

СЗУЧ.1и

+

В-68

Володин В. В. и др.



2472/75

Б1-13-8985

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-13-8985

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 75

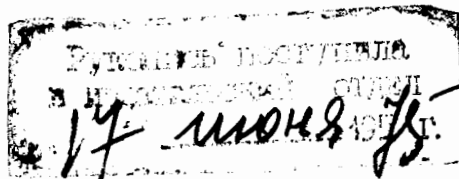
• ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория вычислительной техники и автоматизации

В.В.Володин<sup>\*)</sup>, Н.С.Глаголева, Т.Ф.Жмырова,  
П.С.Кузнецов, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин

Б1-13-8985

ОСОБЕННОСТИ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ СТРИМЕРОВ  
В СТРИМЕРНОЙ КАМЕРЕ



Дубна, 1975 год

=====

\*) Лаборатория высоких энергий, ОИЯИ

## А Н Н О Т А Ц И Я

В работе приводятся некоторые теоретические и экспериментальные результаты фоторегистрации стримера на модели и 2-х метр. стримерных камерах установки СКМ-200, полученные во время стендовых испытаний.

Используя полученные результаты, можно с достаточной для практических целей точностью оценить <sup>параметры</sup> вид стримера, некоторые характеристики стримерного следа, и также выделить основные факторы, влияющие на размер изображения и оценить влияние каждого из них на качество изображения.

ОСОБЕННОСТИ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ  
СТРИМЕРА

Световая модель стримера

Согласно современным воззрениям и, учитывая вид стримера на фотографиях, на ранних стадиях развития стример можно представить в виде двух близлежащих (близкорасположенных) соосных эллипсоидов вращения, ориентированных вдоль направления электрического поля в камере (рис. I).

Яркость стримера, как источника света, можно оценить по фотографиям, считая расстояние до стримера много большим размеров его, что обычно соответствует условиям фотографирования стримерной камеры. За площадь источника света принимается площадь проекции стримера на плоскость, перпендикулярную заданному направлению наблюдения стримера.

Площадь проекции стримера на плоскость, перпендикулярную к направлению фотографирования, в произвольном случае производящемся под углом  $\theta$  к направлению электрического поля в камере, где  $\theta$  меняется в пределах от 0 (по полю) до  $90^\circ$  ("боковая проекция") можно найти, проектируя стример на указанную плоскость.

Из построения рис. I уравнение эллипса в плоскости рис.:

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1 \quad (1)$$

Прямая, касательная к поверхности эллипсоида в плоскости рис.:

$$y = -\frac{x}{\operatorname{tg} \theta} + A \quad (2)$$

Большая полуось эллипса, спроектированная на плоскость, перпендикулярную углу  $\theta$

$$a' = b \cdot \cos \theta \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (2)

$$y = a \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}} = -\frac{x}{\operatorname{tg} \theta} + A \quad (4)$$

Откуда  $x^2 \left( \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \theta} + \frac{a^2}{b^2} \right) - x \frac{2A}{\operatorname{tg} \theta} + A^2 - a^2 = 0$

$$\text{и } x = \frac{\frac{A}{\operatorname{tg} \theta} \pm \sqrt{\frac{a^2}{\operatorname{tg}^2 \theta} + \frac{a^4}{b^2} - \frac{A^2 a^2}{b^2}}}{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \theta} + \frac{a^2}{b^2}} \quad (5)$$

Поскольку решение уравнения (5) должно иметь одно значение (касательная), то

$$\frac{a^2}{\operatorname{tg}^2 \theta} + \frac{a^4}{b^2} - \frac{A^2 a^2}{b^2} = 0$$

Решая относительно  $A^2$ , можно найти

$$\text{но } A^2 = \frac{b^2}{\operatorname{tg}^2 \theta} + a^2 = A^2$$

$$b^2 = b^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \theta$$

Откуда

$$a' = b \cdot \cos \theta = \cos \theta \sqrt{b^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \theta} = \sqrt{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta}; \quad (6)$$

Если стример-эллипсоид вращения с полуосями  $a$  и  $b$  (полуось и радиус), то площадь проекции стримера равна:

$$S_{\theta} = \pi b \sqrt{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta}$$

(угол между оптической осью и направлением поля -  $\theta$ );

$$S_{\theta \parallel} = \pi b \sqrt{b^2 + a^2 \operatorname{tg}^2 \theta}$$

(угол  $\theta$  равен  $0^\circ$ , оптическая ось и направление поля параллельны) и площади отличаются

$$\frac{S_{\theta}}{S_{\theta \parallel}} = \frac{\cos \theta \sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \theta + b^2}}{\sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \theta + b^2}} = \cos \theta \quad (7)$$

что при малых углах  $\theta$  несущественно ( $a \sim b$ ).

Эти значения углов близки к значениям, определенным по фотографиям, сделанным под разными углами к полю на модели двухметровой стримерной камеры установки СКМ-200, глубиной 8 см.

Такое представление стримера правомерно, поскольку его размеры незначительно <sup>по сравнению</sup> малы с расстоянием фотографирования.

При этом необходимо учитывать, что проекции эллипсоидов в интервале углов  $\theta - \theta_{\text{пред}}$  либо сливаются  $\theta = 0^\circ$ , либо начинают разделяться  $\theta < \theta_{\text{пред}}$  и лишь при углах  $\theta > \theta_{\text{пред}}$  они разделяются.

Соответственно, яркость стримера при  $\theta = 0^\circ$

$$B_{\text{н}} = \frac{2N_i I_i}{\pi b^2} \sim \frac{2 \cdot 4/3 \pi a b^2}{\pi b^2} = \frac{8}{3} a; \quad (12)$$

При  $\theta = 90^\circ$

$$B_{\text{л}} = \frac{2N_i I_i}{2\pi a b} \sim \frac{2 \cdot 4/3 \pi a b^2}{2\pi a b} = \frac{4}{3} b; \quad (13)$$

т.е., если даже  $b = a$ , то

$$\frac{B_{\text{н}}}{B_{\text{л}}} = 2$$

и если  $b \approx \sqrt{a}$ , то общий световой выход  $\sim 4/3 a^2$ , т.е. с длиной стримера растет квадратично, а яркость стримера вдоль поля пропорциональна длине его, при сделанных допущениях.

На более поздних стадиях развития наряду с ростом размеров и яркости стримера наблюдается изменение формы стримера и он начинает походить на хорошо перевязанный сноп. Концы стримера теряют устойчивость, прорастают факелами к электродам, однако яркость факелов меньше, чем стримера и это дает возможность соответствующим выбором диафрагмы фотографировать стримеры и на более поздних стадиях. При этом приближенно можно использовать в качестве световой модели систему из двух эллипсоидов, считая, что расстояние между центрами эллипсоидов становится равным или даже меньшим длины большей оси его. Можно рассматривать и другие геометрические фигуры как приближение к форме стримера.

Если принять распределение яркости по диаметру стримера нормальным [1]

$$B = A e^{-x^2} \quad (14)$$

то для одного значения относительно отверстия объектива и при условии достаточной разрешающей способности объектива и пленки

$$M = E \cdot t = C \cdot \frac{B}{n_r^2}; \quad \lg M = D$$

$$C = \frac{\pi}{4} \cdot t$$

где

$D$  можно аппроксимировать выражением  $D = \gamma (\lg M - \lg M_0)$ , при  $M_0 \leq M < M_m$ ,  $\gamma = \text{const}$   $t = \text{const}$ ,  $\gamma = \text{tg } \alpha$

$$\gamma \lg M = \gamma [\lg C + \lg A - 2r^2 \lg e - \lg n_r^2] = D_{\text{гр}}$$

$$\frac{\lg C + \lg A - D_{\text{гр}} - \lg n_r^2}{\lg e} = 2r^2$$

где  $D_{\text{гр}}$  - выбранное значение почернения на фотографии стримерного следа, принимаемое за его границу. При фотографировании стримерного следа освещенность изображения пропорциональна яркости. Если разрешение, обеспечиваемое оптической системой и пленкой достаточно, то почернение соответствует распределению яркости в стримере. Стримерный след характеризуется геометрическими размерами: длиной стримера, яркостью.

На рис. 2 приведено распределение почернения по диаметру стримера в зависимости от значения  $n_{\text{эдр}}$ , (действующая диафрагма) При  $n_{\text{эдр}} = n_{\text{эдр. max}}$  и  $\gamma = 0$

$$\lg C + \lg A - D_{\text{гр}} = 2 \lg n_{\text{эдр. max}}$$

При  $n_{\text{эдр}} = n_{\text{эдр. min}}$  и  $\gamma = \gamma_{\text{max}}$

$$\alpha = \frac{2 \lg n_{\text{эдр. max}} - 2 \lg n_{\text{эдр. min}}}{\gamma_{\text{max}}^2 \cdot \lg e}$$

Отсюда

$$\gamma = \sqrt{\frac{2(\lg n_{\text{эдр. max}} - \lg n_r)}{2(\lg n_{\text{эдр. max}} - \lg n_{\text{эдр. min}})}} \cdot \gamma_{\text{max}} \cdot \lg e \quad (15)$$

т.е.

$$\gamma = \gamma_{\text{max}} \cdot \sqrt{\frac{\lg \frac{n_{\text{эдр. max}}}{n_{\text{эдр}}}}{\lg \frac{n_{\text{эдр. max}}}{n_{\text{эдр. min}}}}}$$

Здесь  $r_m$  - радиус стримера, измеренный при значении  $n_r = n_{r \min}$  при определенных ранее условиях. На рис. 3 приводится распределение яркости (в отн. ед.) в стримерном следе. Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными точками, полученными при  $E = 15.06, 15.60, 15.93$  кв/см. Длительность высоковольтного импульса 15.5 нсек. Это распределение не меняет результатов по оценке геометрии стримера.

Дифракция. Если предмет является точечным источником света, его изображение является дифракционной картиной. Радиус первого темного пятна, ограничивающего центральный диск, определяется выражением  $\sqrt{I}$

$$r = \frac{0.61 \lambda}{n' \cdot \sin u'} \quad (18)$$

где  $\lambda$  - длина волны источника света  
 $n'$  - показатель преломления последней среды оптической системы  
 $u'$  - угол, определяющий растрвор вышедшего пучка лучей.

В центральном диске сосредоточено 83,78% всей световой энергии изображения. Поскольку

$$\sin u' = \frac{D \delta x}{2A'}$$

а  $n'$  для оптических систем, содержащих воздух в качестве последней среды равно 1, то диаметр центрального диска дифракционного изображения точки

$$r_{\text{диск}} = \frac{2.44 \lambda}{D \delta x} \cdot f = 1.22 n_r \cdot 10^{-3} \text{ [мм]} \quad (19)$$

Влияние разрешения пленки-объектива. Считая, что число пар линий на мм в изображении, образуемом объективом на данной пленке  $N_{об}$ , можно полагать, что размеры изображения точки на пленке не могут быть меньше, чем  $1/N_{об}$ . Эмпирическая формула, связывающая значение разрешающей силы объектива и пленки есть:

$$\frac{1}{N_{\varphi}} = \frac{1}{N_{об}} + \frac{1}{N_{пл}}; \quad N_{\varphi} = \frac{N_{об} \cdot N_{пл}}{N_{об} + N_{пл}}$$

где  $N_{\varphi}$  - фототрадиционная разрешающая способность системы объектив - пленка.



