

Юстировка оптических приборов

Г. В. Погарев

Юстировка  
оптических  
приборов

*Г. В. Погарев*

*Ю*стировка  
оптических  
приборов



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
ЛЕНИНГРАД 1968

Юстировка оптических приборов. Погарев Г. В.,  
изд-во «Машиностроение», 1968, 292 стр. Табл. 15. Илл. 128. Библ. 68 назв.

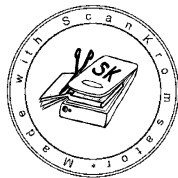
В книге освещены общие вопросы сборки и юстировки оптических приборов и типовые сборочно-юстировочные операции. Подробно изложены современные аналитические методы решения разнообразных юстировочных задач и особенно тех, которые возникают при анализе свойств и при сборке зеркально-призмennых систем. Приведена методика расчета допусков на погрешности изготовления и сборки оптических деталей.

Рассмотрены сборка, юстировка и контроль типовых оптических узлов и ряда основных наблюдательных и измерительных приборов.

Изложены основы разработки методик юстировки и контроля оптических приборов в процессе сборки; рассмотрены анализ технологичности конструкций и пути повышения производительности труда на сборке приборов.

Приведено и решено большое число практических примеров и задач по юстировке оптических приборов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников — конструкторов, технологов и исследователей оптических приборов. Она может быть полезна также студентам старших курсов приборостроительных специальностей вузов.



Рецензент канд. техн. наук Г. Е. Скворцов

## *Предисловие*

Новый подъем всей социалистической экономики, предусмотренный Программой КПСС и пятилетним планом 1966—1970 гг., выдвигает перед оптической промышленностью большие и сложные задачи по дальнейшему увеличению выпуска и систематическому повышению качества приборов. В решении этих задач все большее значение приобретает юстировка, имеющая целью приведение оптических приборов в рабочее состояние.

Юстировка непосредственно связана с проектированием приборов, разработкой технологических процессов их изготовления, сборкой и контролем приборов, их эксплуатацией и исследованием. На всех перечисленных этапах перед проектировщиком, конструктором и исследователем возникает множество разнообразных юстировочных вопросов, от правильного решения которых во многом зависят технологичность конструкций приборов, их себестоимость, а также их качество, надежность и долговечность в работе.

В оптическом приборостроении, как и в других отраслях точного приборостроения, наиболее широко применяется сборка с конструктивными и технологическими компенсаторами, так как простое соединение деталей и узлов почти никогда не дает еще готового прибора: контроль обнаруживает его несоответствие требованиям технических условий (ТУ). Поэтому после сборки прибора, как правило, требуется его юстировка, задача которой и состоит в том, чтобы скомпенсировать в пределах заданных допусков систематические погрешности изготовления и сборки деталей. Компенсация достигается чаще всего малыми подвижками схемных деталей, влияющими на заданные свойства и характеристики прибора.

Сборка оптических приборов и особенно ее завершающая часть — юстировка нередко представляют собой сложную техническую задачу. Причина этого часто кроется в недостаточной теоретической разработанности отдельных вопросов юстировки оптических приборов, вследствие чего на практике некоторые юстировочные задачи приходится решать опытным путем (методом пробных подвижек), который не всегда является наилучшим.

Советскими учеными сделан наибольший вклад в разработку основных положений теории юстировки оптических приборов, что способствовало улучшению качества выпускаемых приборов, повышению производительности труда на их сборке и снижению их себестоимости. Наиболее важное практическое значение здесь имели:

разработка В. П. Линником совместно с П. Д. Радченко метода сборки объективов насыпного типа для микроскопов, который значительно упрощает центрировку линз и повышает точность сборки;

создание А. И. Тудоровским метода расчета хода лучей через зеркально-призмённые системы, имеющие ошибки изготовления и установки;

труды А. Н. Захарьевского по теории юстировки оптических дальномеров, угломерных, бинокулярных и интерференционных приборов;

исследования В. В. Каврайского в области теории юстировки навигационных угломерных приборов;

работы Д. Д. МаксUTOва по сборке и контролю астрономических оптических инструментов;

решение М. М. Русиновым вопросов сборки, юстировки, контроля и исследования широкоугольных аэрофотообъективов;

создание А. Н. Захарьевским в ЛИТМО и С. И. Фрейбергом в МВТУ им. Баумана курса «Сборка и юстировка оптических приборов», а также работы в области сборки и юстировки оптических приборов Е. Н. Царевского, И. А. Шошина, Г. Е. Скворцова, И. В. Лебедева, А. А. Забелина и других специалистов.

