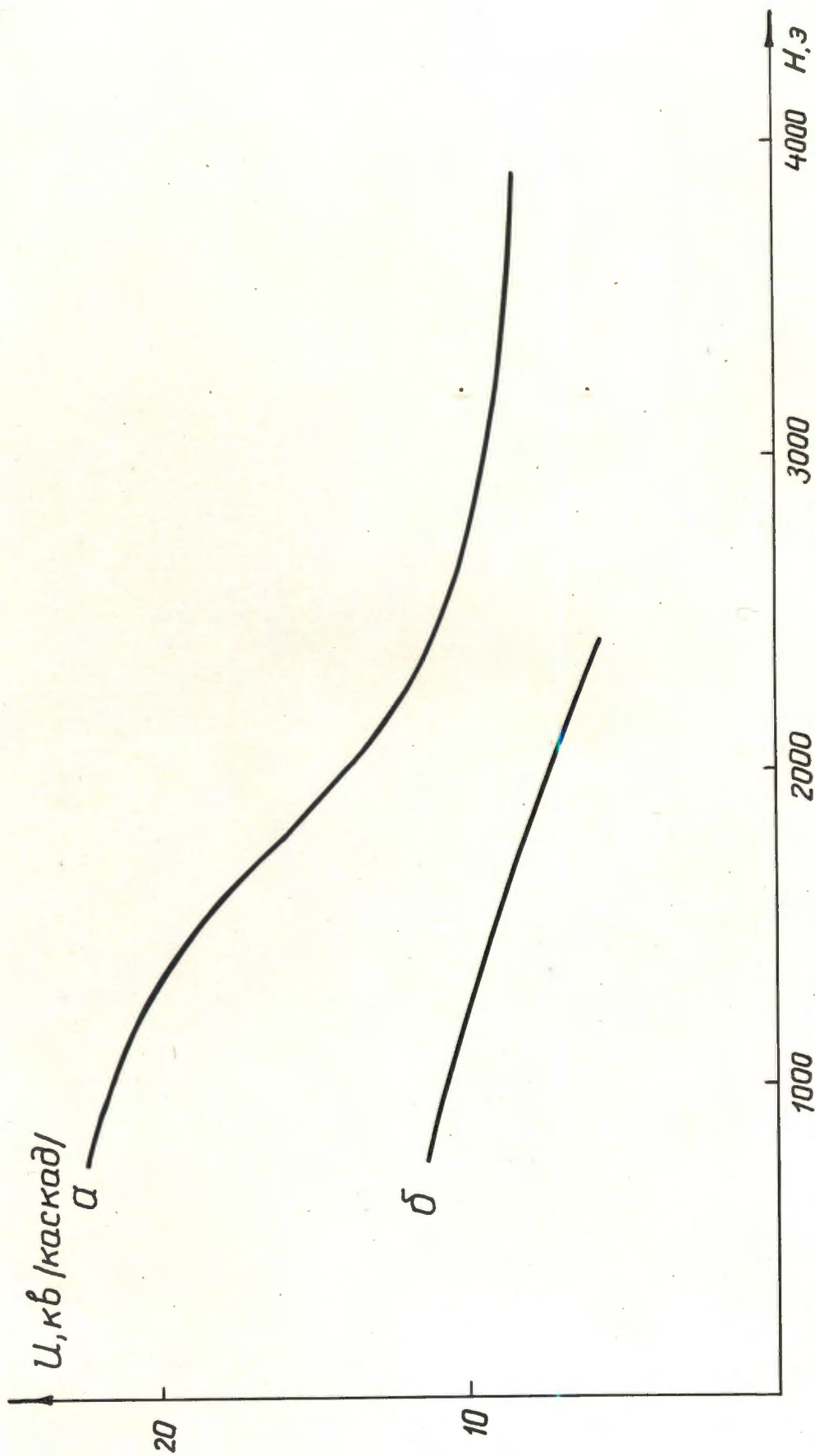


Рис. 6

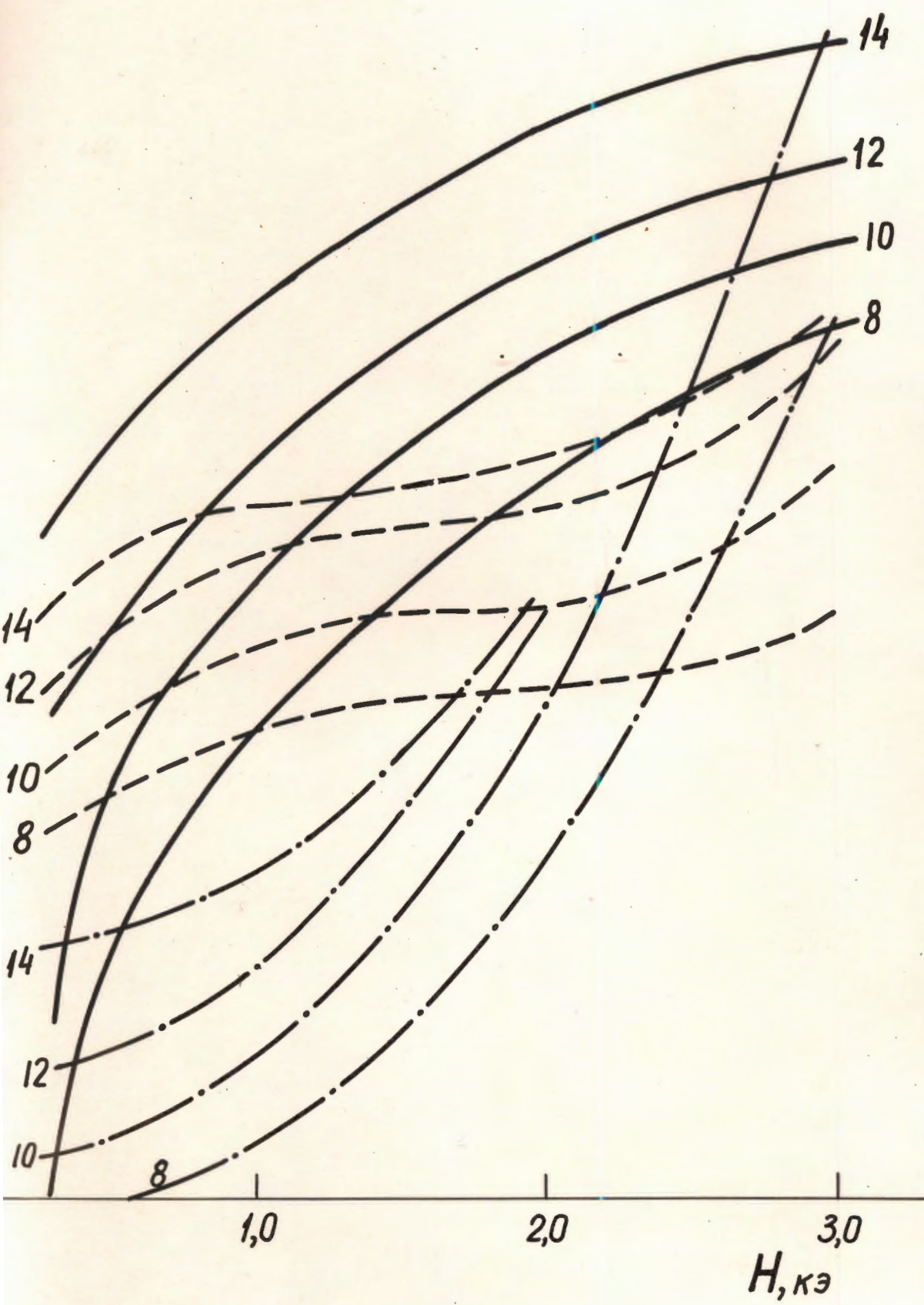


Рис. 7

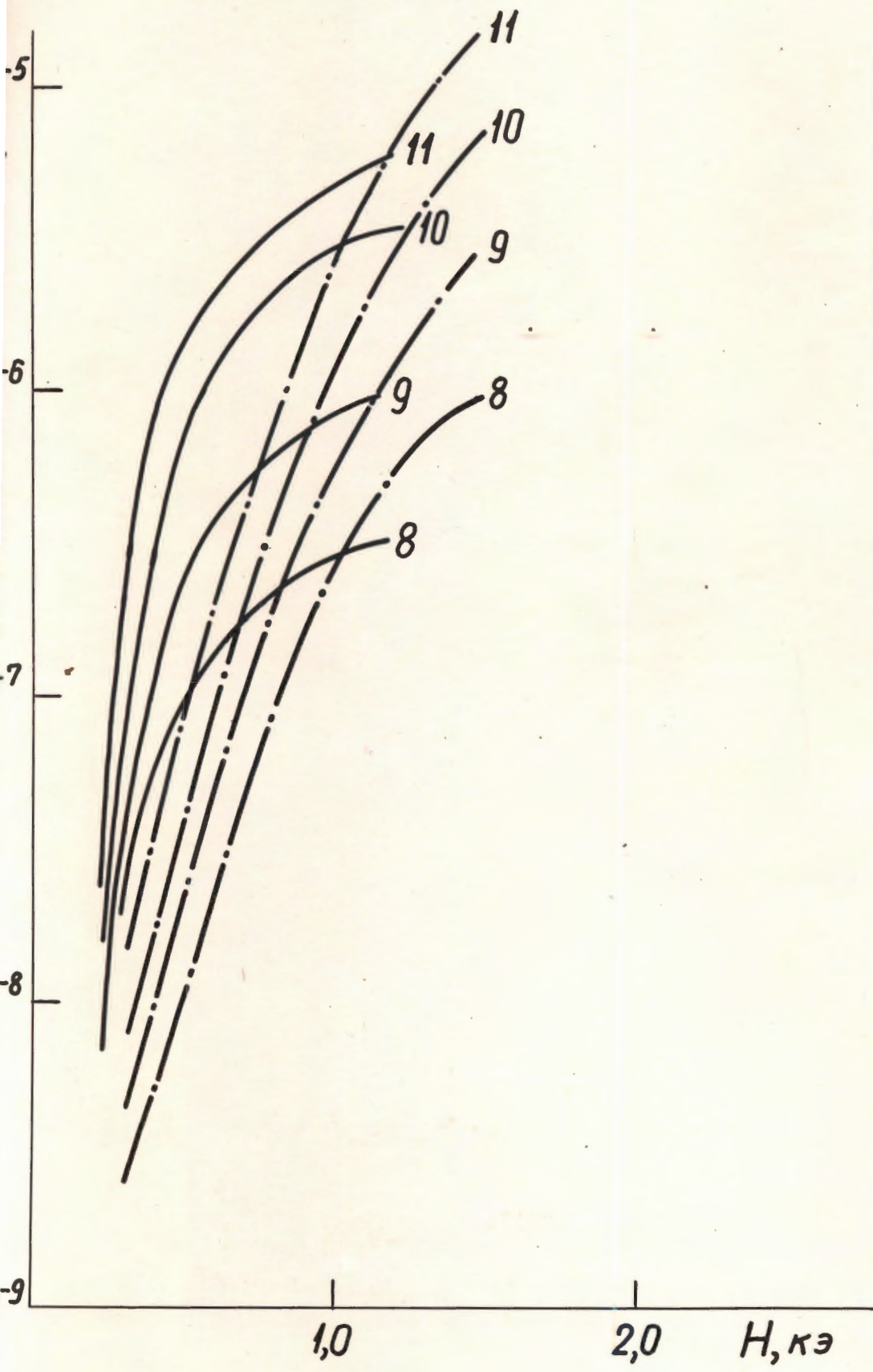
