

С-458

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P10 - 3152



ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
И АВТОМАТИЗАЦИИ

И.И. Скрыль

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ  
ОЦЕНКИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ  
ПРОСМОТРОВО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОРОВ

1967.

И.И. Скрыль

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ  
ОЦЕНКИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ  
ПРОСМОТРОВО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОРОВ

Направлено в журнал  
"Измерительная техника"

4853/3 чр.



## В в е д е н и е

В практике работы физических лабораторий, занимающихся обработкой снимков с трековых камер, все большее распространение получают просмотрово-измерительные проекторы. Такие приборы позволяют одновременно просматривать полученные фотографии, отбирать интересующие экспериментатора события и проводить измерения отобранных событий<sup>/1,2,3/</sup>.

Метрологические качества хорошего просмотрово-измерительного проектора позволяют использовать его как основной измерительный прибор при обработке снимков с искровых камер и снимков, полученных на пузырьковых камерах с тяжелыми жидкостями.

При обработке снимков, полученных на жидководородных пузырьковых камерах, точность измерения с помощью проектора обычно оказывается недостаточной для получения окончательных результатов. В этом случае просмотрово-измерительный проектор применяется для относительно грубых предварительных измерений (измерение маски), при условии, что дальнейшая обработка осуществляется автоматическими приборами без участия человека.

Однако при соблюдении некоторых условий мерительные качества просмотрово-измерительного проектора могут быть улучшены настолько, что его можно будет использовать и как основной измерительный прибор при обработке снимков, полученных на жидководородных камерах. Такой проектор сможет успешно конкурировать с распространенными в настоящее время приборами полуавтоматической обработки пленки - измерительными микроскопами с автоматическим отсчетом и приборами типа "Франкенштейн"<sup>/4,5/</sup>.

Целью настоящей работы является рассмотрение влияния основных ошибок изготовления и юстировки отдельных частей и узлов проектора на предельную (наибольшую ожидаемую) ошибку прибора.

Рассмотрение касается в основном схем проекторов, подобных прибору, показанному на рис. 3, то есть проекторов с измерительной системой, связанной с экраном, на который спроектирован подлежащий измерению снимок. Сразу следует заметить, что с точки зрения возможных ошибок измерения такие схемы наименее благоприятны, однако по ряду причин именно подобные проекторы получили наибольшее распространение в настоящее время.

#### Предельная ошибка измерения

Предельная ошибка измерительного прибора определяется формулой<sup>/8/</sup>

$$\Delta_{\text{пр}} = \Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{сл}} \quad (1)$$

где  $\Delta_{\text{ст}}$  - суммарная систематическая ошибка,

$\Delta_{\text{сл}}$  - предельная случайная ошибка.

Под составляющими суммарной систематической ошибки будем понимать такие ошибки, для которых может быть определена их фактическая величина и влияние этих ошибок на окончательный результат измерения может быть устранено с помощью юстировки либо путем вычислений. В последнем случае величина этих ошибок должна быть задана в виде некоторой функциональной зависимости.

Все остальные ошибки будем относить к разряду случайных.

#### Краткие замечания о систематических ошибках проектора

Просмотрово-измерительный проектор может обладать следующими систематическими ошибками:

а) разномасштабность изображения по площади экрана вследствие неточной установки плоскости измеряемого снимка, проекционного объектива и зеркал относительно экрана;

б) разномасштабность вследствие непараллельности направляющих, по которым перемещается объектив относительно пленки или пленка относительно объектива, если такие перемещения предусмотрены конструкцией проектора;

в) искажения проекции вследствие наличия дисторсии у проекционного объектива.



Влияние всех ошибок на окончательный результат может быть значительно уменьшено путем введения в расчетные формулы соответствующих поправочных функций.

Ошибки, относящиеся к пунктам а) и б), при правильно сконструированном и тщательно изготовленном проекторе, могут быть устранены путем юстировки.