В последние годы в нашей стране издан ряд книг, в которых освещен заводской опыт сборки, юстировки и контроля некоторых типов оптических приборов.

Огромный практический опыт сборки и юстировки оптических приборов накоплен новаторами оптико-механической промышленности. Среди них наиболее известны имена сборщиков-оптикомехаников — лауреатов Государственной премии А. А. Беспалова и Л. Ф. Ямшанова (Ленинградское оптико-механическое объединение), Героев Социалистического Труда Б. С. Артамонова (Москва) и В. П. Филиппова (Киев, «Арсенал»).

К настоящему времени созданы условия для обобщения имеющегося опыта в области сборки и юстировки оптических приборов. Такое обобщение содействовало бы дальнейшему повышению качества выпускаемых приборов при одновременном снижении их себестоимости. Предлагаемая книга представляет собой первый шаг в этом направлении.

Автор признателен кандидатам технических наук И. М. Долинскому и В. В. Хваловскому, а также инж. Ю. М. Стогову за просмотр рукописи и полезные советы.

Все замечания и пожелания по книге автор просит направлять по адресу: Ленинград, Д-65, ул. Дзержинского, 10.

# **ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СБОРКИ И ЮСТИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

## **Глава I**

### **ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ ПРИБОРАМ. НАЗНАЧЕНИЕ И МЕТОДЫ ЮСТИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

#### **1. Типы современных оптических приборов и требования к ним**

Оптические приборы можно классифицировать по назначению, по конструктивно-функциональным признакам и с точки зрения технологических особенностей их изготовления. На заводах специализированные цехи и участки выпускают следующие группы приборов.

1. Приборы для измерения длин и углов — оптиметры, ультраоптиметры, длиномеры, сферометры, инструментальные и универсальные измерительные микроскопы, линейные измерительные машины, профильные проекторы, оптические делительные головки, гониометры, рефрактометры, автоколлимационные трубы, катетометры.

2. Микроскопы — биологические, металлографические, ультрафиолетовые, люминесцентные, инфракрасные, поляризационные, интерференционные, бинокулярные.

3. Наблюдательные приборы — галилеевские и призмённые бинокли, стереотрубы, перископы малых и средних габаритов.

4. Геодезические приборы — нивелиры, теодолиты, пассажные инструменты, светодальномеры.

5. Астрономические приборы — телескопы, гелиостаты, астрографы и другие инструменты.

6. Фото- и киносъёмочные камеры.

7. Кинопроекционные аппараты, эпи- и диапроекторы.

8. Призмённые и дифракционные спектральные приборы, а также микрофотометры, спектропроекторы.

9. Интерферометры, колориметры, фотометры, газовые рефрактометры, сахариметры.

10. Аэрофотоаппаратуру, фотограмметрическую аппаратуру, фототеодолиты, стереокомпараторы, стереопланиграфы, фототрансформаторы, приборы для оптической разметки.

11. Мореходные и навигационные оптические приборы — секстанты, наклономеры, пеленгаторы.

12. Медицинские оптические приборы — глазные рефрактометры, щелевые лампы, диоптриметры, эндоскопы различных типов.

Опытные цехи вынуждены заниматься сборкой и юстировкой любых из перечисленных типов приборов.

Разумеется, невозможно в одной небольшой книге осветить сборку и юстировку всех перечисленных приборов. Следует рассмотреть лишь основные и общие вопросы их сборки и юстировки, и в первую очередь — юстировку типовых узлов.

Типовыми узлами являются:

объективы зрительных труб, микроскопов, фото-, кино- и проекционных аппаратов;

трубы зрительные, визирные, с глубокой фокусировкой, панкратические, с переменной увеличения, бинокулярные;

зеркально-призменные системы — неподвижные, поворотные, с параллельным перемещением;

оптические микрометры, отсчетные микроскопы и трубы, проекционные системы;

осветительные системы.