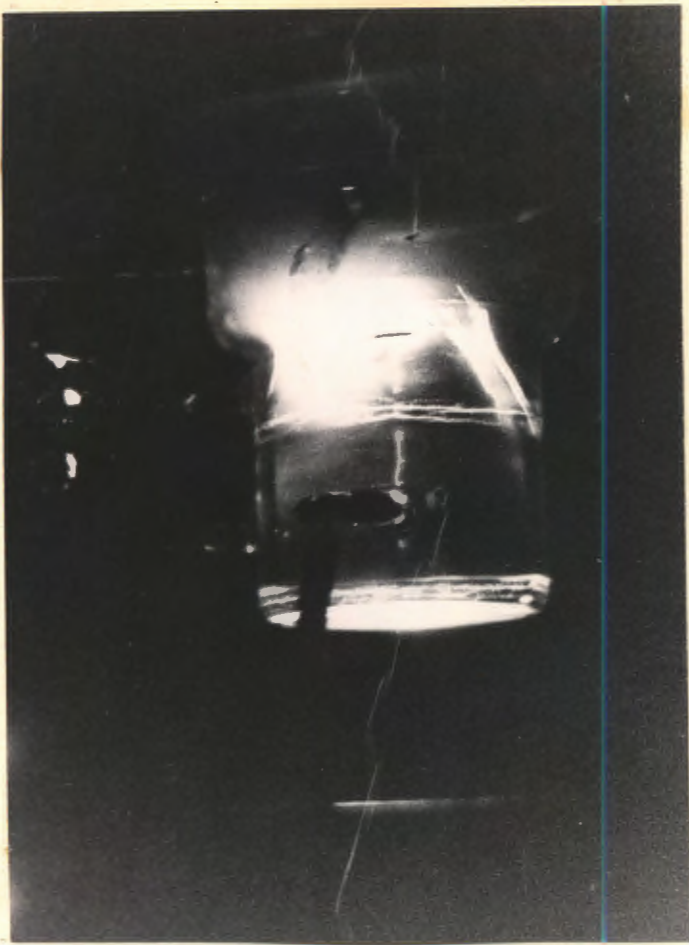


Рис. 8



PUC.9

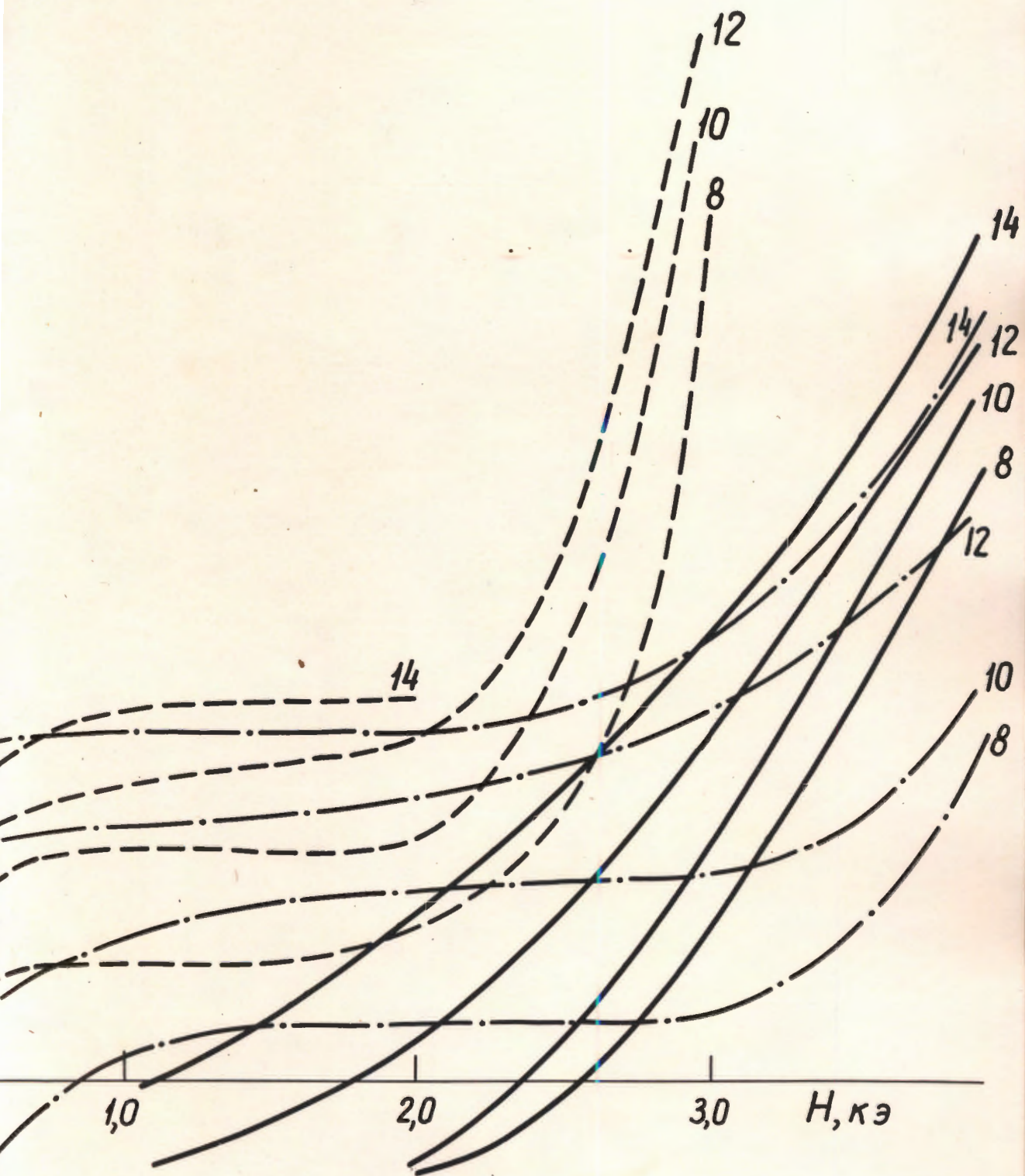
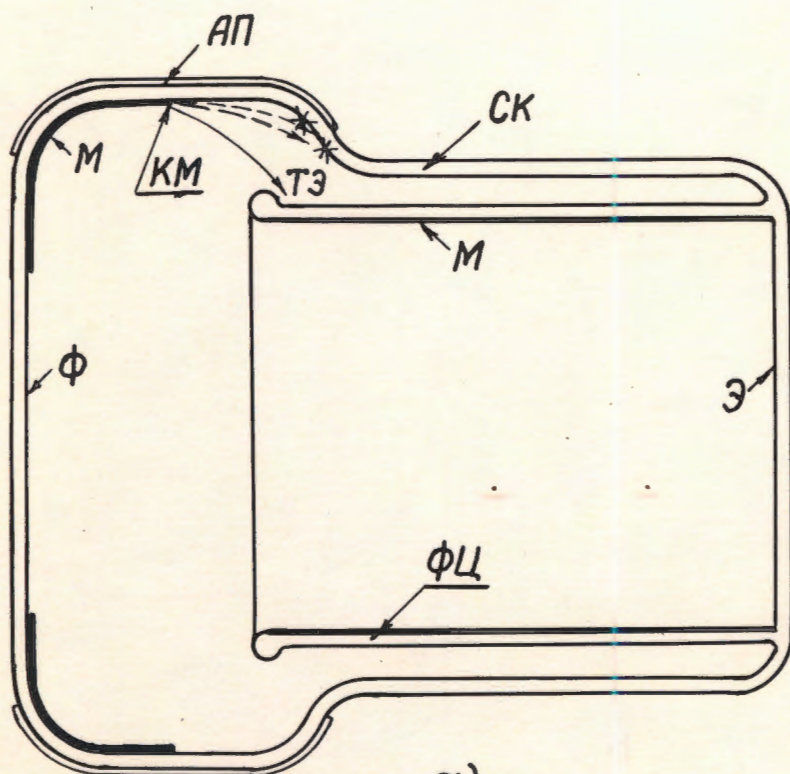
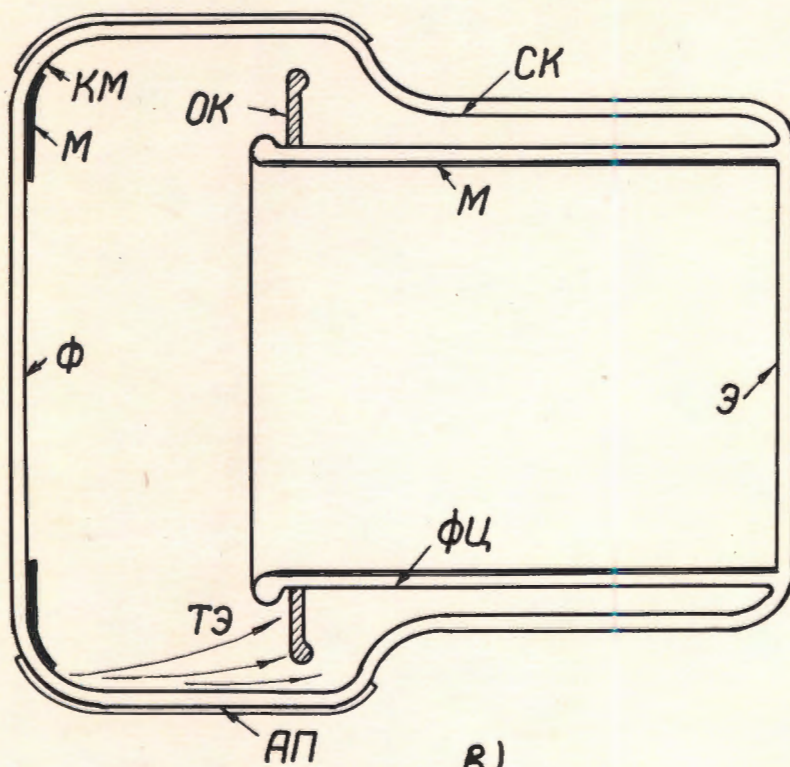