Дисторсия объективов юстировкой устранена быть не может. Приведенная к снимку величина ошибки вследствие дисторсии при применении объективов типа "Индустар" (наиболее распространенный тип проекционных объективов) при угле поля зрения объектива  $2\beta$  порядка  $40^\circ$  может достигать 0,1 мм в плоскости снимка (см. работу <sup>17/</sup>, стр. 271). В этом случае введение поправочной функции в расчетные формулы обязательно. Поправочная функция может быть представлена в виде степенного ряда четных степеней радиус-вектора измеряемой точки (радиус-вектор отсчитывается от оптической оси). Для объектива типа "Индустар" можно ограничиться членами в четвертой степени, коэффициенты при членах ряда определяются экспериментально.

Из объективов с исправленной дисторсией для применения в проекторах можно рекомендовать объективы типа "Руссар-плазмат", у которых приведенная к снимку величина ошибки вследствие дисторсии может не превышать 0,01 мм при углах поля зрения  $2\beta$  порядка  $80^\circ$  (см. работу <sup>18/</sup>, стр. 174).

Вероятно, не будет ошибочным считать, что в результате тщательной юстировки и применения соответствующих объективов или путем введения в расчетные формулы поправочных функций можно получить величину приведенной к снимку неустранимой суммарной систематической ошибки порядка  $\pm 0,01$  мм при размере снимка около 50 (x 100 мм и увеличении снимка на экране порядка 10–15 крат.

#### Предельная случайная ошибка

Результаты измерения всегда выражаются в некоторых целых единицах, отличающихся друг от друга на величину, кратную цене деления отсчетной системы. Вследствие этого предельная случайная ошибка измерительного прибора

$\Delta_{сл}$  определяется не только суммой случайных ошибок, возникающих из-за неточности изготовления и юстировки отдельных частей прибора, но и зависит также от отношения

$$k = \frac{b}{\sigma_{\text{сум}}}$$

где  $b$  - цена деления отсчетной системы,  $\sigma_{\text{сум}}$  - суммарная среднеквадратическая ошибка, полученная в результате суммирования случайных ошибок прибора /9/ (будем считать, что составляющие суммарной среднеквадратической ошибки прибора распределены по нормальному закону).

Если  $k \gg 1$ , то в этом случае предельная ошибка определяется только ценой деления отсчетной системы и равна

$$\Delta_{\text{сл}} = \frac{b}{2};$$

если  $k \ll 1$ , то в этом случае

$$\Delta_{\text{сл}} = m \cdot \sigma_{\text{сум}},$$

где  $m$  - коэффициент, зависящий от принятого значения доверительной вероятности (например,  $m = 2,0$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$ ).

Оба рассмотренных случая не являются оптимальными. В первом случае не используются полностью мерительные свойства прибора; ошибка  $\Delta_{\text{сл}}$  распределена по закону равной вероятности. Во втором случае дискретность отсчета не увеличивает величины ошибки  $\Delta_{\text{сл}}$ , однако излишне малая цена деления усложняет отсчетную систему;  $\Delta_{\text{сл}}$  распределена по нормальному закону.

Обычно  $b$  и  $\sigma_{\text{сум}}$  бывают одного порядка, в этом случае закон распределения  $\Delta_{\text{сл}}$  представляет собой композицию нормального закона распределения с законом равной вероятности (см. работу /10/, стр. 85; работу /11/, стр. 74).

На рис. 1 приведены графики интегральной функции распределения величины  $\frac{\Delta_{\text{сл}}}{b}$ , вычисленные для различных значений  $k$ .

Обычно принято считать, что при автоматическом отсчете (не визуальном) предельная случайная ошибка прибора равна цене деления отсчетной системы с некоторой заданной доверительной вероятностью.