К типовым приборам следует отнести наблюдательные телескопические приборы, микроскопы, приборы для измерения длин и углов в машиностроении, угломерные, спектральные, интерференционные и некоторые другие приборы.

Требования к оптическим приборам задаются общими и частными техническими условиями (ОТУ и ЧТУ). Технические условия, согласованные заводом-изготовителем с заказчиком и надлежащим образом оформленные, являются не только основным производственно-техническим, но и юридическим документом. Технические условия кладутся в основу технологии изготовления прибора и являются обязательными для всех цехов и подразделений завода.

В соответствии с техническими условиями производятся контроль, приемка и браковка приборов как отделом технического контроля (ОТК), так и представителем заказчика.

Общие технические условия на приборы опытного, серийного и массового изготовления содержат перечень основных требований к материалам, деталям, узлам, к приборам в целом, к запасным частям и принадлежностям, к таре, к оптическим свойствам приборов, а также описание методов их поверки и испытаний. Отдельные требования имеют качественный характер, например требования к отделке прибора, остальные являются количественными, как, например, требования к величине поля зрения или к увеличению прибора. При задании количественных требований указываются номинальное значение параметра и допускаемые отступления.

Технические условия составляются с учетом условий работы прибора; свойств его конструкции и приемника излучения; возможностей выполнения заводом предъявленных к прибору требований.

Современные оптические приборы используются в самых разнообразных условиях. Климатические, атмосферные и температурные условия, ускорения, вибрации, воздействующие на прибор, влияют на точность и надежность его работы. В связи с этим особые требования предъявляются, например, к приборам, отправляемым в страны с тропическим климатом. Такие приборы испытывают в специальных камерах, имитирующих климат тропиков.

Оптические и конструктивные схемы приборов могут обладать специфическими свойствами. Призмённые оптические системы, например, вызывают перекося изображения; панорамические визиры, содержащие призмы Дове или Пехана, имеют систематические ошибки с периодом, равным двум оборотам головки. Вследствие этого в призмённых приборах следует проверять перекося или наклон изображения, а в панорамических визирах ошибки угламера надо контролировать в пределах двух оборотов головки.

Любое требование к прибору может быть выполнено в производстве лишь с некоторым приближением. Например, оптические детали приборов всегда имеют отдельные дефекты чистоты полированных поверхностей и пороки материалов, с которыми приходится мириться. Технические условия составляются так, чтобы они были выполнимы на производстве и могли быть проверены приемщиком.

На первый образец или опытную партию приборов составляются временные ТУ, на основе которых с учетом опыта изготовления первого образца или установочной партии приборов разрабатываются постоянные ТУ. На каждый прибор составляются особые ТУ, но к любому оптическому прибору предъявляются следующие общие требования: к увеличению прибора; величине предметного поля зрения; качеству изображения, определяемому пределом разрешения; размеру, форме и удалению выходного зрачка; отсутствию вредных рефлексов; чистоте оптических деталей и светопропусканию; параллаксу сетки; диоптрийной установке окуляров; наклону изображения, повороту сетки и др.

К бинокулярным приборам предъявляются дополнительные требования, вытекающие из условий стереоскопического зрения: к параллельности осей выходящих пучков лучей; разности увеличений спаренных систем; перекося изображений в системах и др.

На основании общих и частных технических условий необходимо уметь находить технические требования к изготовлению и к сборке каждого узла и детали. Эти задачи относятся к числу основных. Правильное их решение имеет большое значение для производства. Покажем это на примере, взятом из заводской практики [14].



**Пример.** В современных биологических микроскопах используются сменные объективы различных увеличений и апертур, закрепленные на общем поворотном револьвере и последовательно включающиеся в ход лучей. В рабочих положениях револьвер закрепляется пружинным фиксатором.