Рис. 10



а)



б)

Рис. 11

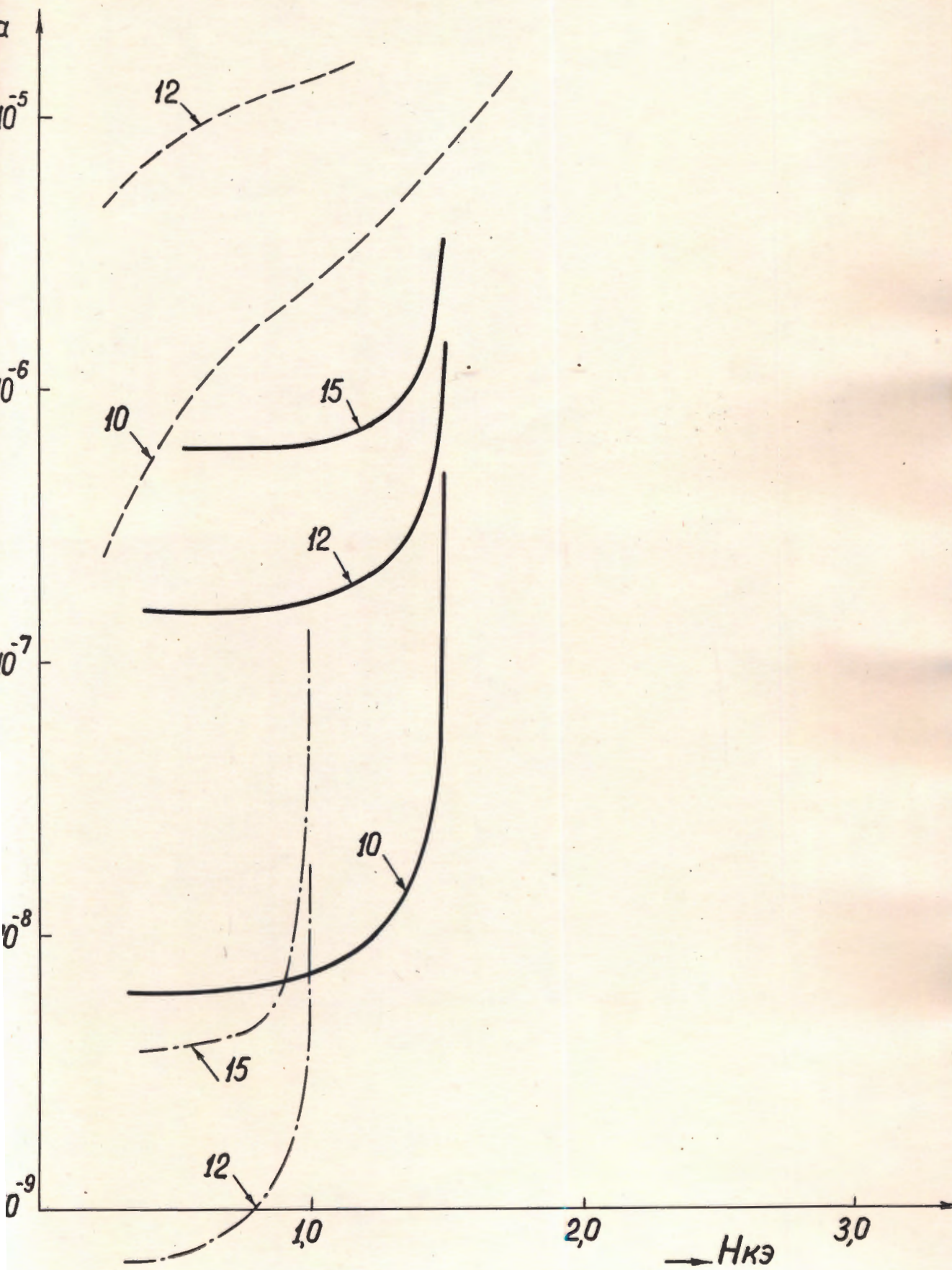
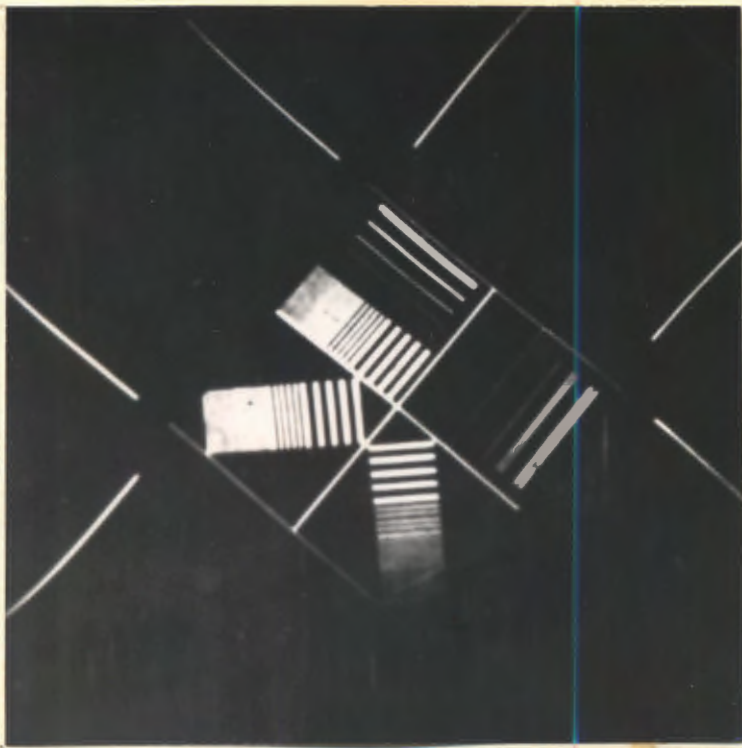
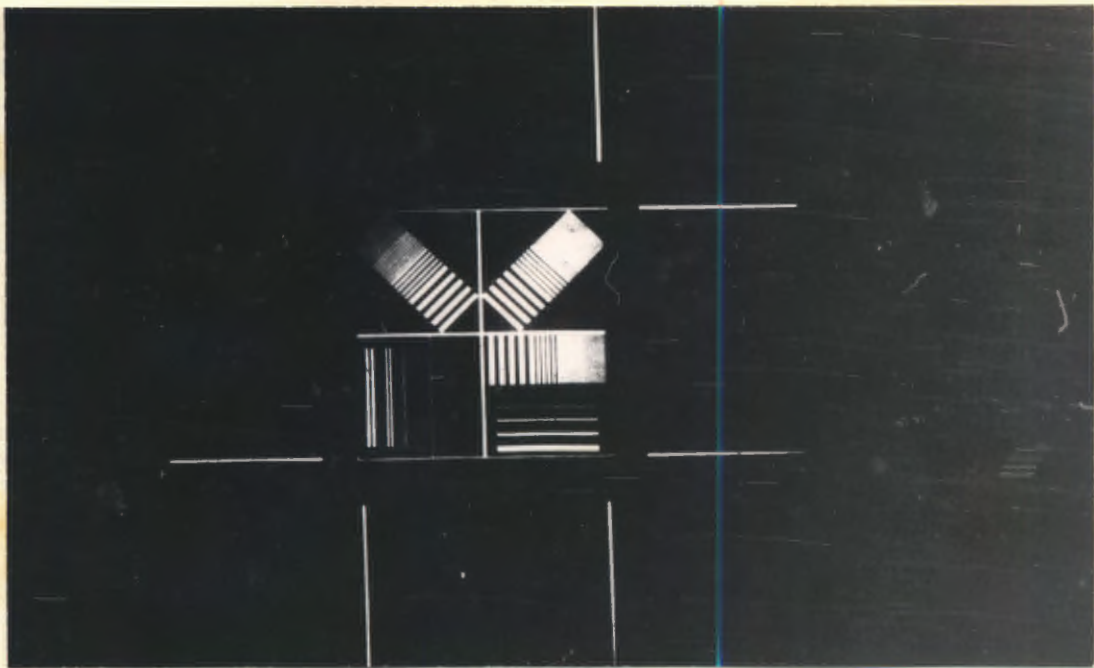