Используя приведенные на рис. 1 графики, с приближением, достаточным для практических расчетов, можно определить  $k$ , если  $\Delta_{\text{сл}} = b$ ,

а) при  $P = 0,95$ ,  $k \approx 2,5$ ,

б) при  $P = 0,99$ ,  $k \approx 3,5$ ;

то есть в случаях

$$а) \Delta_{\text{сл}} = b = 2,5\sigma \text{ сум.},$$

$$б) \Delta_{\text{сл}} = b = 2,5\sigma \text{ сум.}$$

Представляется интересным определить, насколько увеличивается при этом  $\Delta_{\text{сл}}$  по сравнению со случаем, когда  $k \ll 1$ , то есть насколько увеличивается предельная случайная ошибка вследствие дискретности отсчета в случаях а)  $\Delta_{\text{сл}} = 2,0 \sigma \text{ сум.}$ , б)  $\Delta_{\text{сл}} = 2,6\sigma \text{ сум.}$ , откуда следует, что при  $P = 0,95$  ошибка  $\Delta_{\text{сл}}$  возрастает на 25%, а при  $P = 0,99$  ошибка  $\Delta_{\text{сл}}$  возрастает примерно на 40%.

Приведенные данные позволяют также при заданной величине  $\Delta_{\text{сл}}$  определить значение  $b$  и допустимую величину  $\sigma \text{ сум.}$

#### Основные составляющие суммарной среднеквадратической ошибки проектора

Суммарная среднеквадратическая ошибка проектора может быть представлена формулой

$$\sigma_{\text{сум}} = \sqrt{\sigma_{\text{изм}}^2 + \sigma_{\text{виз}}^2 + \sigma_{\text{зер}}^2 + \sigma_{\text{иск}}^2}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{изм}}$  — среднеквадратическая ошибка измерительной системы,  $\sigma_{\text{виз}}$  — среднеквадратическая ошибка вследствие неточного совмещения измерительной марки с проекцией трека (ошибка визирования),  $\sigma_{\text{зер}}$  — среднеквадратическая ошибка вследствие отступления от плоскостности отражающих поверхностей зеркал, расположенных между проекционным объективом и экраном,  $\sigma_{\text{иск}}$  — суммарная среднеквадратическая ошибка вследствие случайных искажений, вызванных проекционными объективами, погрешностями юстировки и другими причинами.

Рассмотрим коротко каждую из этих ошибок. Величина ошибки измерительной системы проектора определяется непрямолинейностью и неперпендикулярностью направляющих, погрешностями нанесения делений отсчетной системы, зазорами в соединениях и другими причинами. Величина этой ошибки в сильной степени зависит от конструкции и качества сборки измерительной системы.

Величина ошибки визирования в меньшей степени зависит от конструкции и определяется в основном свойствами глаза оператора. На основании литературных данных <sup>/12,13/</sup> можно считать, что в случае оптимальных условий наблюдения (при яркости экрана порядка 24–32 нт и достаточной контрастности изображения) предельная величина ошибки визирования невооруженным глазом

не превышает одной угловой минуты. Пользуясь этими данными, нетрудно вычислить величину среднеквадратической ошибки визирования. При расстояниях между глазом оператора и измерительной маркой порядка 250–500 мм величина среднеквадратической ошибки  $\sigma_{\text{виз}}$  колеблется в пределах 0,025–0,050 мм. Для измерительных проекторов, применяемых в машиностроении (см. работу <sup>/14/</sup>, стр. 95), величина предельной ошибки визирования обычно принимается равной 0,140 мм, что совпадает с полученными выше цифрами.

Геометрические искажения проекции вследствие отступления от плоскости отражающих поверхностей зеркал могут достигать значительной величины. Задавая допуски на изготовление зеркал, а также во время конструирования систем крепления и юстировки следует стремиться к тому, чтобы ошибки вследствие погрешностей зеркал по крайней мере не превышали ошибки визирования. Более подробно вопрос задания допусков на зеркала будет рассмотрен в следующем разделе.

Величина суммарной ошибки вследствие случайных искажений, вызванных проекционными объективами, погрешностями юстировки и другими причинами, при тщательном изготовлении проектора, может быть небольшой и, по крайней мере, может не превышать по величине ошибки визирования <sup>/14/</sup>.