и обычно  $N_{\varphi}$  лежит в пределах 12–60 пар лин/мм, при использовании пленки с разрешением  $\sim 130$ –140 пар лин/мм (КН-1), и будет снижаться при использовании более чувствительных и крупнозернистых пленок.

Таким образом, это обстоятельство является одной из основных причин ухудшения качества изображения помимо дефокусировки на границах резкоизображаемого пространства (РИП).

Соответствующий график зависимости размера изображения точки от фотографической разрешающей способности  $N_{\varphi}$  пленки–объектива приведен на рис. 4.

$$\delta'_{0m} = \frac{1}{N_{\varphi}} \quad (20)$$

#### Оптическая система стримерной камеры и глубина резкоизображаемого пространства.

На рис. 5 изображена оптическая система для определенных основных её характеристик. На рисунке:  $l$  – расстояние между плоскостью наводки и пленкой,  $S$  – расстояние между фокусами объектива,  $F$  и  $F'$  (константа объектива),  $HH'$  – главные плоскости объектива,  $\Delta p$  – требуемая глубина резкоизображаемого пространства.

Для заданных кружков размытия на переднем  $\delta'_1$  и заднем  $\delta'_2$  планах РИП  $p_1, p_2$  в изображении  $1/1$

$$p_1 = \frac{p}{1 + \frac{p-f'}{D_{bx} \cdot f'} \cdot \delta'_1} ;$$

$$p_2 = \frac{p}{1 - \frac{p-f'}{D_{bx} \cdot f'} \cdot \delta'_2} ;$$

и выборе их одинаковыми  $\delta'_1 = \delta'_2 = \delta'_{\varphi}$  можно найти кружок размытия из-за дефокусировки:

$$\delta'_{\varphi} = \frac{p_2 - p_1}{p_1 + p_2} \cdot \frac{D_{bx} \cdot f'}{p - f'} = \frac{\Delta p}{p_1 + p_2} \cdot \frac{D_{bx} \cdot f'}{p - f'} ;$$

При этом

$$p = \frac{2p_1 p_2}{p_1 + p_2} = p_1 \frac{1 + \Delta p / p_1}{1 + \Delta p / p_2} ;$$

Откуда  $\rho_1 + \rho_2 = \frac{2\rho_1\rho_2}{r}$ , а

$$\delta'_{\varphi} = \frac{\Delta\rho}{2\rho_1\rho_2} \cdot \frac{r}{r-f'}; \quad D\delta x \cdot f' = \frac{\Delta\rho \cdot r}{2\rho_1\rho_2} D\delta x \cdot \beta$$

так как масштаб в плоскости  $r$

$$\beta = -\frac{f'}{l-e-x} \approx \frac{f'}{l-e} \approx -\frac{f'}{r-f'}$$

С другой стороны,  $\rho_1 + \rho_2 \approx 2\rho$ , а при  $\rho \gg f'$   $\beta \approx \frac{f'}{r}$  и поскольку  $n_r = \frac{f'}{D\delta x}$ ;

$$\delta'_{\varphi} = \frac{\Delta\rho}{2n_r} \cdot \beta^2 \quad (21)$$

Зависимость кружка размытия из-за дефокусировки в изображении от масштаба при различных значениях диафрагмы для  $\Delta\rho = 600$  мм приведена на рис. 6.

При больших относительных отверстиях можно полагать, что основным фактором, влияющим на размер изображения является дефокусировка. Увеличение масштаба ведет к увеличению кружка размытия из-за дефокусировки в изображении.

Таким образом, основными факторами, влияющими на размер изображения в плоскости наводки на резкость являются:

1. Дефокусировка изображения на границах РИП

$$\delta'_{\varphi} = \frac{\Delta\rho}{2n_r} \cdot \beta^2$$

2. Явление дифракции при малых относительных отверстиях

$$\delta'_{\text{дифр.}} = 2,44 \cdot \lambda \cdot n_r$$

3. Разрешение объектив-плёнка при сравнительно небольших значениях  $n_r$ :

$$\delta'_{\text{опт}} = \frac{1}{n_{\varphi}}$$

На переднем и заднем плане РИП диаметр кружка нерезкости  $\delta'_{\varphi}$  и общий диаметр изображения равен

$$d' = \sqrt{d'_c{}^2 + \delta'_{\varphi}{}^2}$$

если диаметр стримера  $d_c$ .

Масштаб фотографирования. Если ось оптической системы параллельна направлению электрического поля в камере и  $\theta$  - угол, под которым виден конец стримера длиной  $l_e$  (рис. 7), то считая  $l_e' \cong l_e''$  можно найти из построения рисунка

$$\begin{aligned} l_e \cdot \sin \theta &= A, \\ A' \cdot \cos \Delta \theta &= B' \end{aligned}$$

$$\frac{B'}{\sin [90^\circ - (\theta + \Delta \theta)]} = l_e'' = \frac{A' \cdot \cos \Delta \theta}{\cos (\theta + \Delta \theta)}$$

из подобия треугольников  $FA$  и  $FA'$

$$\frac{A'}{\frac{f'}{\cos \theta}} = \frac{A}{\frac{p-f'}{\cos \theta} + \frac{A}{\operatorname{ctg} \theta}} = \frac{l_e \cdot \sin \theta}{\frac{p-f'}{\cos \theta} + \frac{A \sin \theta}{\cos \theta}} = \frac{A' \cos \theta}{f'} = \frac{l_e \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{(p-f') + A \cdot \sin \theta}$$

$$A' = \frac{f'}{p-f'} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \theta}{1 + \frac{A}{p-f'} \cdot \sin \theta};$$

$$\begin{aligned} l_e'' &= \frac{f'}{p-f'} \cdot l_e \cdot \frac{\sin \theta}{1 + \frac{A}{p-f'} \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\cos \Delta \theta}{\cos (\theta + \Delta \theta)} = \\ &= l_e \frac{f'}{p-f'} \cdot \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \cdot \frac{\cos \Delta \theta}{1 + \frac{A}{p-f'} \cdot \sin \theta} \cdot \frac{1}{\cos \Delta \theta + \operatorname{tg} \theta \cdot \sin \Delta \theta} = \\ &= l_e \frac{f'}{p-f'} \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{l_e \cdot \sin^2 \theta}{p-f'}\right) (1 + \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \Delta \theta)}; \end{aligned}$$

Так как

$$\frac{p-f'}{f'} = \beta, \quad \text{где } \beta - \text{ масштаб, то}$$

$$l_e'' = l_e \cdot \beta \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{1}{1 + \frac{l_e \cdot \sin^2 \theta}{p-f'}} \cdot \frac{1}{1 + \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \Delta \theta};$$

но поскольку  $l_e \ll p-f'$  и, если учесть, что

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Delta \theta &= \frac{A}{\frac{p-f'}{\cos \theta} + \frac{A \sin \theta}{\cos \theta}} = \frac{A \cos \theta}{(p-f') + A \sin \theta} = \frac{l_e \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{(p-f') + l_e \cdot \sin^2 \theta} = \\ &= \frac{l_e}{p-f'} \cdot \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta}{1 + \frac{l_e}{p-f'} \cdot \sin^2 \theta}; \end{aligned}$$

мс

$$l_e'' = l_e \cdot \beta \cdot \operatorname{tg} \theta$$

$$\beta = \frac{l_e''}{l_e \cdot \operatorname{tg} \theta}; \quad \text{т.е.} \quad 1/\beta = \frac{l_e \cdot \operatorname{tg} \theta}{l_e''}; \quad (22)$$

### Пространственное изображение предмета

Точность восстановления пространственной картины события в стримерной камере зависит от точности определения координат центров отдельных стримеров на пленке. Помимо ошибок измерения, указанная точность зависит от размеров изображения стримера на пленке.

Оптическая система стримерной камеры должна обеспечивать фотографирование слабо-светящихся объектов, распределенных в относительно больших глубинах резко-изображаемого пространства (РИП) —  $\Delta p$ , определяемых требуемой глубиной камеры. Считая оптическую систему идеальной, разрешение и чувствительность пленки неограниченными, а стример точечным источником света, можно оценить минимальные размеры восстановленного в пространстве камеры стримера. Если диаметры кружков нерезкости на переднем и заднем плане РИП равны  $\delta_{\varphi}'$  и равны диаметру центрального пятна дифракционной картины изображения стримера на пленке  $\delta_{\text{диф}}$ , т.е.  $\delta_{\varphi}' = \delta_{\text{диф}}$ , то в пространстве объекта из известных соотношений

$$\delta_{\varphi}' = \delta_{\text{диф}} = \sqrt{1,22 \cdot \lambda \cdot \Delta p} \quad (23)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения стримера. На рис. 8 приведена зависимость этой величины от глубины РИП для  $\lambda = 0,600$  мкм — средней длины волны диапазона излучения стримера 0,55–0,65 мкм приводимого в работе [3]. Как можно видеть, даже в плоскости наводки на резкость восстановленное изображение точечного источника не может иметь размеры меньше 0,66 мм для глубины камеры  $\Delta p = 600$  мм, а на переднем и заднем плане оно должно быть еще больше за счет дефокусировки. Масштаб изображения определяется при принятых условиях только значением диафрагмы  $n_r$ .

Масштаб изображения при этом для тех же условий

$$\beta = n_r \sqrt{\frac{4,88 \cdot \lambda}{\Delta p}}; \quad (24)$$

Зависимость масштабного коэффициента  $1/\beta$  от геометрического значения диафрагмы  $n_r = f'/D_{зр}$  вх, равное отношению фокусного расстояния к диаметру входного зрачка, приведена на рис. 9. Из рассмотрения кривых рис. 9 следует, что при возрастании диаметра стримера, условия фотографирования становятся менее критичными относительно  $n_r$ ,  $1/\beta$  и  $N_{\phi}$

Если учесть, что ошибки измерения  $\sim 7$  мкм, то максимальное значение  $1/\beta$  ограничивается сверху значением  $\delta_{изч} = \delta_{диф}$  что для глубины камеры  $\Delta p = 600$  мм составляет величину 92,28.

В отличие от пузырьковых камер, где количество света для освещения пузырьков практически неограничено, в стримерной камере светимость стримеров мала. Возможное, в принципе, фотографирование слабо-светящихся объектов при больших относительных отверстиях объектива и получение при этом минимальных размеров изображения, связано с резким уменьшением масштаба, что существенно повышает требования к разрешению оптической системы и пленки, а также точности измерений. Высококочувствительная пленка обладает обычно малым разрешением и имеет крупное зерно. Кроме того, остаточные aberrации объектива, помимо дифракции, приводят к уменьшению разрешающей способности объектива. Считая, что число пар линий, регистрируемых на пленке оптической системой —  $N_{\phi}$  и, полагая, что изображение точки на пленке не может быть меньше, чем  $\delta'_{оп} = 1/N_{\phi}$ , можно найти ограничения, накладываемые фотографической разрешающей способностью системы объектив-пленка.