Рис.12

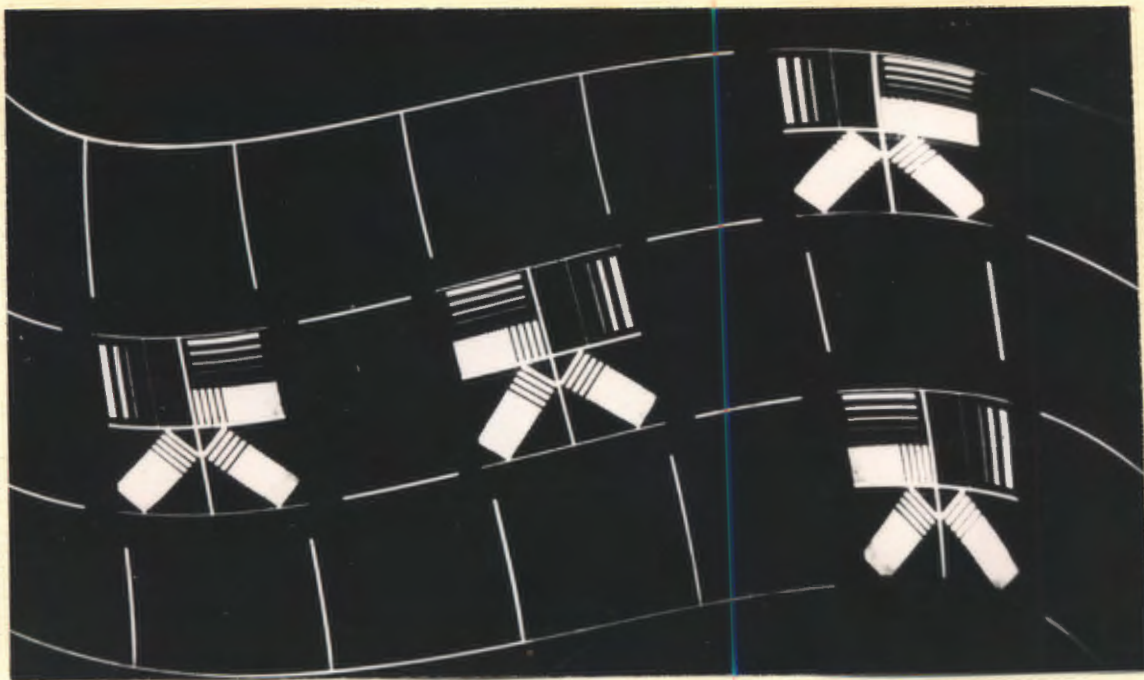


d.

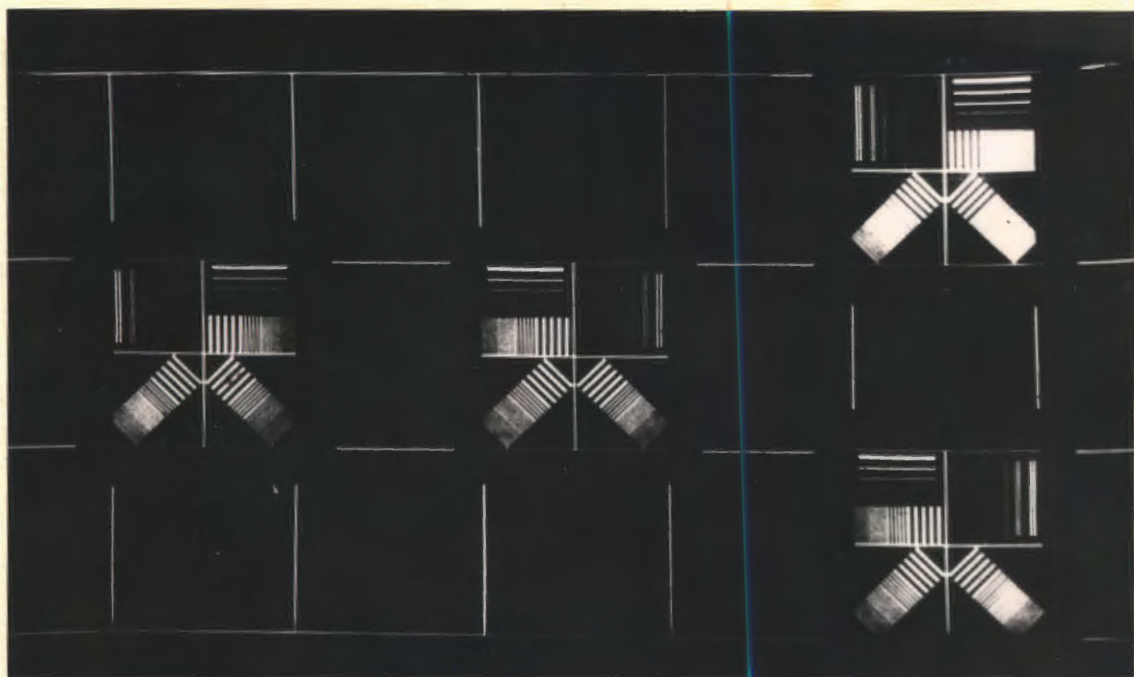


δ.

рис. 13

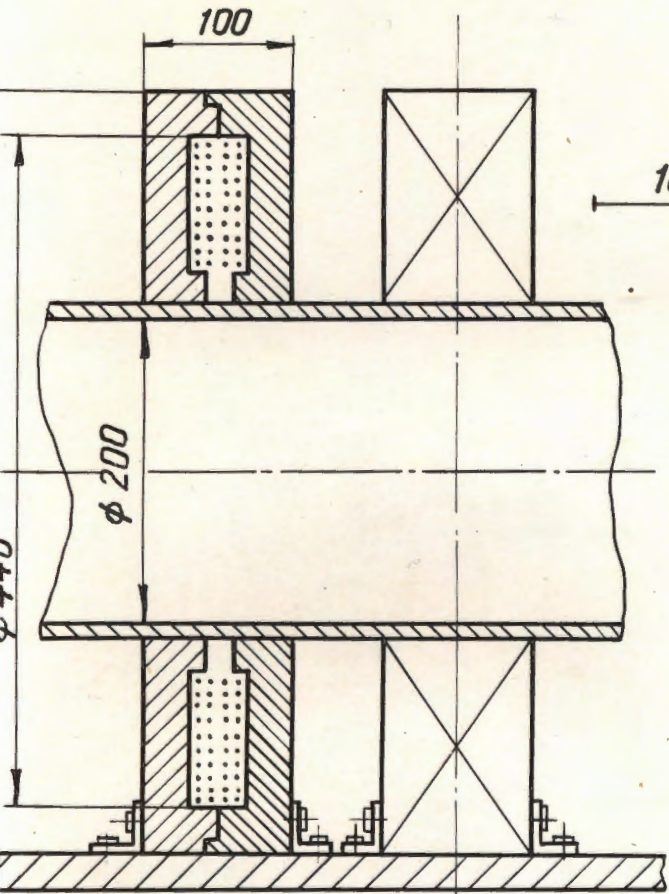


a.



δ.

Рис. 14



δ .