#### Требования, предъявляемые к зеркалам проекторов

Реальное плоское зеркало измерительного проектора обладает двумя основными ошибками изготовления; некоторой малой кривизной и местными или зональными ошибками.

Влияние сферичности и цилиндричности плоского зеркала на ошибки измерительного проектора рассмотрено в статье <sup>/15/</sup>. В этой же статье рассмотрено влияние ошибок юстировки зеркал.

Для того чтобы ошибки проекции определялись в основном кривизной, толщина зеркала должна быть порядка 1/10 от его наибольшего размера. Однако в больших просмотрово-измерительных проекторах, при размерах зеркал порядка 1,0–1,5 метра, это требование не может быть выполнено из-за высокой стоимости таких зеркал. Обычно в больших проекторах зеркала изготовлены из листового полированного стекла толщиной 15–30 мм. У такого зеркала основной вклад в ошибку проекции вносят не общая кривизна поверхности зеркала, а его зональные ошибки.



Рассмотрим зависимость между погрешностями проекции и зональными ошибками зеркала. Пользуясь рис. 2, можно получить формулы:

$$\Delta y'_0 = \frac{2}{\cos \beta_0} \cdot \left[ \frac{L}{\cos \beta_0} - \frac{\ell \cdot \cos i}{\cos(i - \beta_0)} \right] \alpha_0, \quad (5)$$

$$\Delta y'_\Pi = \frac{2 \cdot \cos i}{\cos^2 \beta_\Pi} \cdot (L - \ell) \cdot \alpha_\Pi; \quad (6)$$

или

$$\alpha_0 = \frac{\Delta y'_0 \cdot \cos \beta_0}{2 \left[ \frac{L}{\cos \beta_0} - \frac{\ell \cdot \cos i}{\cos(i - \beta_0)} \right]}, \quad (7)$$

$$\alpha_\Pi = \frac{\Delta y'_\Pi \cdot \cos^2 \beta_\Pi}{2 \cos i \cdot (L - \ell)} \quad (8)$$

На рис. 2 и в формулах приняты следующие обозначения:  $\beta_0$  - угол поля зрения в плоскости отражения осевого луча,  $\beta_\Pi$  - угол поля зрения в плоскости, перпендикулярной плоскости отражения осевого луча,  $\alpha_0$  и  $\alpha_\Pi$  - угловые величины отступления зеркала от плоскостности (зональные ошибки) в плоскости отражения осевого луча и в плоскости, ей перпендикулярной соответственно,  $\Delta y'_0$  и  $\Delta y'_\Pi$  - величины ошибок изображения в плоскости отражения осевого луча и в плоскости, ей перпендикулярной соответственно.

Остальные обозначения ясны из рисунка: сплошными линиями показан ход лучей при отражении от строго плоского зеркала, пунктирными - лучи при отражении от зеркала с зональными ошибками.

Полученные формулы действительны при таких положениях зеркала и зональных ошибках, когда в пределах рабочего пучка лучей зеркало может считаться плоским (искажения волнового фронта меньше четверти длины световой волны). Это условие почти всегда выполняется, за исключением случаев, когда зеркало расположено в непосредственной близости к проекционному объективу. Под рабочим пучком понимается пучок лучей, дающий на экране изображение отдельной точки предмета.

В зависимости от схемы большого просмотрово-измерительного проектора величина допустимой зональной ошибки может принимать значения от 2 до 10 угловых секунд при условии, что предельная величина ошибки  $\Delta y'$  не превышает 0,1 мм.

Зеркала, изготовленные из обычного полированного зеркального стекла, обладают ошибками, в несколько раз большими.

Поскольку, как правило, измерения ведутся не по всей площади проекции, представляется разумным зеркало большого проектора делать составным, располагая на пути лучей света, которые дают изображения, подлежащее измерению, зеркало более высокого качества.

Следует заметить, что качество зеркала необходимо проконтролировать после установки его в проекторе, так как система крепления зеркала может вызвать дополнительные значительные искажения. Контроль можно осуществить с помощью автоколлимационной трубы и пентапризмы.