Пусть  $\delta_{оп} = \delta_{\phi}$ , тогда:

$$\delta_{оп} = \delta_{\phi} = \sqrt{\frac{\Delta p}{2n_r \cdot N_{\phi}}} \quad (25)$$

(минимальный диаметр восстановленного изображения точки).

$$1/\beta_{ф.опт.} = \sqrt{\frac{N_{\phi} \cdot \Delta p}{2n_r}} \quad (26)$$

(масштабный коэффициент). На рис. 9 нанесены соответствующие зависимости для заданных значений  $N_{\phi}$ .

Как можно видеть, оптимальные значения  $1/\beta$  и  $N_f$  в случае точечного источника и ограниченной разрешающей способности пленки-объектива ограничиваются сверху  $1/\beta = 60-70$  для  $N_f = 100$  лин/мм и  $30-40$  при  $N_f = 50$  лин/мм при соответствующих значениях диафрагм.

Экспериментальное определение оптимального масштаба при фотографировании стримерной камеры глубиной 600 мм представляет определенный интерес и оно было проведено при стендовых испытаниях стримерной камеры.

Экспериментальные результаты. Схема фотографирования стримерной камеры приведена на рис. 10. Импульс от генератора высоковольтных импульсов поступает на электродную систему (симметричная полосковая линия, по аналогии с полосковыми системами сверхвысоких частот) общей длиной  $\sim 6$  м, согласованную на конце ( $\sim 38$  ом).

Реперные отверстия, диаметром 40 мм, имеющиеся на задней стенке стримерной камеры установки СКМ-200, позволили измерить масштаб фотографирования. Масштаб на задней плоскости есть отношение диаметра реперного отверстия к значению, измеренному на пленке:

$$1/\beta = M = \frac{d_{\text{репер. отв.}}}{d_{\text{репер. отв., изм. на пленке}}}$$

Масштаб по передней плоскости рассчитывался по формуле:

$$\frac{1/\beta_{\text{перед}} + 1/\beta_{\text{зад}}}{2} = 1/\beta_{\text{зад}} - \frac{\Delta p}{2F} \quad (27)$$

где  $\Delta p$  - глубина резкости ( $\Delta p = 600$  мм).  
 $F$  - фокусное расстояние объектива.

Выбор оптимального режима фотографирования требует выбора такой области для фотографирования, которая совмещала бы положительные стороны фотографирования при больших масштабах (низкие измерительные ошибки) и при уменьшенных масштабах (меньше кружок размытия из-за дефокусировки, лучше разрешение объектив-пленка). Фотографирование производилось одновременно пятью аппаратами (расстояния указаны на рисунке) на 35-мм и 80-мм пленку чувствительностью 2000 и 4500 ед. ГОСТ соответственно. Три аппарата

(тип РФК-5) снабжены объективами с фокусными расстояниями 2,8 и 3,7 см (Мир-1), а два других - объективами с  $F = 6,5$  (Мир-3) и  $F = 10$  см.

Режим проявления пленки паспортный.

Стримерные камеры исследовались при двух сильно различающихся режимах работы генератора в/в импульсов - режим I, треугольная форма импульса с длительностью на полувысоте  $T_{имп} = 30$  нсек; режим II - длительность импульса была сокращена почти вдвое:  $T_{имп} = 15,5$  нсек.

В режиме I изучение характеристик стримерного следа в зависимости от напряженности электрического поля в камере затруднительно из-за слабого почернения треков. Этот режим для съемки неблагоприятен. В режиме II характеристики стримерных следов были получены *более пригодные для измерений.*

Для измерения диаметра стримеров отбирались треки, прошедшие через середину камеры, по оси фотоаппаратов, под углом, близким к  $\theta = 90^\circ$  к направлению электрического поля в стримерной камере. Диаметр стримера измерялся только в центре трека, чтобы избежать ошибок из-за искажений по краям камеры при фотографировании. В таблице I приведены данные по имеющимся объективам, а также значения диаметра стримера по планам и объективам, а также вычисленные масштабы фотографирования по плоскостям.

При фотографировании треков под углами до  $20^\circ$  к электрическому полю в камере были зарегистрированы следующие длины стримеров в различных режимах работы при длительности высоковольтного импульса на электродах камеры 15,5 нсек.

Таблица 2.

Зарядное напряжен. кВ	Измеренные значения длин стримеров (мм) при следующих диафрагмах:			
	2,5	3,5	4,5	6,3
44 (15,93)	7,90	7,56	7,40	7,27
42 (15,60)	7,75	7,30	7,27	
40 (15,06)	7,40	7,00	6,85	
39 (14,5)	6,70	6,80		

(в скобках указаны напряженности в кВ/см).

Объектив	Положение сцинтилляционных счетчиков по планам	Масштаб фотографиярвания	Измеренный диаметр стримера (масштаб средний, $T_{\text{ИМП}} = 30 \text{ нсек}$ )	Кружок размытия (масштаб $T_{\text{ИМП}} = 15,5 \text{ нсек}$ )	Измеренный диаметр стримера (масштаб $T_{\text{ИМП}} = 15,5 \text{ нсек}$ )	Измеренный диаметр стримера (средний масштаб $T_{\text{ИМП}} = 15,5 \text{ нсек}$ )
"УРАН-27" Разрешение 44 лин/мм $F = 10 \text{ см}$	передний план	17,8	3,37	122,9	2,188	2,52
	средний план	20,6	2,42	106,2	2,189	2,178
	задний план	23,18	2,89	95,83	2,221	1,964
	среднее значение:	20,5	2,89			2,21
"МИР-3" Разрешение 30 лин/мм $F = 6,5 \text{ см}$	передний план	27,7	4,10	88,48	2,451	2,795
	средний план	32,0	4,31	84,72	2,71	2,677
	задний план	35,08	4,675	84,74	2,973	2,678
	среднее значение:	31,59	4,36			2,76
"МИР -1" Разрешение 44-45 лин/мм $F = 3,7 \text{ см}$	передний план	45,0	3,49	36,35	1,64	2,02
	средний план	53,0	3,62	50,76	2,69	2,627
	задний план	60,79	3,40	53,54	3,26	2,982
	среднее значение:	55,7	3,57			2,61
"МИР-5" Разрешение 44-45 лин/мм $F = 2,8 \text{ см}$	передний план	64,17	3,62	38,19	2,45	2,86
	средний план	74,98	4,54	45,89	3,44	3,44
	задний план	86,32	3,285	54,68	4,72	4,10
	среднее значение:	75,16	3,815			3,47



### Следы стримеров на пленке

Трек для измерения <sup>из</sup> длины стримеров под углом  $20^\circ$  к полю выбирались на расстоянии  $\sim 36$  мм от центра кадра, на оси кадра (так как методика обмера пока не разработана, то измерение длины стримера по оси кадра дает наименьшую измерительную ошибку).

Была сделана попытка измерить длину стримера, фотографируемого под углом  $20^\circ$  к полю, при длительности высоковольтного импульса  $T_{\text{имп.}} = 30$  нсек. Из-за слабого почернения треков в этом режиме (как указывалось выше), особенно треков, прошедших по краям камеры (на расстоянии  $\sim 36$  мм), измерительные ошибки при этом велики. Полученные значения длин стримеров приблизительно в 2 раза выше, чем при длительности импульса 15,5 нсек ( $L = 10+15$  мм).

На рис. 11, 12, 13, 14 экспериментальные результаты представлены в виде графиков.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Фоторегистрация стримеров при длительности высоковольтного импульса 30 нсек, становится возможной начиная с  $E=11,2$  кВ/см, при длительности высоковольтного импульса 16,5 нсек — с 14 кВ/см, что соответствует длине стримера 10 см и длине стримера 4 см в боковой проекции ( $\theta = 90^\circ$ ).

2. Средний диаметр фотографируемого стримера при  $T_{\text{имп.}}=30$  нсек равен 3 мм, при  $T_{\text{имп.}}=15,5$  нсек — 2 мм ( $M=20,6$ ). Зависимость приведенная на рис. 11 (Объектив "Уран",  $L = 10$  см,  $T_{\text{имп.}}=15,5$  нсек средняя плоскость) дает представление о влиянии параметров в/в импульса на качество стримерного следа — при изменении напряженности электрического поля  $E$  от 14–16 кВ/см диаметр стримера изменялся от 1,0 до 1,7 мм.

3. Влияние дефокусировки по глубине камеры при крупномасштабной съемке существенно меньше расчетного.

4. Зависимость  $d_s = f(1/s)$  (рис. 13) дает основание предположить, что масштаб от 25 до 50 является наиболее подходящим при фотографировании стримеров на СКМ-200, что неплохо согласуется с расчетными данными.

5. Яркость стримера в сечении падает от оси к периферии.

На рис. 15, взятом из работы<sup>/4/</sup>, приведены приборные ошибки, разделенные на уменьшение оптических систем, они выходят на уровень константы - 5 микрон <sup>на пленке</sup> в пространстве; на этот же график для сравнения нанесена приборная ошибка двухметровой стримерной камеры СКМ-200 (ОИЯИ, Дубна).

Эти данные дают основание предполагать, что так называемая приборная ошибка в стримерной камере невелика, чтобы сделать среднеквадратичное рассеяние треков существенным.

Не вызывает удивления, что эта величина не может достигнуть точности лучше, чем 5 микрон <sup>на пленке</sup> в пространстве. Измерения ограничиваются фоном пленки, так как объективы "Уран" и "Мир-1" при угле фотографирования до  $10^\circ$  дают разрешение  $\sim 200$  лин/мм и, повидимому, пленка с лучшим разрешением и более мелким зерном могла бы дать лучшие результаты.

При сокращении длительности высоковольтного импульса можно ожидать дальнейшего увеличения яркости стримера и улучшения условий его фотографирования в пределах возможностей оптических систем, чувствительности и разрешения фотопленки.

Возможность применения микроканальных усилителей яркости<sup>/5/</sup> может позволить увеличить яркость стримера в  $10^3$  раз.

М.З.  
1977

И.И.И.  
М.З.  
В.А.В.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.А. Турыгин. "Прикладная оптика", книга I, Изд-во "Машиностроение", 1965. Книга 2, Изд-во "Машиностроение", 1966.
2. С.В.Кулагин. Проектирование фото- и киноприборов, Изд-во "Машиностроение", 1971.
3. *F. Villa. International Symposium on Nuclear Electronics, T. 3. Versailles --10-11-12-13, September, 1968.*
4. *F. Villa. 1973 International Conference on Instrumentation for High Energy Physics. Frascati, Italy, May 8-12, 1973.*
5. А.М. Тютюков, Г.С.Кравчук. ПТЭ, №1, 193 (1974).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Модель. Ранняя стадия развития стримера.