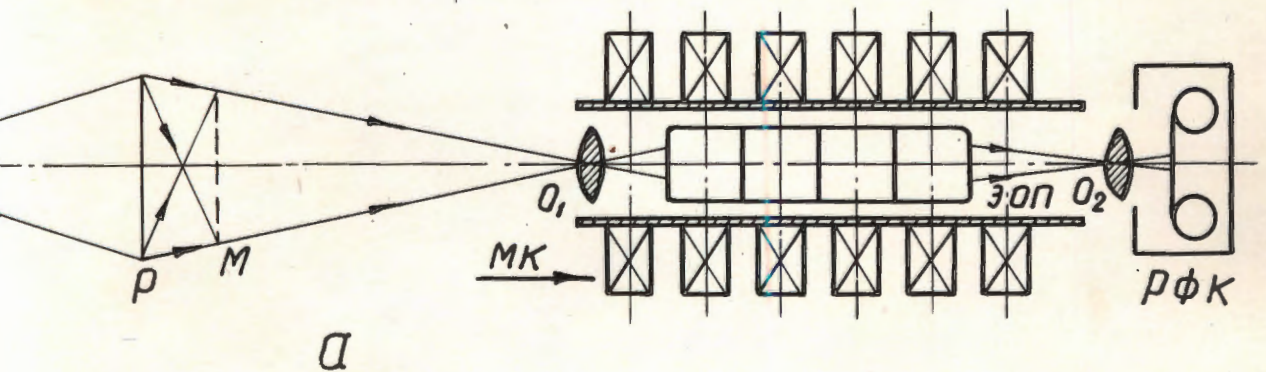


Рис. 15

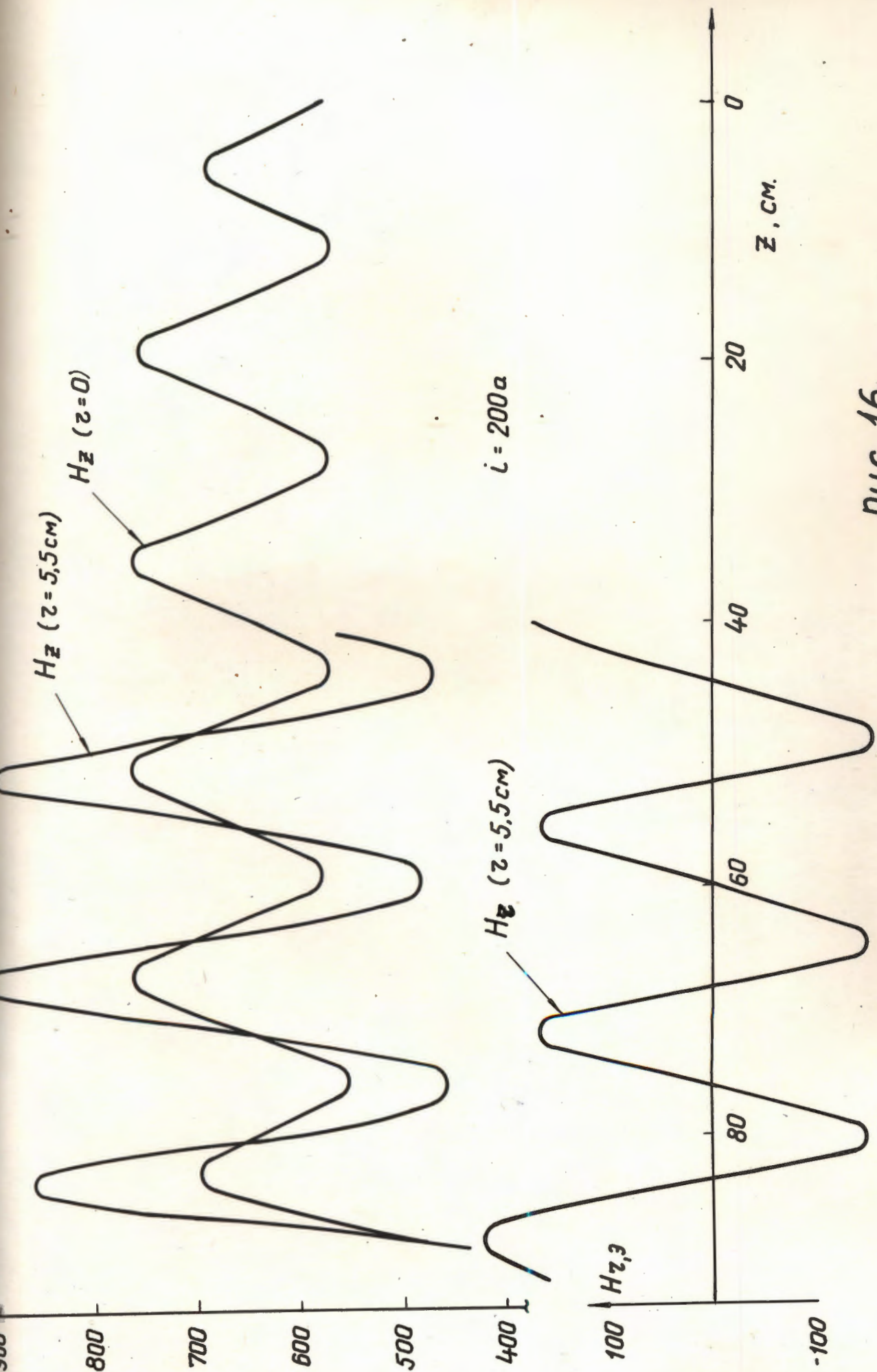


Рис. 16

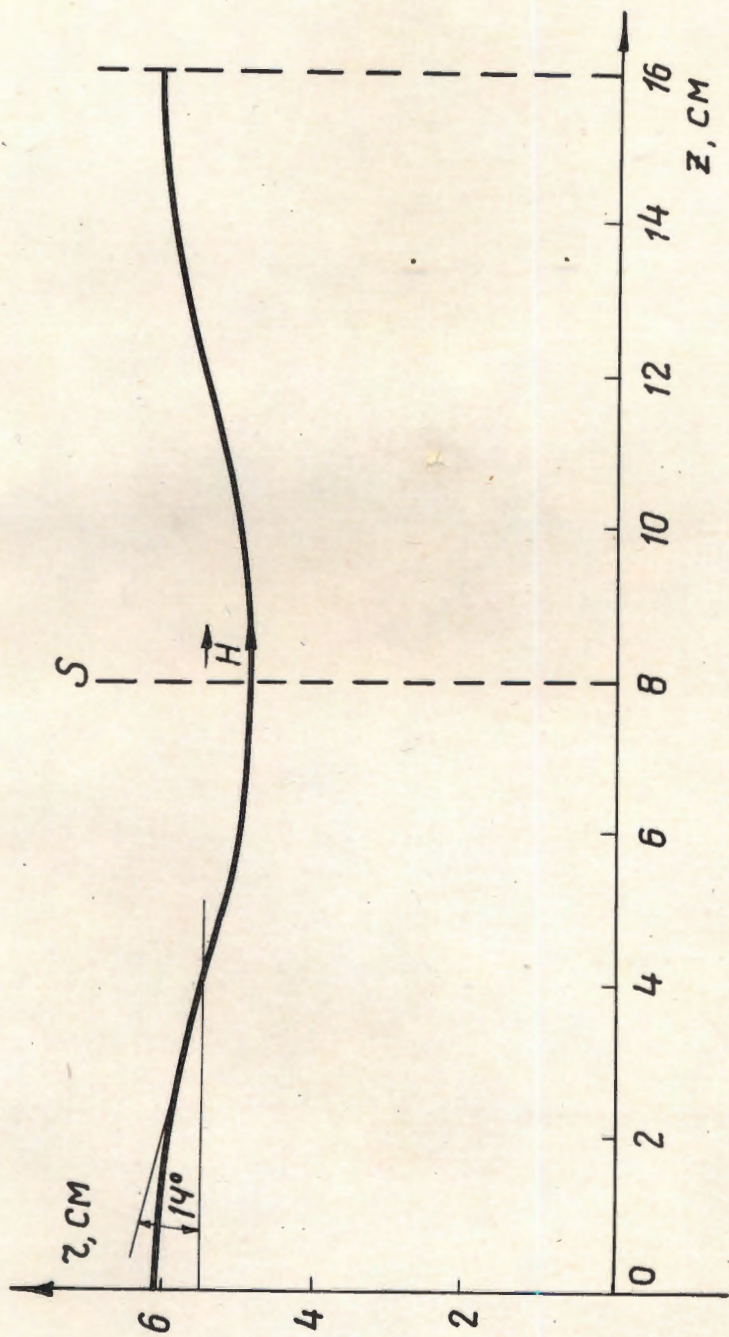


Рис. 17