#### Пример расчета предельной ошибки проектора

Рассчитаем предельную ошибку измерения для просмотрово-измерительного проектора, показанного на рис. 3. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 - собственно проектор, состоящий из осветителя, устройства перемотки пленки и проекционного объектива, 2 - зеркало, 3 - экран, 4 - измерительная система. Штриховкой обозначена та часть экрана, в пределах которой можно проводить измерения.

Расчет начнем с определения составляющих суммарной среднеквадратической ошибки. На основании опытных данных можно считать, что предельная ошибка измерительной системы (относительно простой, но тщательно изготовленной) может быть порядка 0,1 мм, отсюда будем считать, что  $\sigma_{\text{изм}} = 0,035$  мм.

Примем, что  $\sigma_{\text{зер}} = 0,035$  мм. Исходя из этой величины, определим допуски на зеркало.

Воспользовавшись данными, приведенными на рис. 3, можно записать:  $L = 5000$  мм;  $l = 2500$  мм;  $\beta_0 = -11^\circ$ ;  $\beta_{\text{II}}^- = 5^\circ$ ;  $i = 15^\circ$ . Отсюда при  $\Delta y' = 0,1$  мм, используя формулы (7) и (8), получаем:  $\alpha_0 = 2,0 \times 10^{-5}$  рад,  $\alpha_{\text{II}}^- = 2,1 \times 10^{-5}$  рад или  $\alpha_0 = \alpha_{\text{II}}^- = 4''$ .

Далее, примем  $\sigma_{\text{виз}} = 0,050$  мм,  $\sigma_{\text{иск}} = 0,035$  мм.

По формуле (4) получим:

$$\sigma_{\text{сум}} = \sqrt{0,035^2 + 0,050^2 + 0,035^2 + 0,035^2} = 0,08 \text{ мм.}$$

Используя равенство (2), получим:

$$\Delta_{\text{сл}} = 2,5 \times 0,08 = 0,20 \text{ мм,}$$

при этом величина цены деления отсчетной системы  $b = 0,20 \text{ мм}$ .

Считая, что неустроенная часть суммарной систематической ошибки  $\Delta_{\text{ст}} = \pm 0,10 \text{ мм}$ , по формуле (1) получим величину предельной ошибки:

$$\Delta_{\text{пр}} = (\pm 0,10) \pm 0,20 = \pm 0,30 \text{ мм (в плоскости экрана).}$$

Представляется интересным рассмотреть случай, когда составляющие ошибки (за исключением ошибки визирования) настолько малы, что их влияние можно не учитывать.

В таком случае, приняв  $\sigma_{\text{виз}} = 0,040 \text{ мм}$ , получим

$$\text{по (4) } \sigma_{\text{сум}} = 0 \quad \sigma_{\text{виз}} = 0,040 \text{ мм,}$$

$$\text{по (2) } \Delta_{\text{сл}} = 2,5 \sigma_{\text{сум}} = 0,10 \text{ мм.}$$

При этом цена деления отсчетной системы  $b = 0,10 \text{ мм}$ , по (1)  $\Delta_{\text{пр}} = \pm 0,10 \text{ мм}$  (в плоскости экрана).

Для того чтобы определить предельную ошибку измерения в плоскости снимка, необходимо величину ошибки в плоскости экрана разделить на линейное увеличение проектора. Например, при увеличении 10 крат предельная ошибка в плоскости снимка получается равной  $\pm 0,010 \text{ мм}$ .

Полученная величина ошибки всего в два раза превышает предельную ошибку измерительного микроскопа типа УИМ-21 (с визуальным отсчетом) (см. работу<sup>18/</sup>, стр. 247).

#### Возможные пути улучшения мерительных качеств просмотрово-измерительных проекторов

Основным недостатком просмотрово-измерительных проекторов, подобных приведенному на рис. 3, является то, что погрешности изготовления и сборки отдельных частей проекционной системы прибора существенным образом влияют на величину ошибки измерения. В результате этого приходится задавать весьма жесткие допуски на изготовление и установку деталей проекционной части проектора. Кроме этого, такой проектор очень неустойчив к температурным изменениям и вибрациям.