В комплект серийного рабочего биологического микроскопа МБР-1 входят три объектива —  $8\times 0,20$ ;  $40\times 0,65$  и  $90\times 1,25$ ,

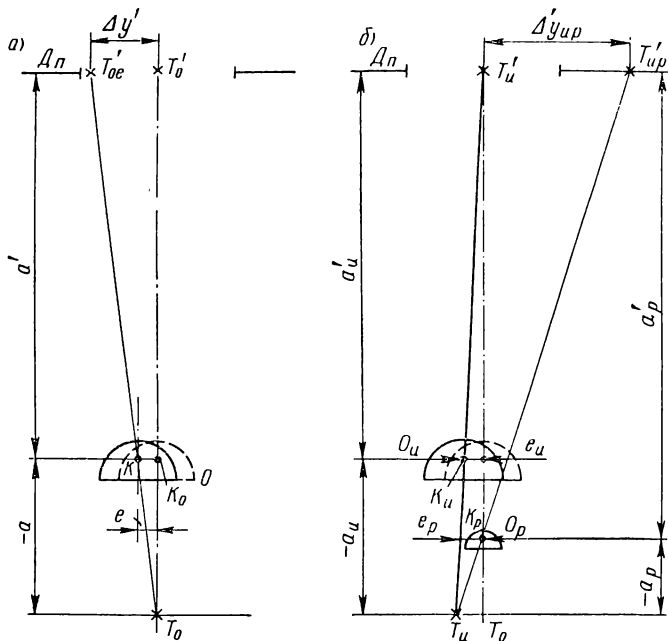


Рис. 1. Влияние децентрировки микрообъекта на сдвиг изображения в поле зрения окуляра

а также три сменных окуляра —  $7\times$  (с полем зрения  $d_n = 18$  мм),  $10\times$  ( $d_n = 14$  мм) и  $15\times$  ( $d_n = 8$  мм).

Объектив меньшего увеличения, как имеющий наибольшее предметное поле зрения, служит при работе в качестве искателя для предварительного осмотра препарата и выбора участков, требующих исследования с более сильными объективами. При этом требуется, чтобы и после включения объектива с большим увеличением выбранная точка препарата изображалась хотя бы в пределах полевой диафрагмы окуляра. Таким образом, смещение изображения в поле зрения окуляров при смене объективов допускается не более 9—4 мм в зависимости от увеличения используемого окуляра. Конечно, было бы желательно, чтобы изображение интересующей точки при включении любого объектива оставалось вблизи центра полевой диафрагмы, где получается наилучшее ка-

чество. Но, как будет показано ниже, это условие потребовало бы весьма строгих, практически не выполнимых допусков на изготовление револьвера и объективов.

Предлагается найти величину допустимой децентрировки сменных объективов микроскопа МБР-1, закрепленных на поворотном револьвере.

Вначале рассмотрим, как влияет сдвиг микрообъектива на положение изображения наблюдаемой точки. На рис. 1 микрообъектив  $O$  схематически изображен в номинальном положении штриховыми линиями, а в действительном положении после сдвига на величину  $e$  — сплошными линиями. Положение микрообъектива здесь однозначно определяется положением его эквивалентной узловой точки, которая в исходном положении микрообъектива отмечена  $K_0$ . Под эквивалентной узловой точкой понимается точка пересечения с оптической осью микрообъектива прямой, проведенной через сопряженные внеосевые точки плоскости предмета и плоскости изображения. Такие прямые на рис. 1 отмечены  $\overline{T_0 T'_{0e}}$ ,  $\overline{T_u T'_u}$  и  $\overline{T_u T'_{up}}$ . Из рис. 1, а видно, что изображение осевой точки  $T_0$  предмета при этом сдвинется в плоскости полевой диафрагмы  $D_n$  из положения  $T'_0$  в положение  $T'_{0e}$  на расстояние  $\Delta y'$ , причем

$$\Delta y' = e \frac{a' - a}{-a} = e(1 - V), \quad (I.1)$$

где  $a'$  и  $a$  — расстояния от эквивалентной узловой точки микрообъектива до плоскости предмета и соответственно до плоскости изображения;

$V$  — линейное увеличение объектива.