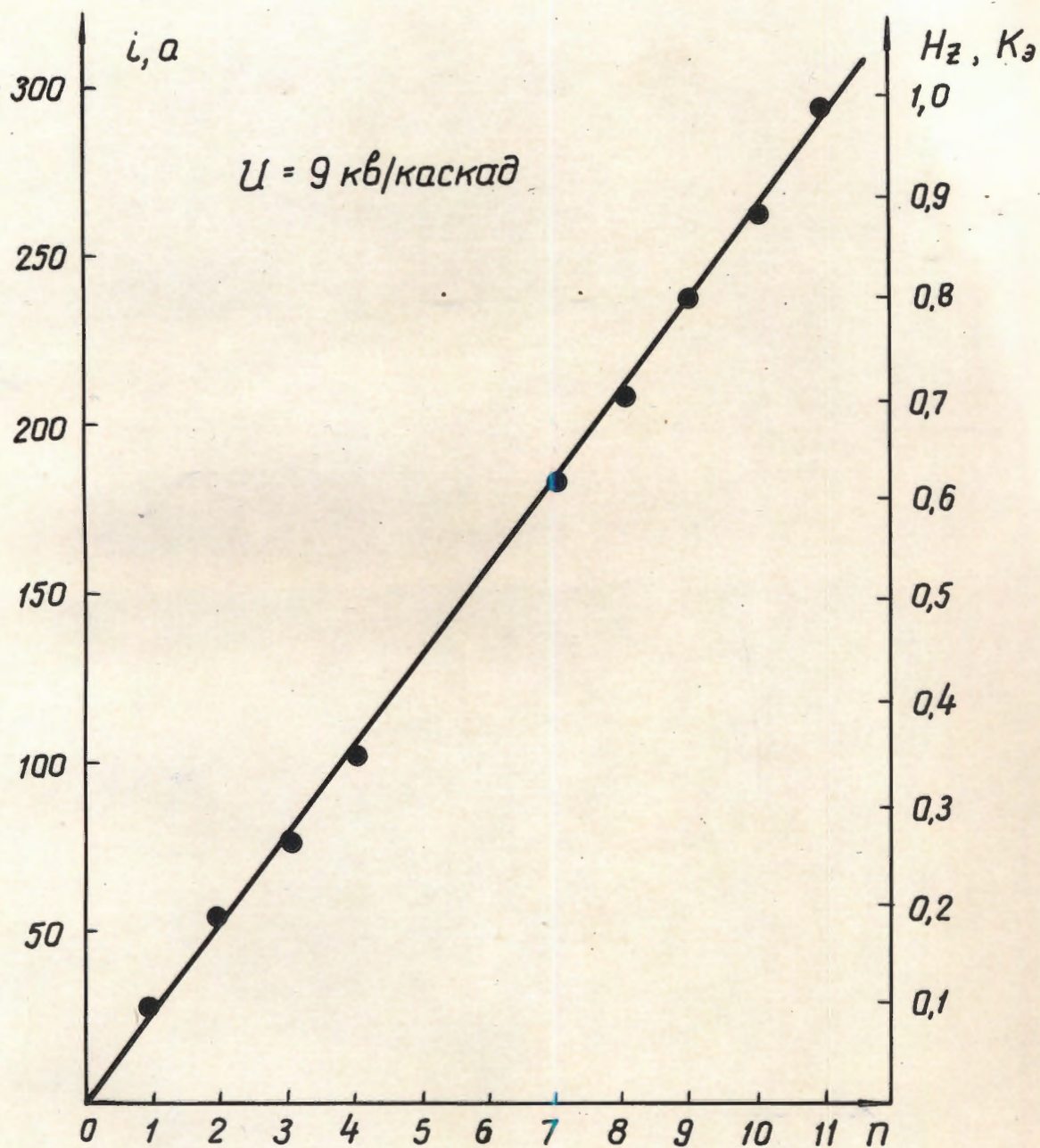
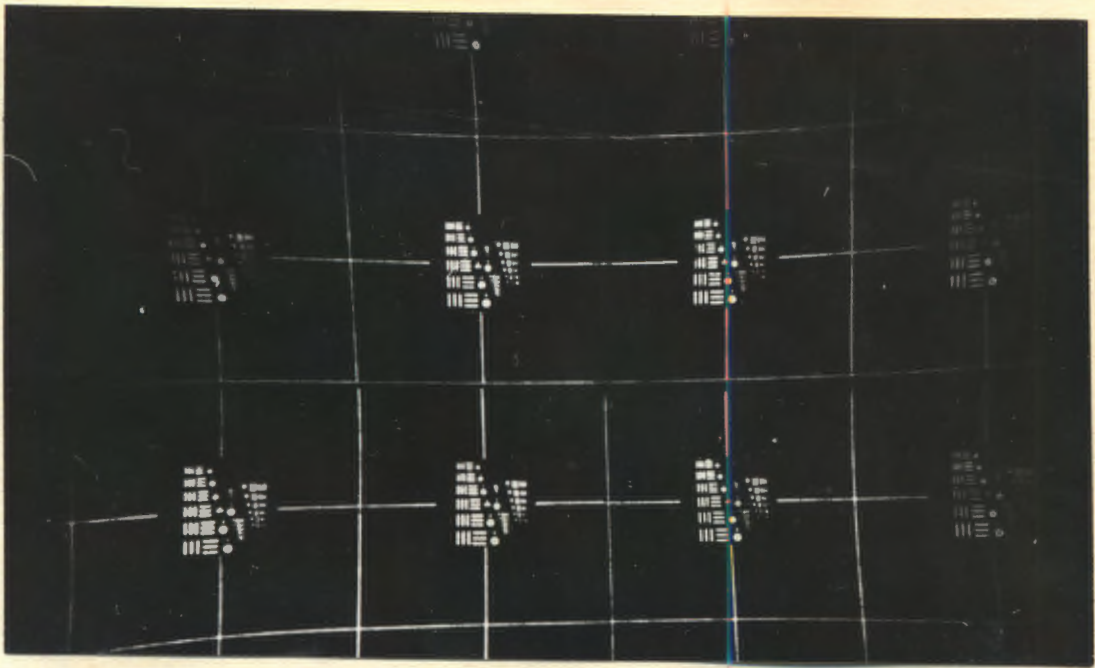
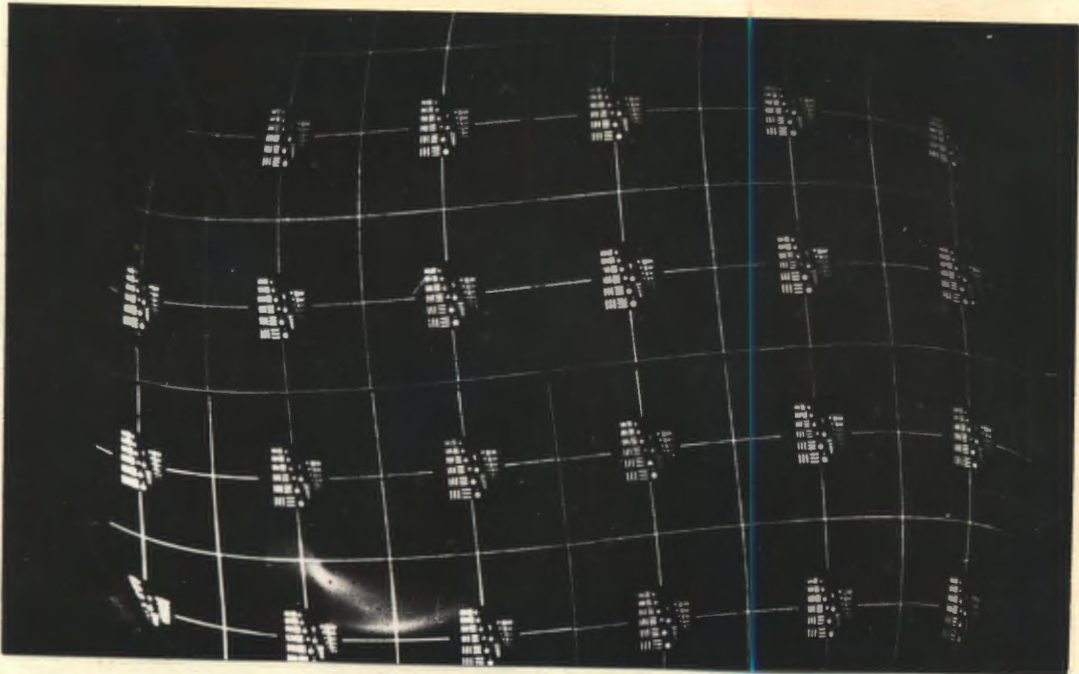


Рис. 18

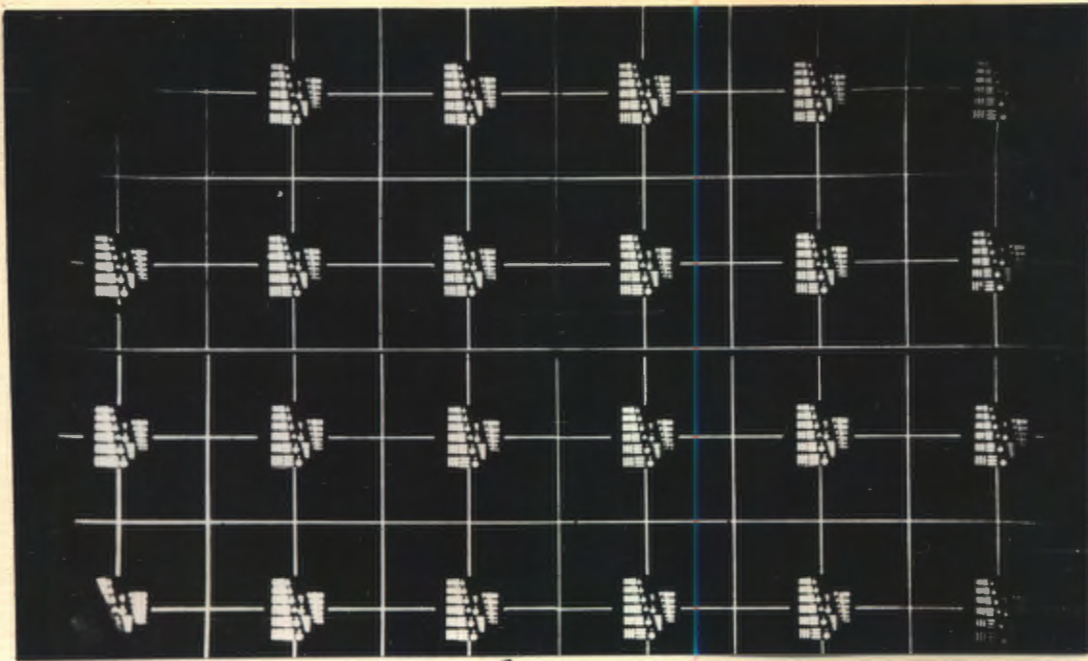


d.