В то же время в измерительной технике известны способы борьбы с указанными выше недостатками — это создание приборов, в которых измерения проводятся нулевым методом либо методом равных искажений (метод замещения) (см. работу<sup>17/</sup>, стр. 83).

Суть нулевого метода заключается в том, что лучи света, идущие от точек, подлежащих измерению, испытывают всегда одинаковые искажения, а поскольку измерения всегда относительны (измеряется положение одной точки относительно другой), то эти искажения не влияют на окончательный результат измерения. То есть при нулевом методе устранено полностью влияние погрешностей проекционной системы на ошибку измерения.

Практически реализуется этот метод в том случае, когда, скажем, измерительная марка неподвижна, а предмет, подлежащий измерению, перемещается до тех пор, пока измеряемая точка не совместится с изображением неподвижной измерительной марки. Измерения нулевым методом осуществляются, например, в измерительном микроскопе УИМ-21, на базе которого создан прибор ПУОС<sup>/4/</sup>. Недостатком метода является то, что при измерениях необходимо перемещать предмет относительно проекционной системы или целиком проекционную систему относительно предмета; оба случая не всегда реализуются достаточно просто на практике.

Идея метода равных искажений состоит в том, что лучи света от измеряемой точки и измерительной марки, проходя через проекционную систему, испытывают одинаковые искажения.

Практически такой метод может быть реализован в том случае, если измерительная марка не связана с экраном, а проектируется той же проекционной системой, что и измеряемый снимок, и сопряжена с плоскостью снимка (скажем, с помощью светоделительной призмы, расположенной между снимком и проекционным объективом). При конструктивном осуществлении такого проектора возникает ряд трудностей, основной из которых является проблема создания позиционной отсчетной системы с необходимой точностью отсчета. Следует заметить, что применение позиционной отсчетной системы в просмотрово-измерительном проекторе вообще не является обязательным - применение позиционной системы только несколько ускоряет процесс измерения, а создание проектора, работа которого основана на методе равных искажений, позволит получать прибор, метрологические качества которого будут близки к качествам измерительного микроскопа типа УИМ-21.



## Поле окружения и условия работы оператора

Ошибки измерения в условиях эксплуатации зависят не только от метрологических качеств измерительного прибора, но и от тех условий, в которых находится оператор, работающий на данном приборе.

Немалое влияние на утомляемость оператора оказывает яркость поля окружения. Под полем окружения понимается часть пространства вокруг экрана проектора, которая находится в поле зрения оператора во время работы.

Для создания оптимальных условий яркость поля окружения должна быть несколько меньше или равна яркости экрана (см. работу /18/, стр. 98), при этом должны отсутствовать резкие и глубокие тени в пределах поля зрения, в поле зрения не должно быть также мест с яркостью, превышающей яркость экрана (блики).

Если создать такие условия в комнате с белыми стенами и потолком, то рассеянный ими свет засвечивает измерительный экран. В результате этого контрастность изображения значительно снижается и работа в таких условиях становится затруднительной.

Для установки проекторов, подобных приведенному на рис. 3, можно рекомендовать следующее оформление помещения. Чтобы уменьшить влияние паразитной засветки, предметы, находящиеся вне поля зрения оператора, в том числе стены и потолок, нужно окрасить в темный цвет краской с малым коэффициентом отражения (вероятно, для этого подойдут темно-синие тона), а предметы, находящиеся ниже уровня экрана, в том числе пол и нижнюю часть стены, следует окрасить в светлые, мягкие тона матовой краской, при этом светильники должны быть скрытыми и располагаться ниже уровня экрана.

Можно надеяться, что такое оформление помещения существенно снизит утомляемость оператора, работающего на просмотрово-измерительном проекторе, и сделает его работу более приятной.