Из полученной формулы следует, что децентрировка объектива, через который ведется наблюдение, влияет тем сильнее, чем больше его увеличение. Для слабого объектива получатся довольно грубые допуски; например, положив  $\Delta y' \leq 4$  мм, при  $V = -8\times$  найдем, что допустимы сдвиги эквивалентной узловой точки не более величины

$$e \leq \frac{\Delta y'}{1 - V} = \frac{4}{1 - V} = \frac{4}{9} \approx 0,4 \text{ мм.}$$

Для 40-кратного объектива получили бы  $e \leq \frac{4}{41} \approx 0,1$  мм,

а для 90-кратного  $e \leq \frac{4}{91} \approx 0,04$  мм.

Полученные величины можно рассматривать как предельные допуски для погрешности фиксации каждого из объективов в рабочем положении после поворота револьверного диска.

Можно прийти к логичному на первый взгляд, но на самом деле ошибочному заключению, что и для сменных микрообъективов, работающих на общем револьвере, требования к точности их центрировки возрастают также пропорционально увеличению, т. е.

принять в качестве допусков на децентрировку объективов полученные выше величины.

На рис. 1, б показано, что работа сменных объективов взаимосвязана. Штриховой линией условно изображен слабый объектив-искатель  $O_u$  в номинальном положении, сплошными линиями — тот же объектив, сдвинутый на величину  $e_u$ , а также рабочий объектив  $O_p$  большего увеличения, включенный вместо искателя и занимающий строго номинальное положение. Эквивалентные узловые точки объективов отмечены соответственно  $K_u$  и  $K_p$ . Если объектив-искатель изображал точку предмета  $T_u$  в центре поля зрения  $T'_u$ , то при включении рабочего объектива та же точка  $T_u$  изобразится в точке  $T'_{up}$ , которая на рис. 1, б оказался за пределами полевой диафрагмы на расстоянии  $\Delta y'_{up}$  от ее центра. Величина сдвига изображения теперь равна

$$\Delta y'_{up} = \overline{T_u T_0} \frac{a'_p}{-a_p} = e_u (1 - V_u^{-1}) V_p = e_p (1 - V_p^{-1}) V_p, \quad (I.2)$$

где  $e_u$  и  $e_p$  — расстояния между осями, проходящими через общую точку  $T'_u$  — центр полевой диафрагмы — и через эквивалентные узловые точки  $K_u$  и  $K_p$  объектива-искателя и рабочего объектива; эти расстояния измерены в плоскости точки  $K_u$  и в плоскости точки  $K_p$ ;

$V_u$  и  $V_p$  — линейные увеличения соответствующих объективов.

Для микроскопа МБР-1, положив  $\Delta y'_{up} \leq 4$  мм, напомним

$$\text{Т а б л и ц а 1} \quad e_u \leq \frac{4}{V_u - 1} \cdot \frac{V_u}{V_p} \text{ мм} \quad (I.3)$$

**Допуски на децентрировку  
микрообъективов из условия  
взаимозаменяемости**

и аналогично

$$e_p \leq \frac{4}{V_p - 1} \text{ мм.} \quad (I.4)$$

Варианты переключения объективов	$V_u$	$V_p$	$e_u$	$e_p$
			мм	
1	8×	40×	0,089	0,098
2	8×	90×	0,039	0,044
3	40×	90×	0,043	0,044

Допуски для децентрировки объективов при трех возможных вариантах их переключений приведены в табл. 1. Отсюда можно найти допуски на поперечную децентрировку объективов в корпусах, на неперпендикулярность подрезки опорных торцов корпусов, на точность расточки и подрезки гнезд под объективы в револьвере и т. д.

Из полученных результатов следует:

1) требования к взаимной центрировке объективов зависят почти исключительно от увеличения  $V_p$  рабочего объектива;

в качестве рабочих объективов используются лишь объективы больших увеличений, например в микроскопе МБР-1 объективы  $40\times$   $\times 0,65$  или  $90\times 1,25$ ;

2) сдвиг изображения в поле зрения отсутствует лишь в одном случае, когда  $e_p = 0$ , т. е. когда эквивалентная узловая точка  $K_p$  рабочего объектива оказывается на оси  $\bar{T}_u'K_u$ , задаваемой положением эквивалентной узловой точки  $K_u$  объектива-искателя; ось  $T_u'K_u$  является осью микроскопа;

3) требования к точности центрировки объективов — искателя и рабочего — несколько отличаются друг от друга, причем эти требования даже несколько строже для объектива с меньшим увеличением.