Рис. 2. Распределение почернения по диаметру стримера в зависимости от значения действующей диафрагмы  $N_{\text{эф}}$ .

Рис. 3. Яркостная характеристика стримерного следа.

Рис. 4. Зависимость размера изображения точки от фотографической разрешающей способности  $N_{\text{ф}}$  пленки-объектива.

Рис. 5. К определению параметров оптической системы.

Рис. 6. Зависимость кружка размытия из-за дефокусировки в изображении от масштаба при разных значениях диафрагмы для  $f=600$  мм.

Рис. 7. Изображение стримера, находящегося вдали от оси оптической системы.

Рис. 8. Кружок рассеяния в пространстве предмета в зависимости от глубины РИП, определяемый из условия  $\delta_{\text{дифр.}} = \delta_{\text{ф.}}$ , при разных значениях  $N_r$  и  $N_{\text{ф}}$ .

Рис. 9. Зависимость масштабного коэффициента от диафрагмы.

Рис. 10. Схема фотографирования стримерных камер.

Рис. 11. Зависимость диаметра стримера от напряженности электрического поля в стримерной камере при различных диафрагмах (2,5+6,3). Объектив "Уран",  $F=10$  см,  $T_{\text{имп}}=15,5$  нсек, средняя плоскость.

Рис. 12. Зависимость длины стримера, фотографируемого под углом  $\sim 20^\circ$  к полю от напряженности электрического поля в стримерной камере. Диафрагма - 2,5+6,3. Длительность импульса - 15,5 нсек. Объектив "Уран", средняя плоскость.

Рис. 13. Зависимость диаметра стримера от масштаба фотографирования.

Кривая I -  $T_{\text{имп}} = 30$  нсек.

Кривая II -  $T_{\text{имп}} = 15,5$  нсек.

Рис. 14. Зависимость яркости стримера от напряженности поля в камере.

Рис. 15. Измерительные ошибки в зависимости от уменьшения.

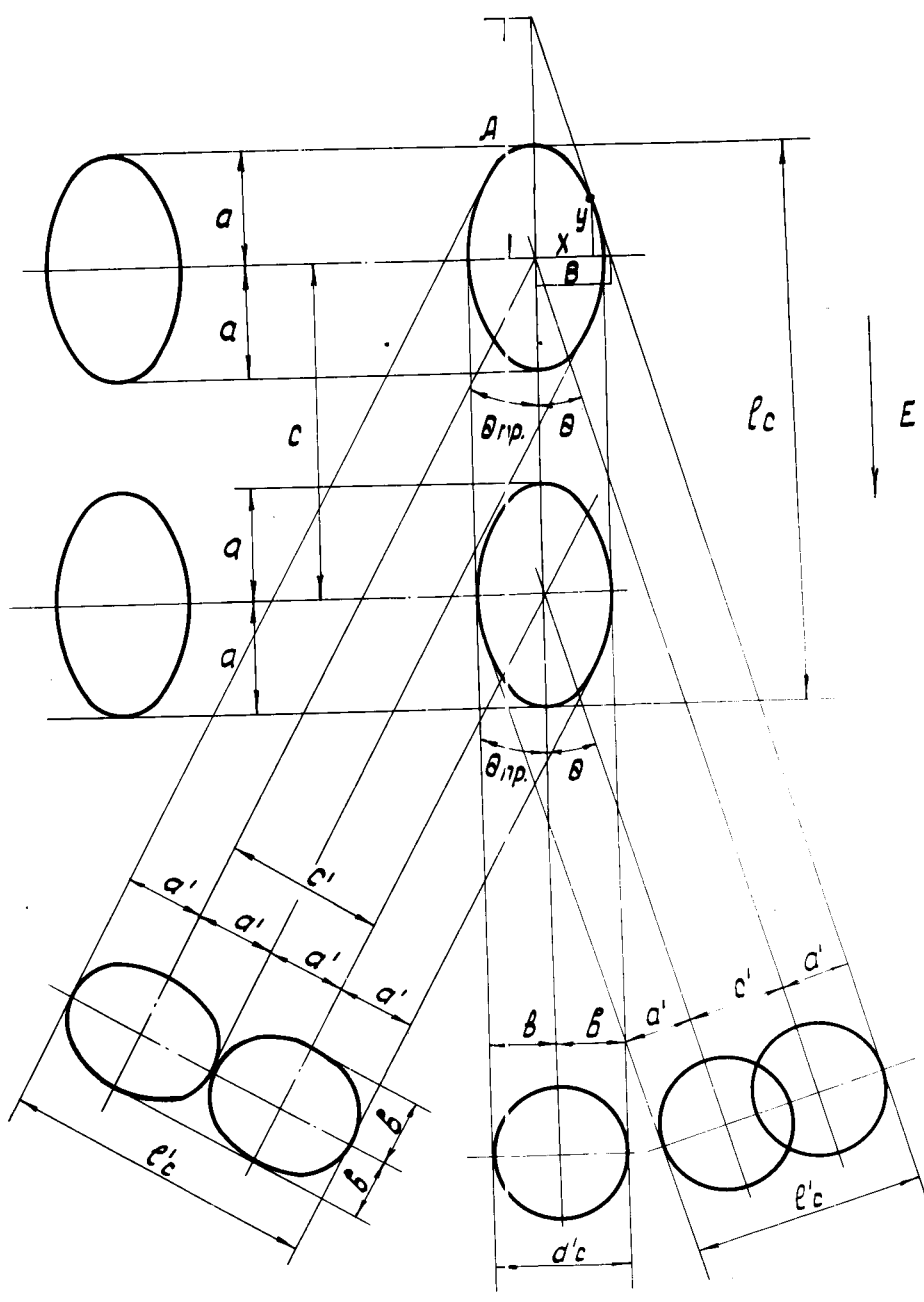
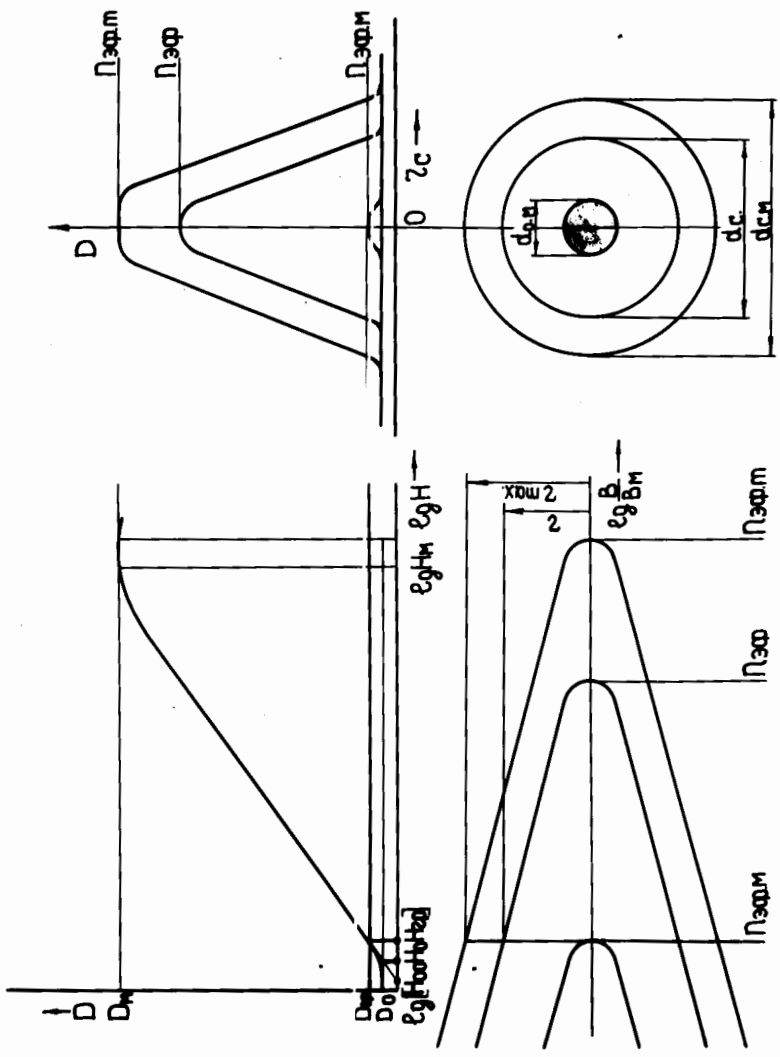
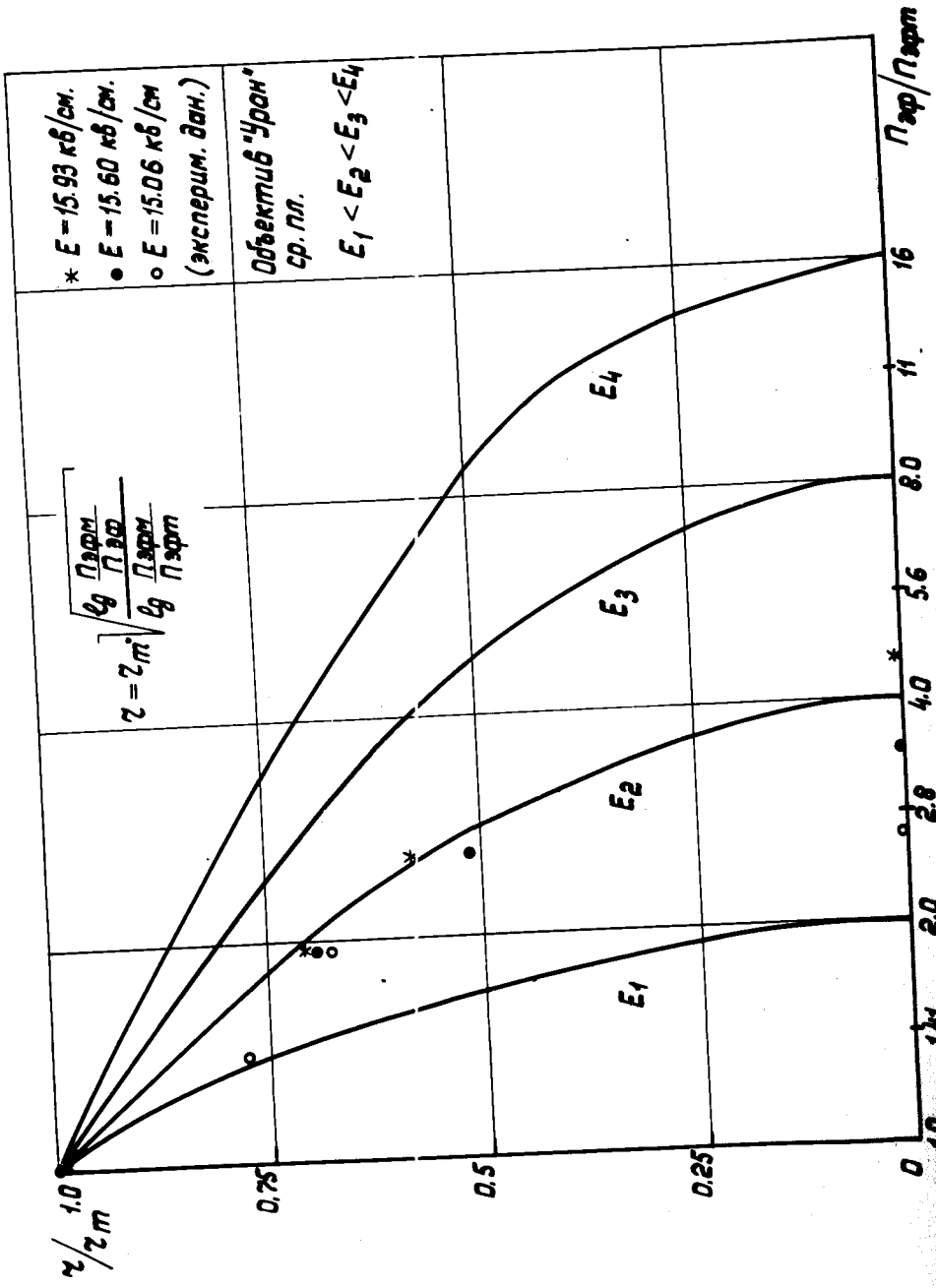
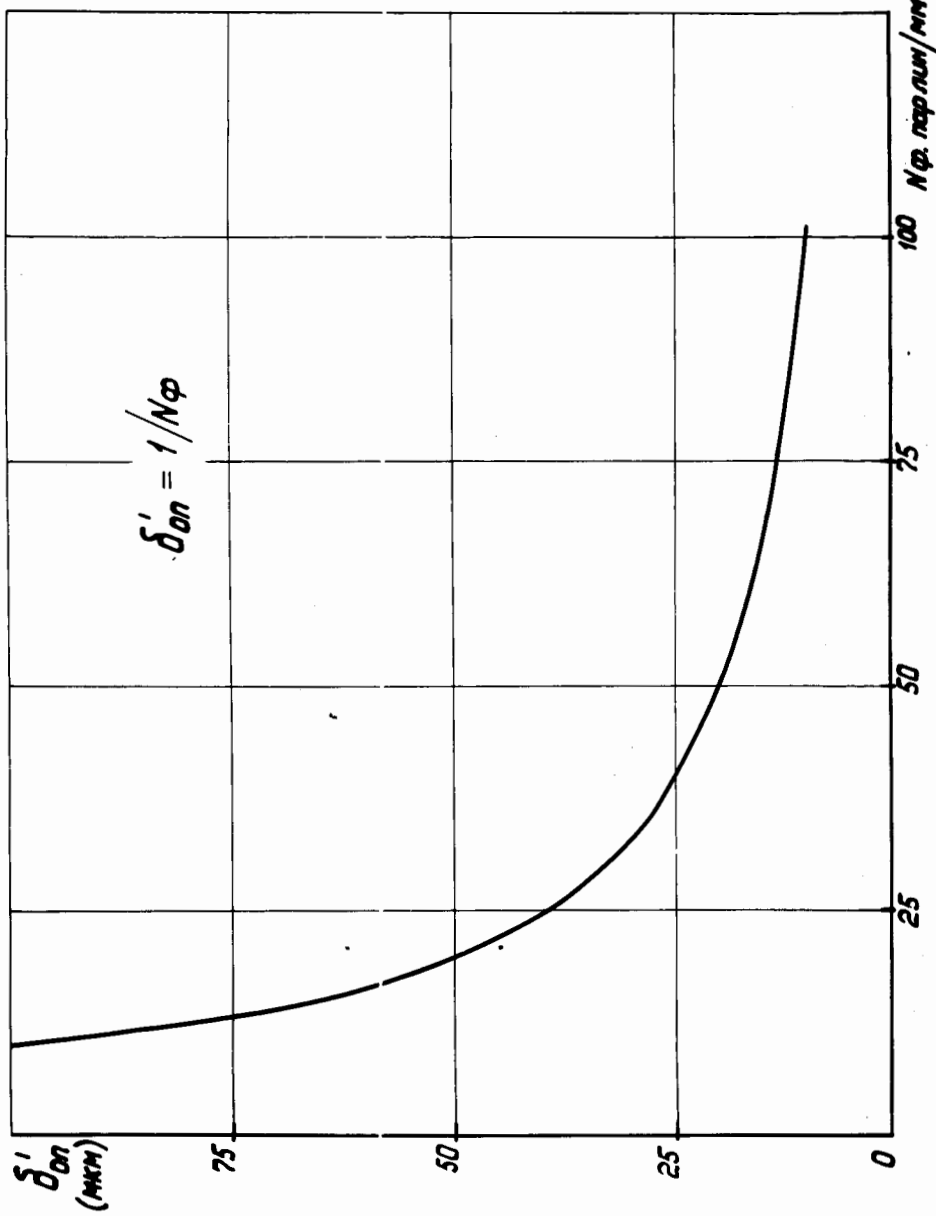