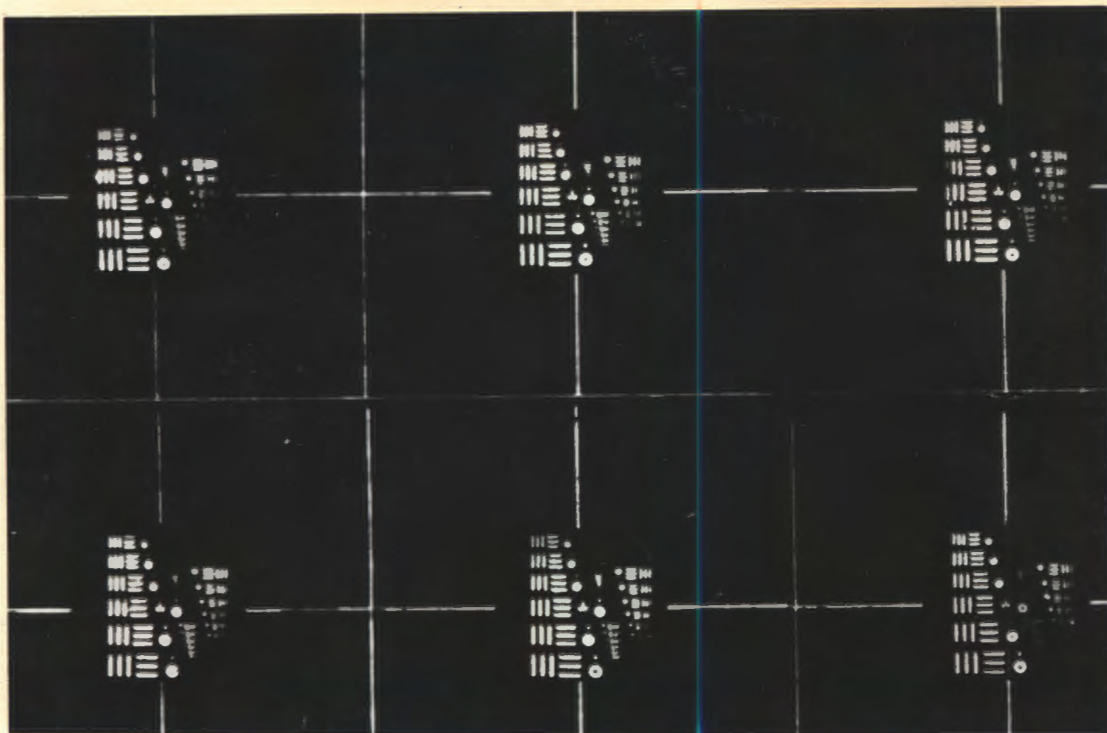


δ.

Рис. 19



B.



2.