В заключение автор благодарит В.Д. Инкина и В.М. Котова за полезные замечания.

## Л и т е р а т у р а

1. I. Heughebart, I. Debaisieux and F. Crard. A Projector for Large-Size Bubble Chamber Pictures. Nuclear Instruments and Methods. 42, 87 (1966).
2. M.J.B. Duff and C.J. Robinson. The design and Construction of Six Digitised Microscopes for the Measurement of Bubble Chamber Photographs. Nuclear Instruments and Methods. 25, 197 (1964).
3. Ф. Легар, М. Малы, О. Сгон. Полуавтоматический прибор для просмотра и измерения снимков с искровых камер. ПТЭ, № 5, 78 (1966).
4. Ю.А. Каржавин. Автоматизация измерений по снимкам с пузырьковых камер. Препринт ОИЯИ, № 1552, Дубна, 1964.
5. Р. Позе. Автоматы и полуавтоматы для обработки камерных снимков. Препринт ОИЯИ, № 2205, Дубна, 1964.
6. В.А. Никитин. Некоторые вопросы методики оценки погрешностей оптико-механических измерительных приборов. Оптико-механическая промышленность, № 12, стр. 2 (1963).
7. Б.В. Фефилов. Прикладная оптика. Геодезиздат, М, 1947.
8. М.М. Русинов. Фотограмметрическая оптика. Геодезиздат, М, 1962.
9. И.М. Граменицкий, М.И. Подгорецкий. Статистика при измерениях со шкалой. Препринт ОИЯИ, № 1505, Дубна, 1964.
10. В.П. Коротков, Б.А. Тайц. Основы метрологии и точности механизмов приборов. Машгиз, М, 1961.
11. А.С. Немировский. Вероятностные методы в измерительной технике. Изд-во стандартов, М, 1964.
12. В.В. Новопашин. О взаимосвязи контрастной чувствительности глаза и остроты зрения. Техника кино и телевидения, № 3, стр. 48, 1964.
13. Н.Я. Крупп. Оптико-механические измерительные приборы. Машгиз, М, 1962.
14. В.И. Саркин. Современные оптико-механические проекторы. Издат. стандартов, М, 1962.
15. Г.В. Погаров. О точности изготовления и юстировки плоских зеркал проекторов. Изв. вузов СССР. Приборостроение, № 4, стр. 71 (1962).
16. А.В. Эрвайс. Юстировка и ремонт оптико-механических измерительных приборов. Машгиз, М, 1958.
17. С.Ф. Маликов. Введение в технику измерений. Машгиз, М., 1949.
18. В.В. Мешков, И.И. Соколов. Курс осветительной техники. Госэнергоиздат, М, 1953.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 февраля 1967 г.