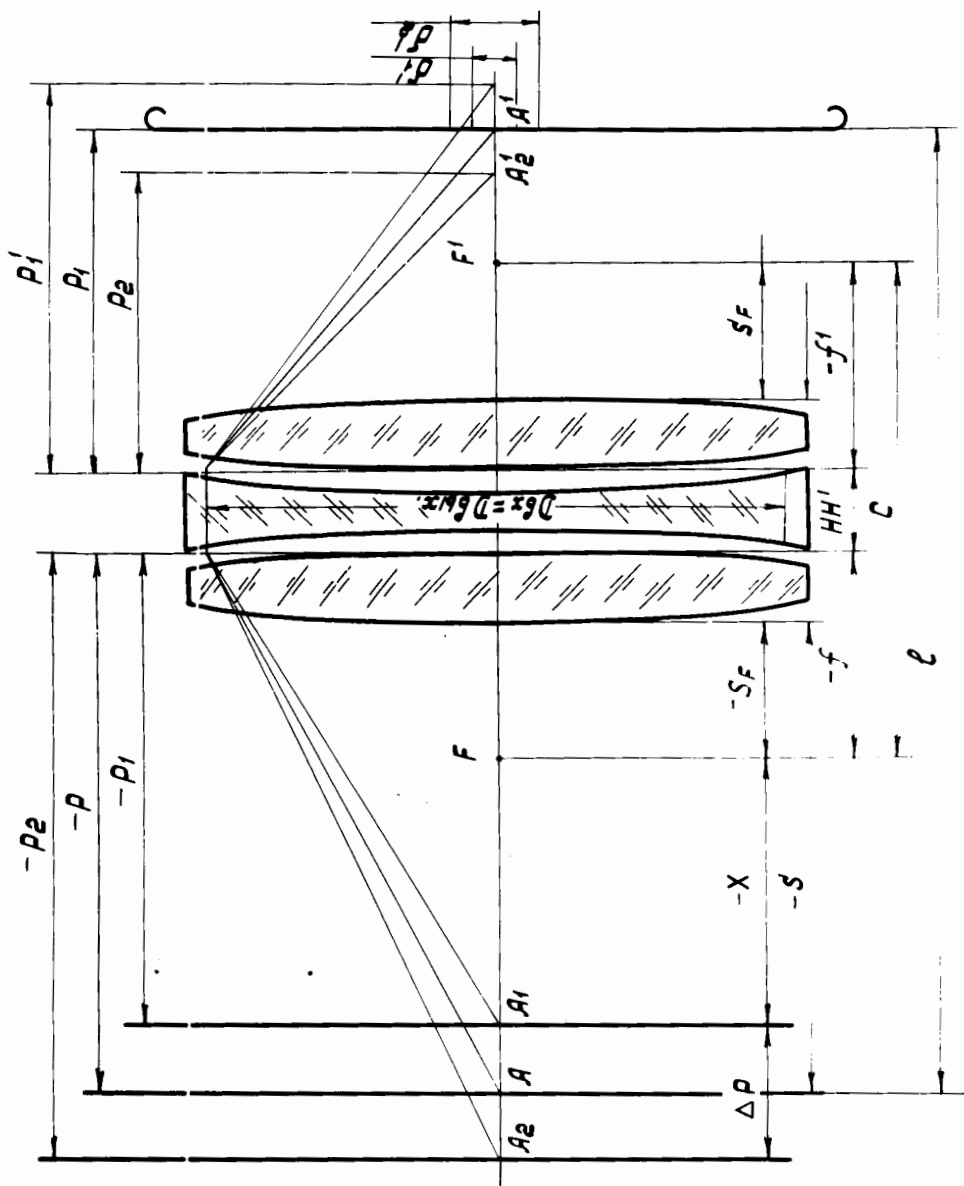
рис. 1











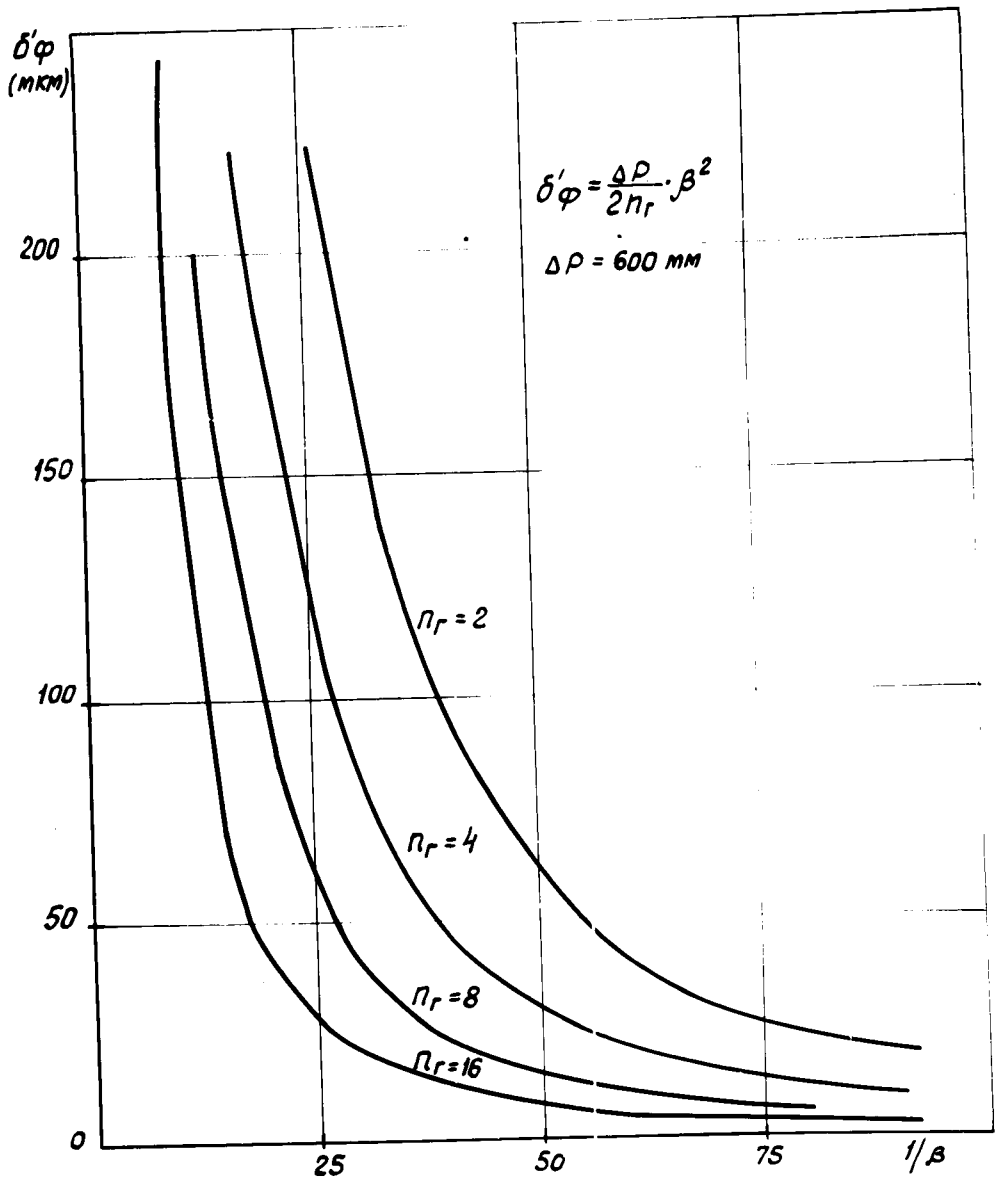