Рис. 19

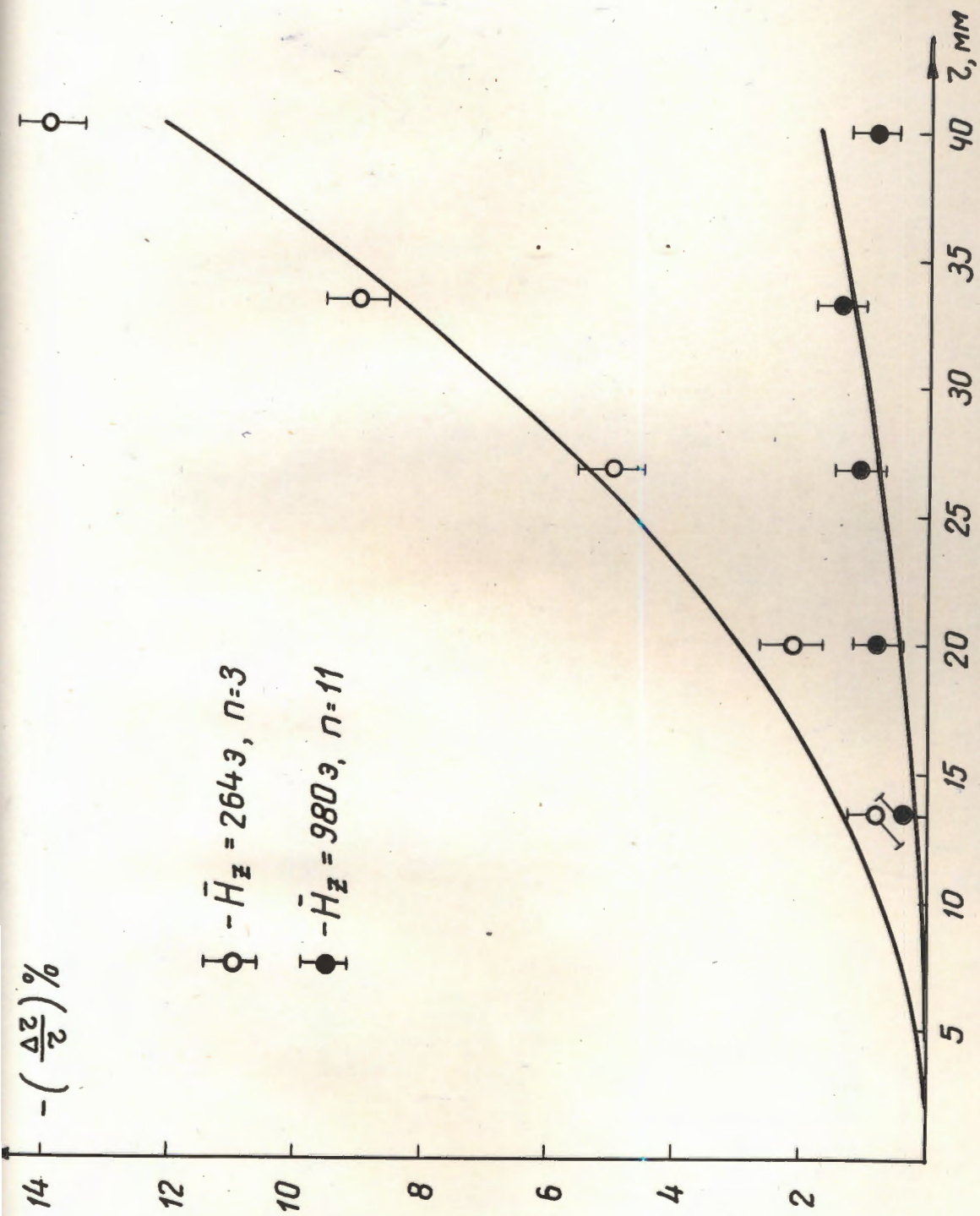


Рис. 20

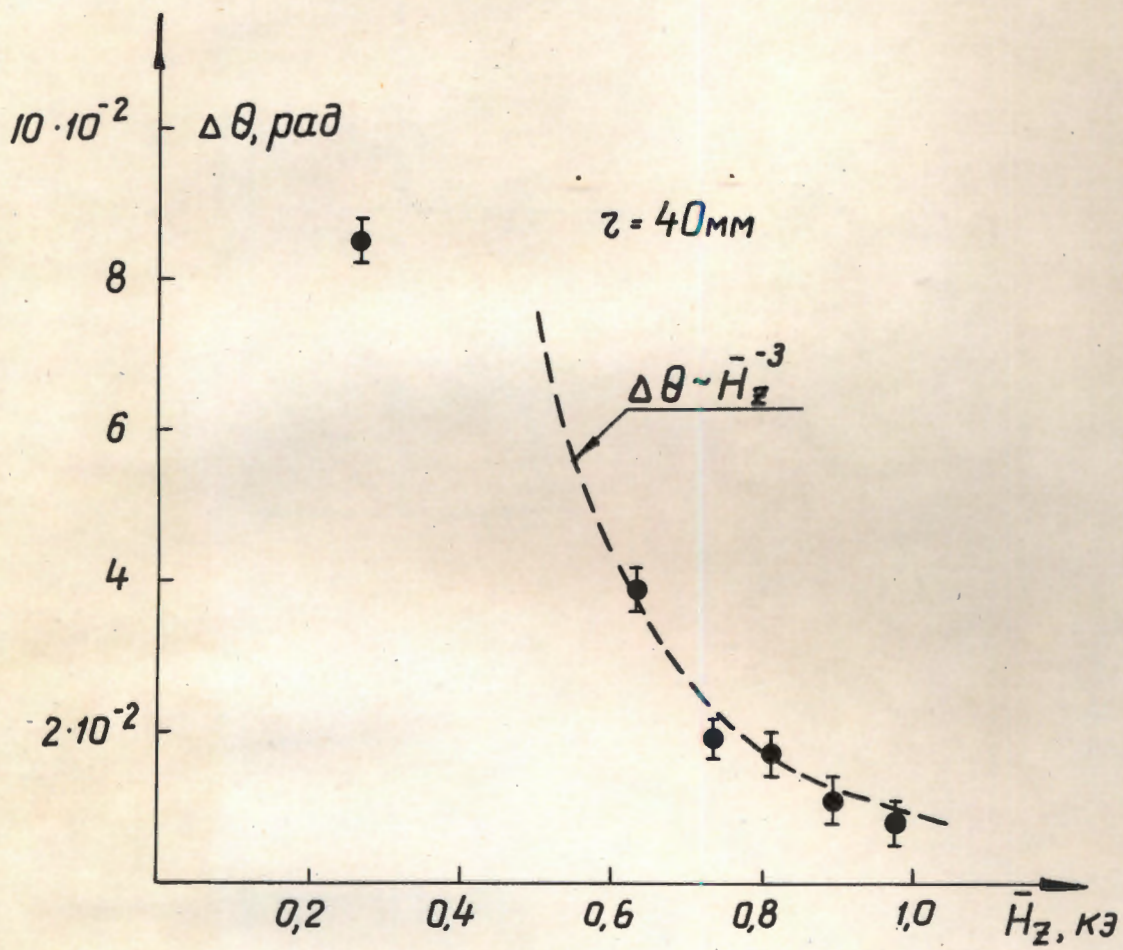


Рис. 21

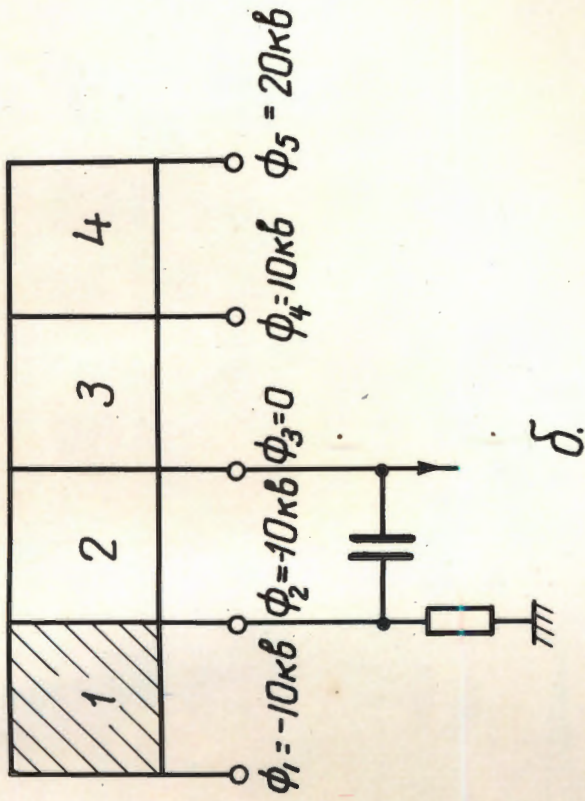
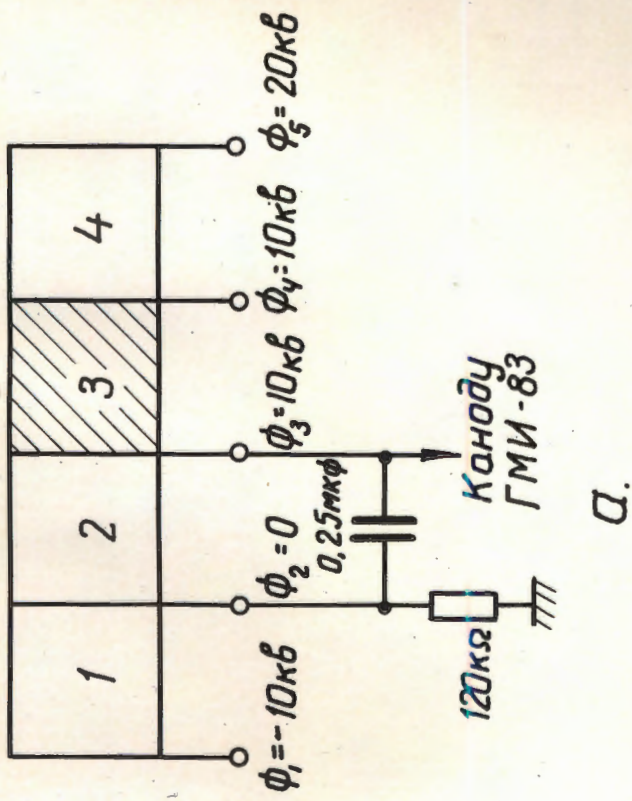


Рис. 22

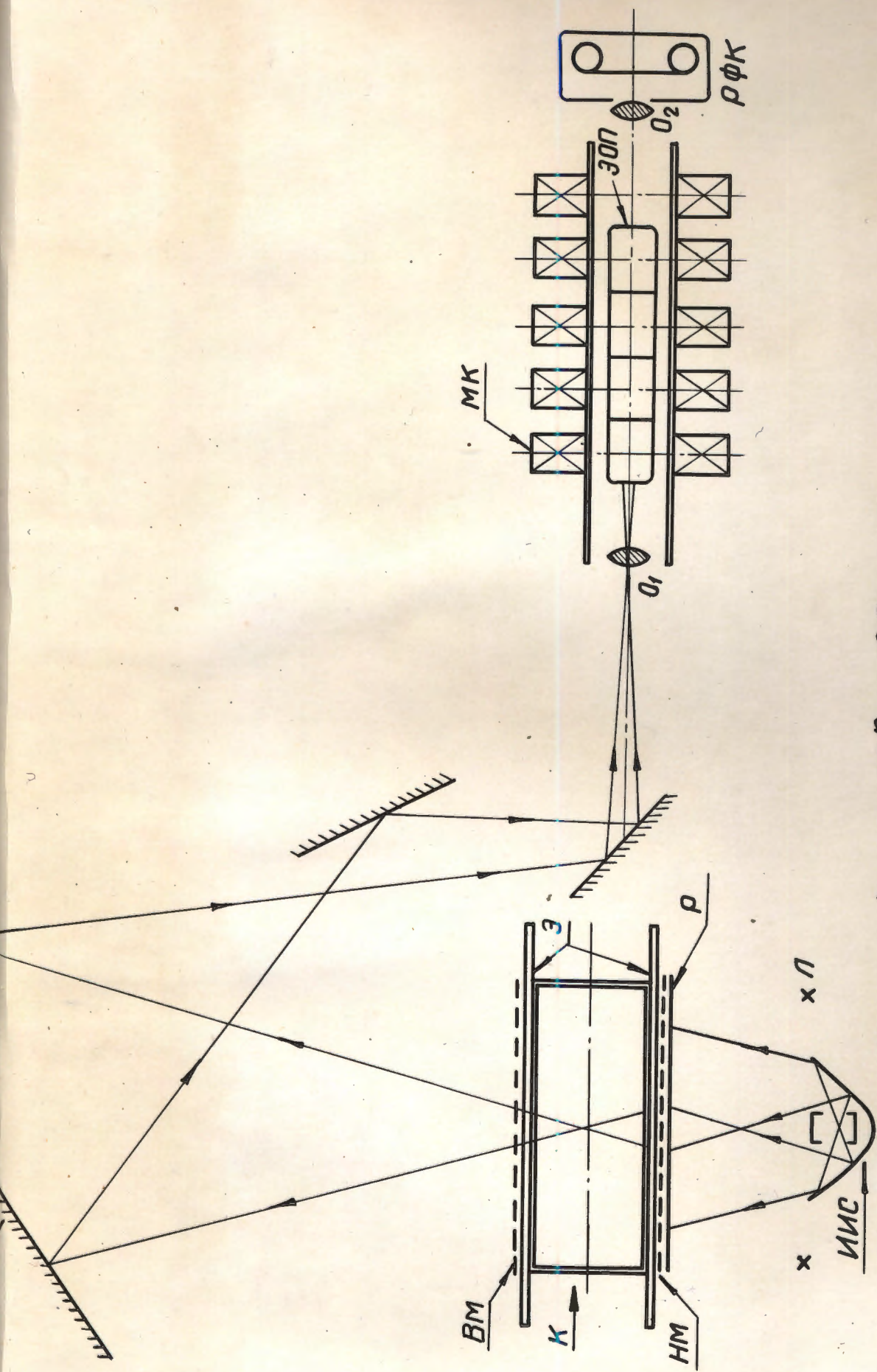


Рис. 23