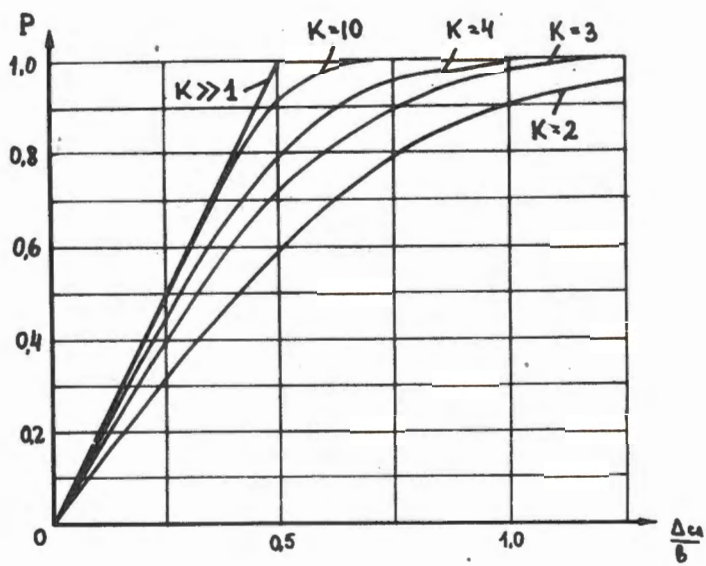


Рис. 1

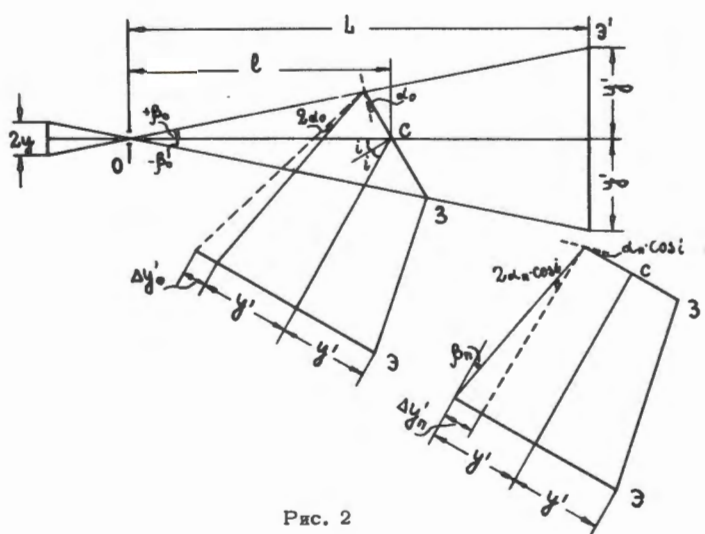


Рис. 2

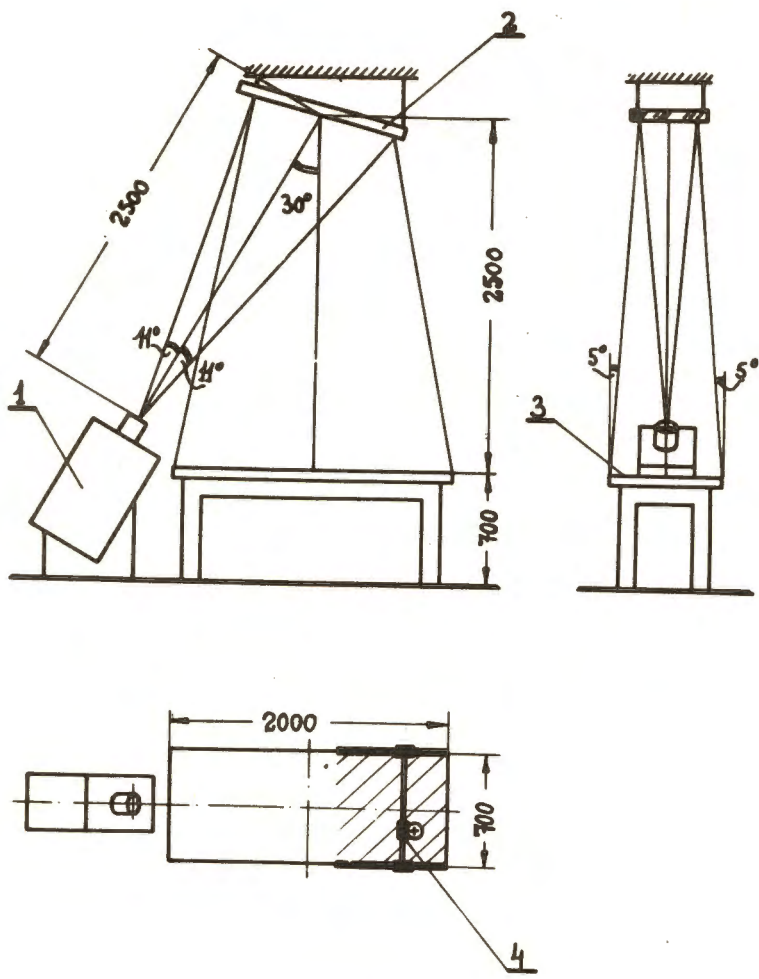


Рис. 3