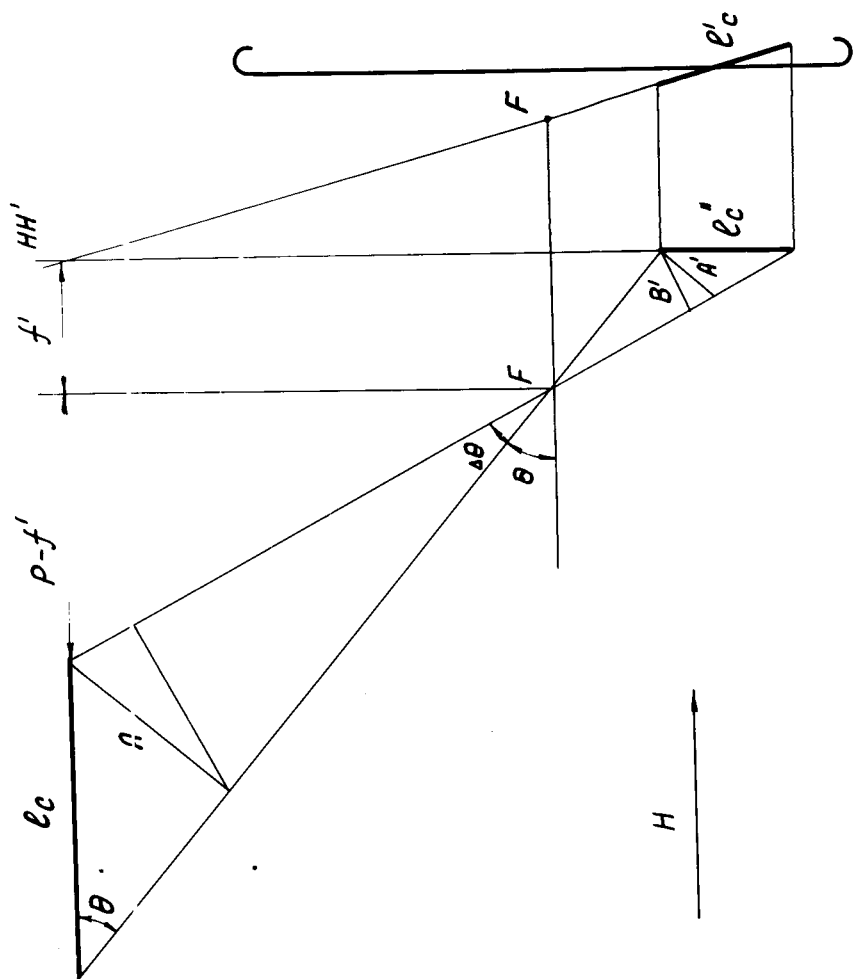
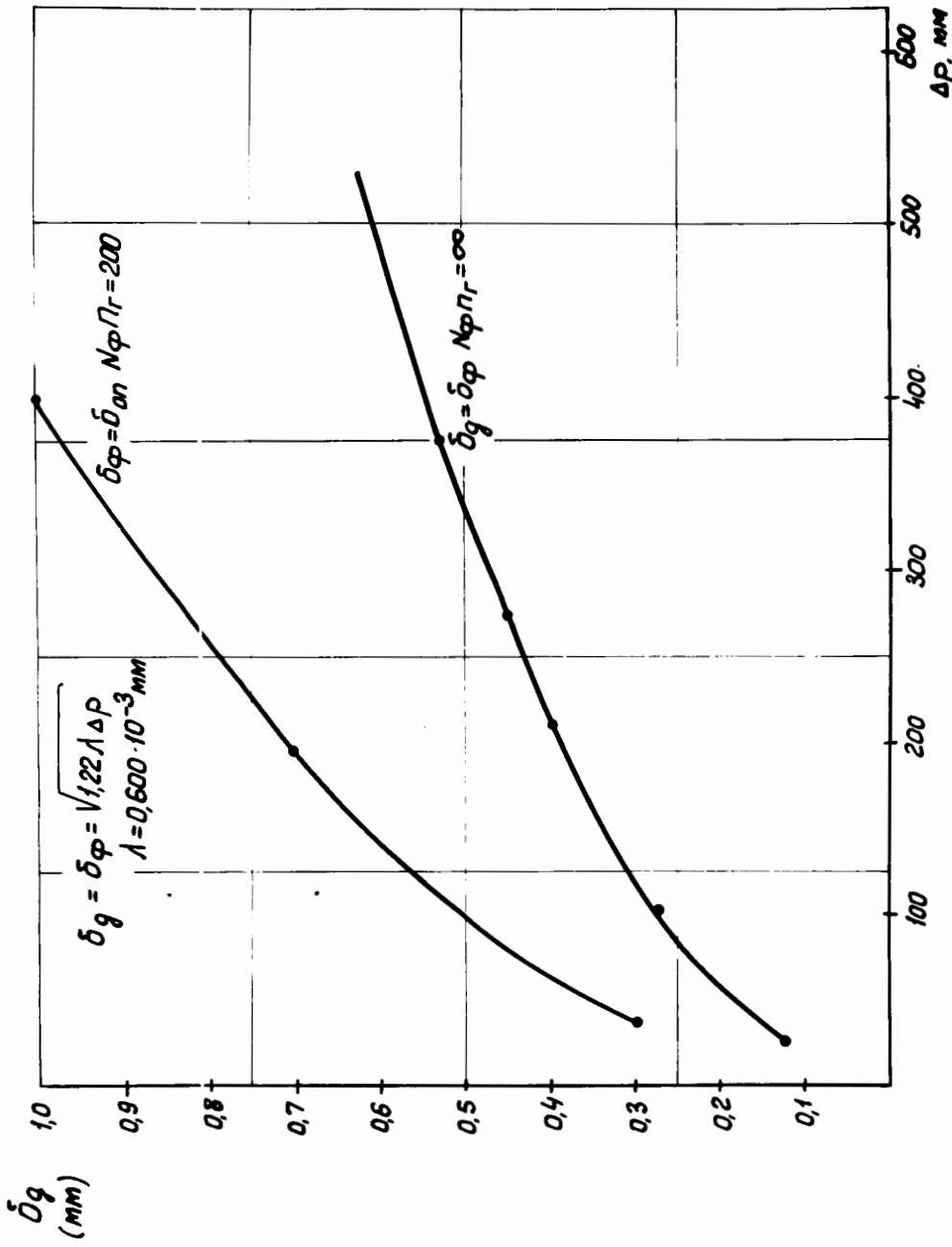
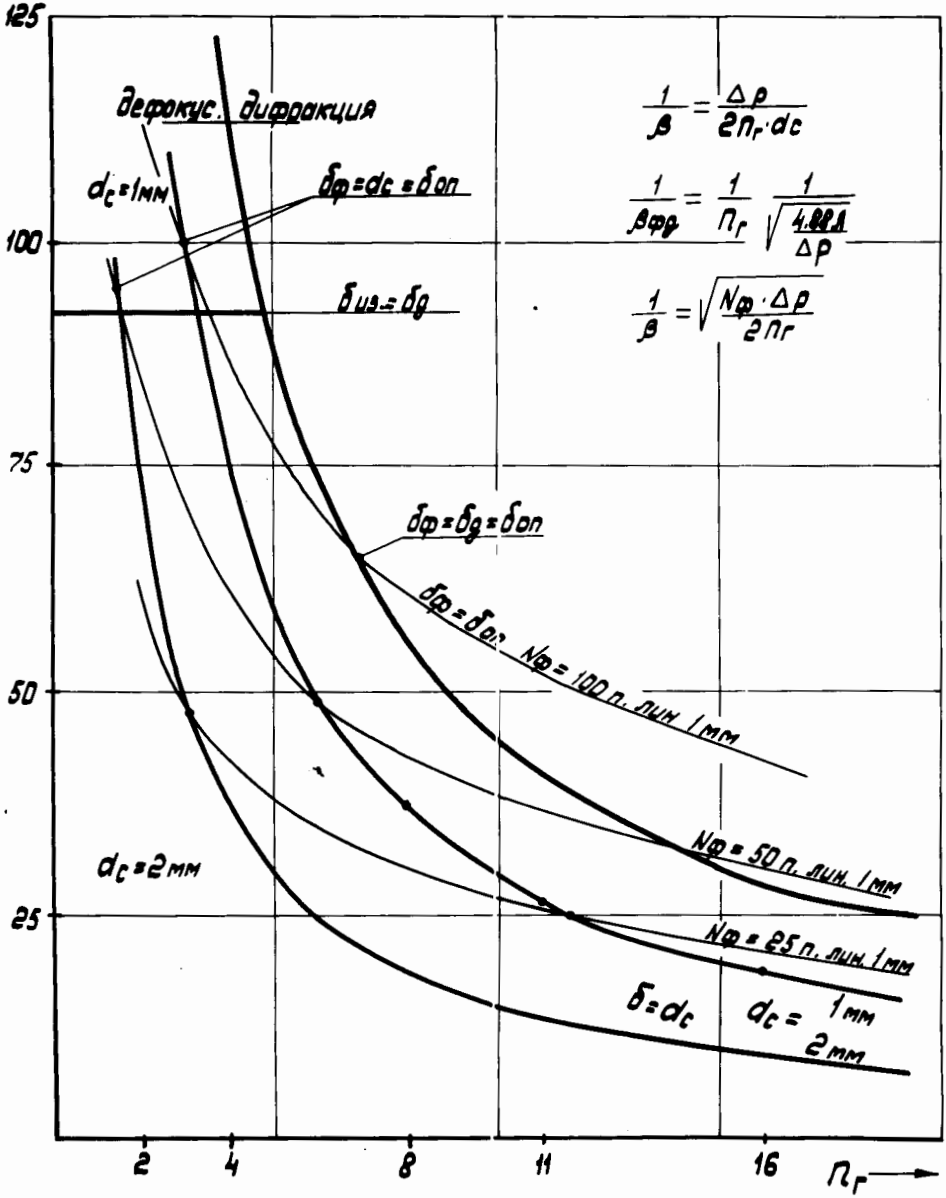


рис. 6.





1/β



ρυσ. 9.

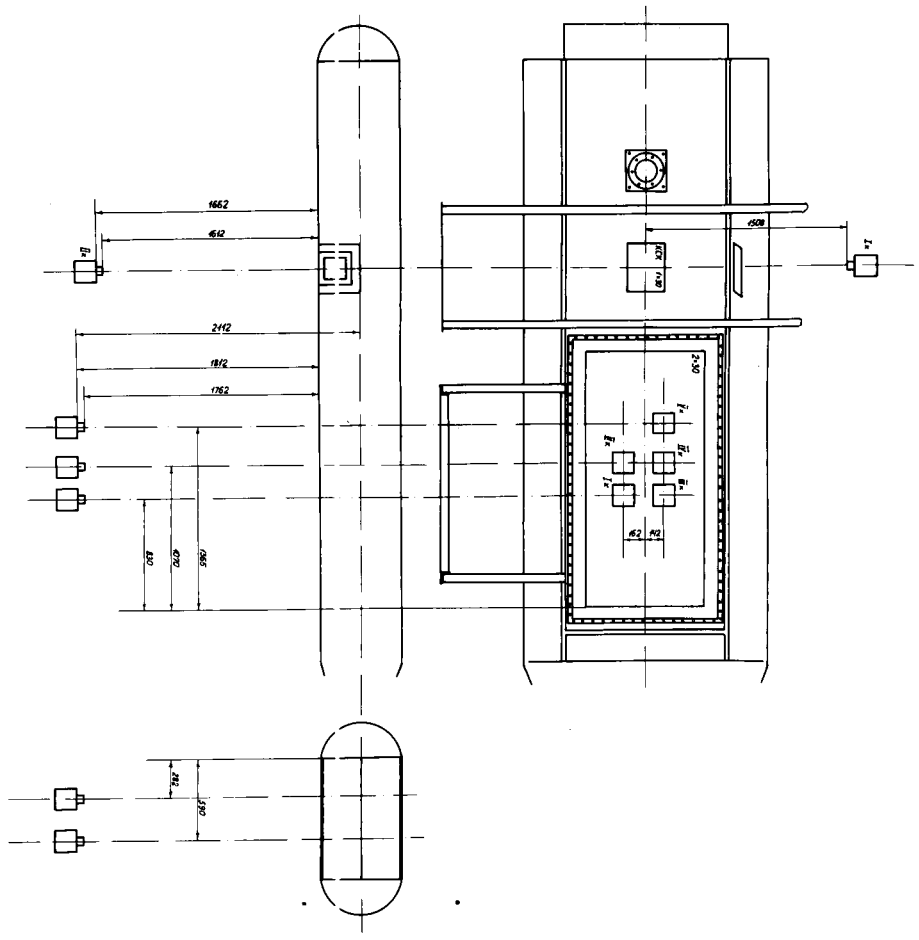
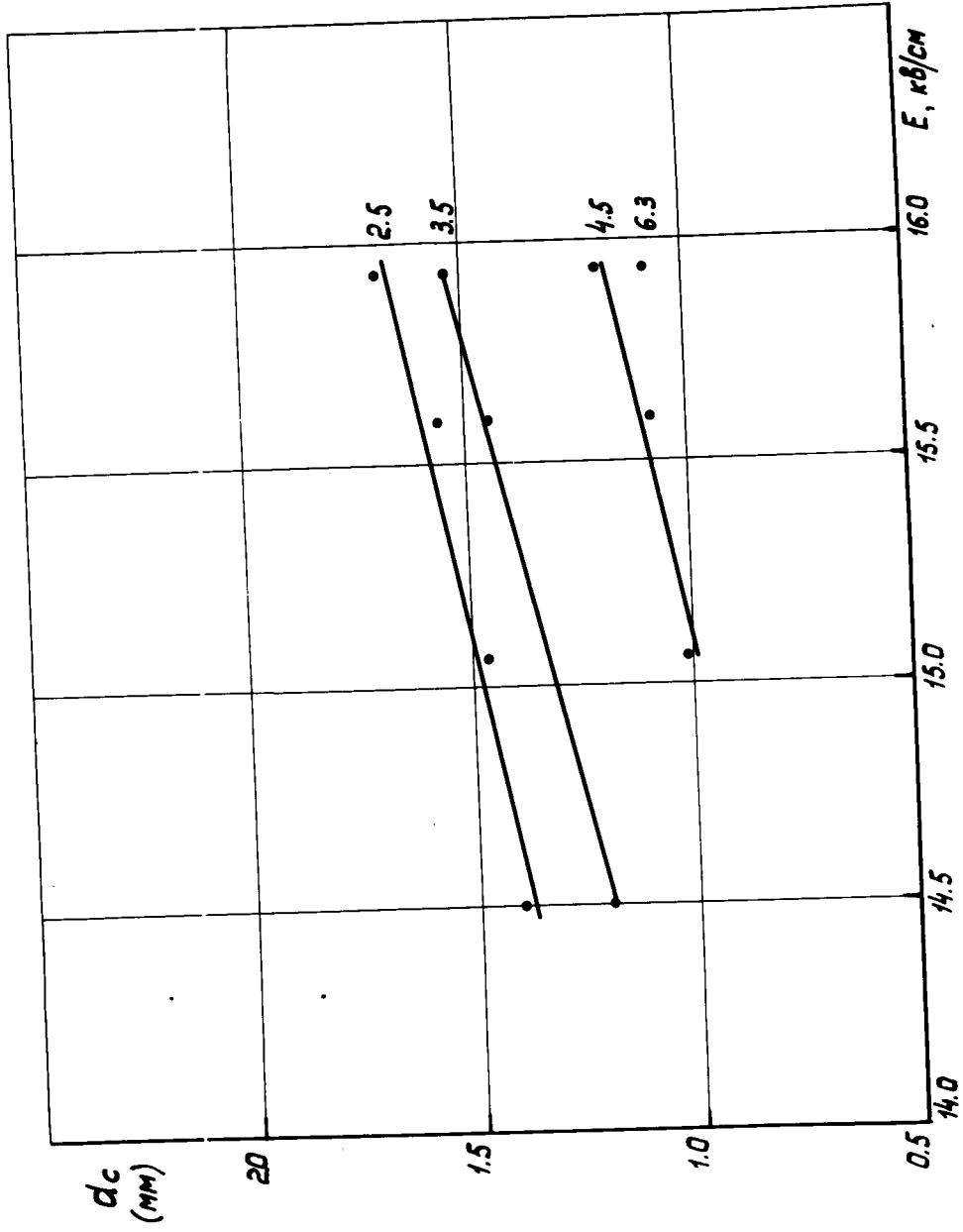
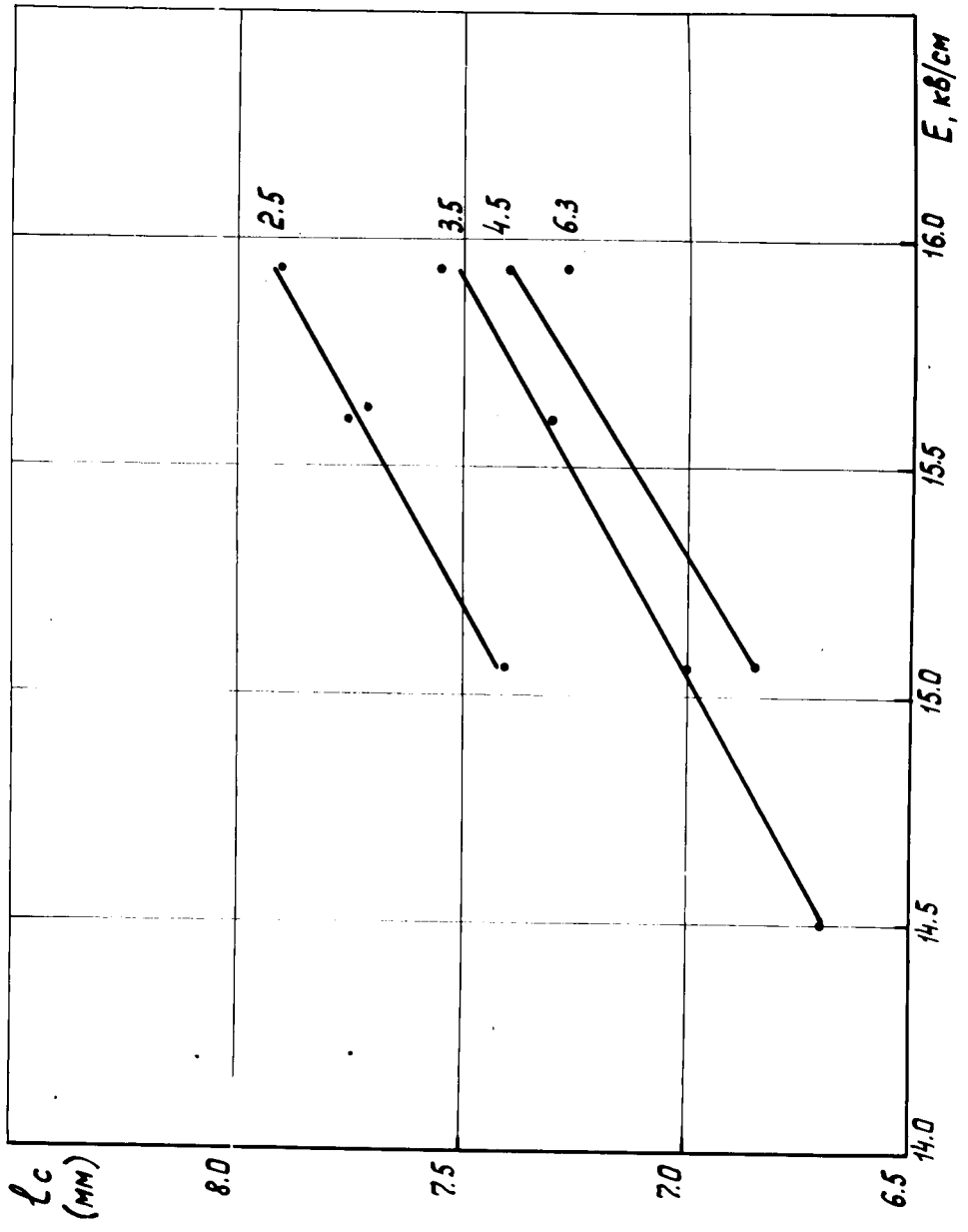
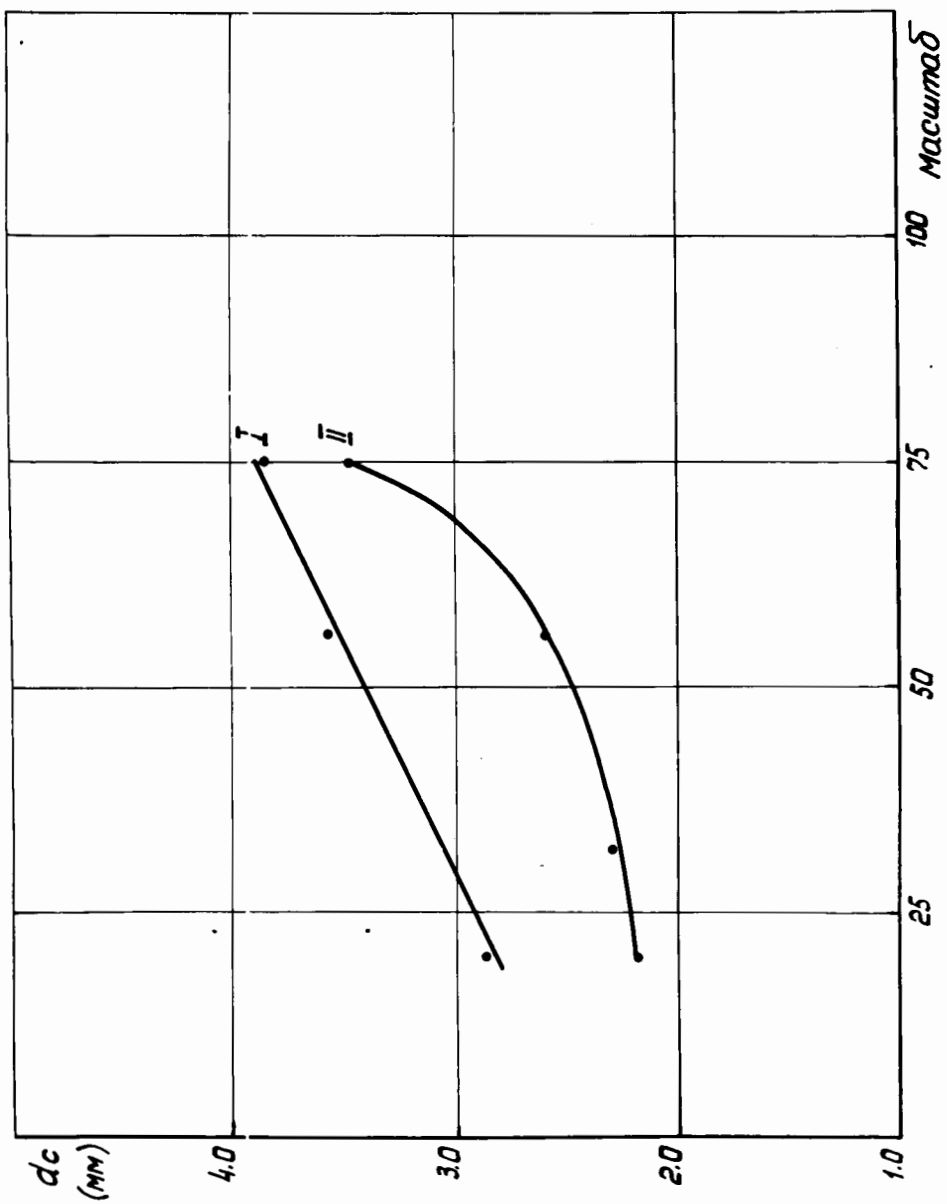


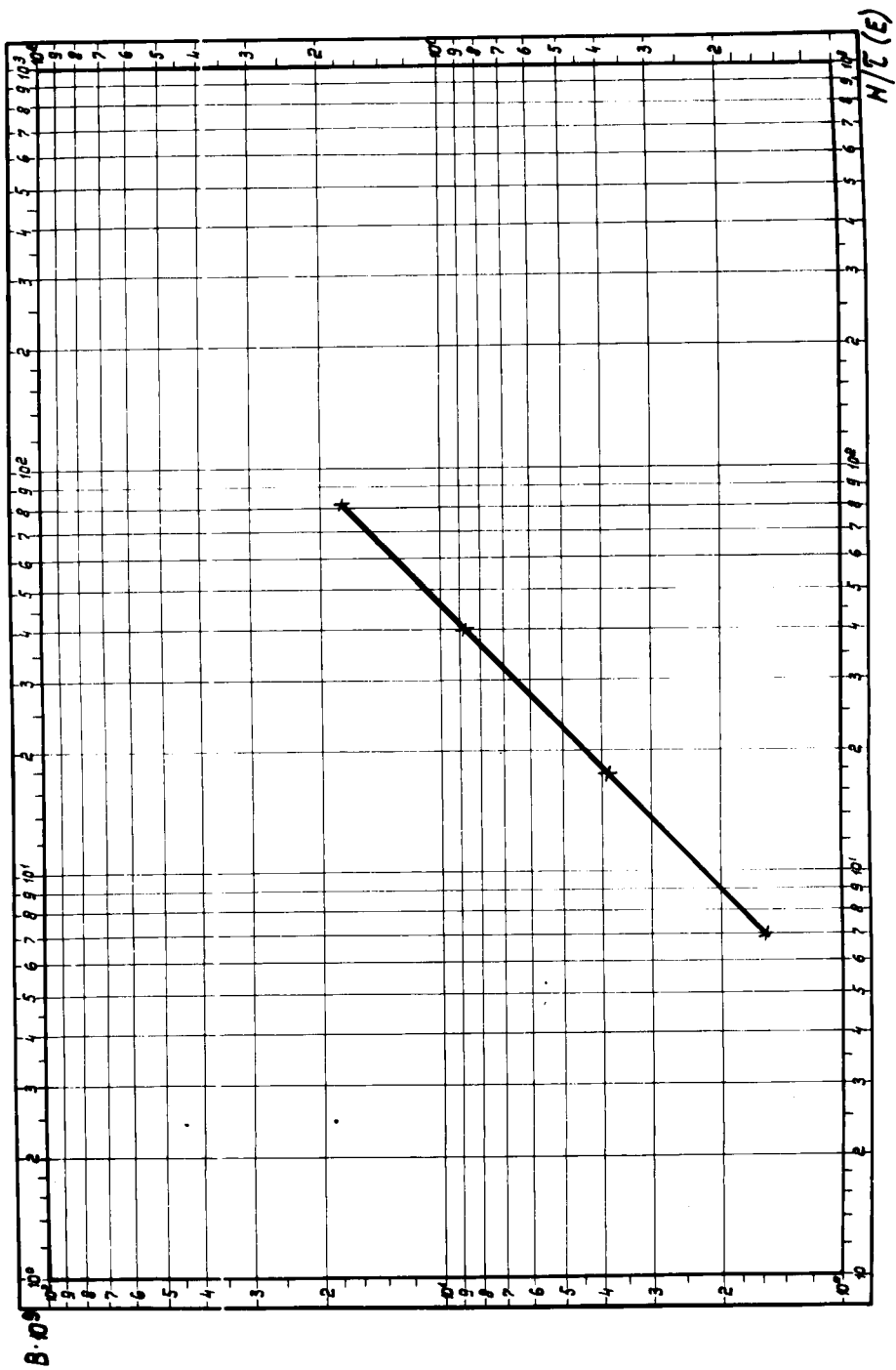
рис. 10











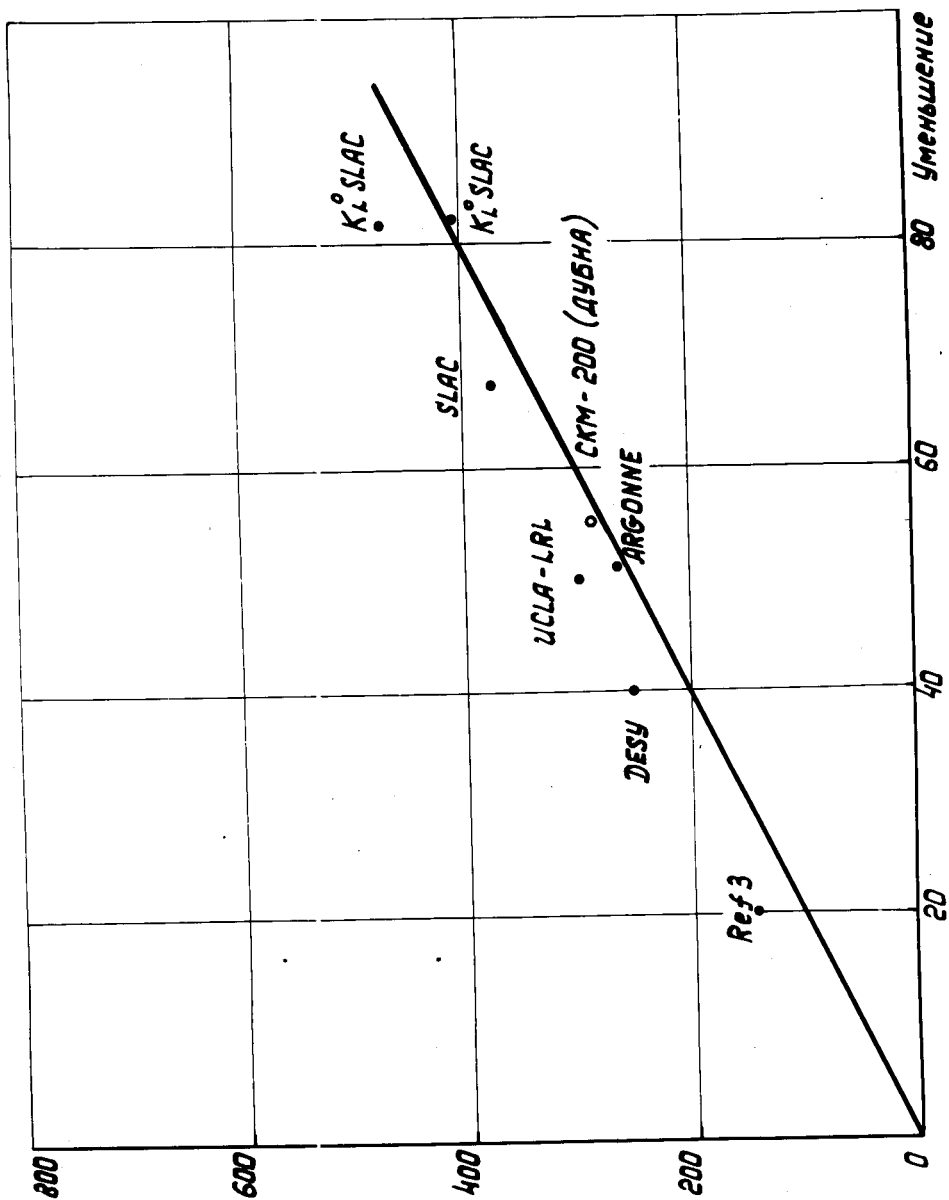


рис. 15.