## 2. Виды сборки оптических приборов

Сборка — завершающий этап технологического процесса изготовления оптико-механических приборов, задачей которого является получение из комплекта оптических, механических, электрорадиотехнических и других деталей и узлов путем их соединения законченного изделия, удовлетворяющего всем установленным на него требованиям технических условий при наименьшей его себестоимости.

Теория размерных цепей является основой геометрической взаимозаменяемости при сборке машин и механизмов. Эта теория приложима также и к сборке оптических приборов, если дополнительно учитывать специфическое действие оптических деталей, входящих в размерные цепи в качестве звеньев, которые обладают особыми свойствами и не характеризуются одними только линейными и угловыми величинами.

**Краткие сведения из теории размерных цепей.** Размерной цепью называют совокупность размеров, расположенных по замкнутому контуру в определенной последовательности и связывающих поверхности и оси деталей, взаимное положение которых требуется определить.

В дальнейшем примем следующие обозначения:

$P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m$  — звенья размерной цепи от первого до последнего;

$P_\Delta$  — замыкающее звено, т. е. получающийся в результате сборки узла зазор или натяг;

$\overline{P}$  — компенсирующее звено;

$P^{нб}, P^{нм}$  — наибольший и наименьший возможные размеры действительного звена;

$\vec{P}, \check{P}$  — увеличивающее и уменьшающее звенья;

- $\delta_i$  — величина допуска звена  $P_i$ ;  
 $\delta_{cp}$  — средняя величина допуска, одинаковая для всех звеньев цепи;  
 $\delta_\Delta$  — допуск на замыкающее звено;  
 $\omega_i$  — величина поля рассеяния размеров звена  $P_i$ ;  
 $m$  — общее число звеньев цепи.

На рис. 2, а показан узел с шестерней, свободно сидящей на оси, которая установлена в буксах на скрепленных друг с другом

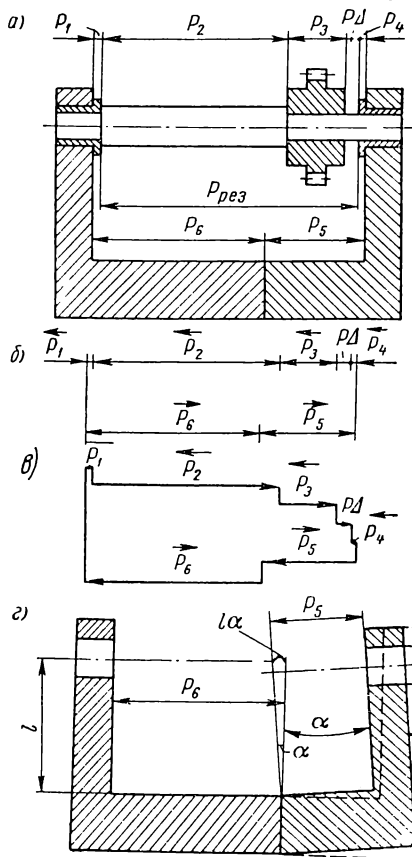


Рис 2. Размерная цепь, составленная из параллельных звеньев

кронштейнах. Основное требование к узлу состоит в том, чтобы шестерня свободно вращалась на оси, для чего между торцами шестерни и правой буксы должен быть гарантированный зазор  $P_\Delta$ , который является замыкающим звеном размерной цепи.

Размерная цепь изображена отдельно в виде параллельной (рис. 2, б) и в виде ступенчатой (рис. 2, в) схемы.

Используя основное свойство любой размерной цепи — ее замкнутость, — с учетом знаков звеньев можно написать

Используя основное свойство любой размерной цепи — ее замкнутость, — с учетом знаков звеньев можно написать

$$\sum_1^m P_i = 0. \quad (I.5)$$

В рассматриваемом случае имеется семь звеньев, считая и замыкающее звено  $P_\Delta$ , для которого получим

$$P_\Delta = (\vec{P}_5 + \vec{P}_6) - (\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3 + \vec{P}_4). \quad (I.6)$$

Таким образом, замыкающее звено равно разности сумм увеличивающих и уменьшающих звеньев.

Беря наибольшие возможные величины увеличивающих и наименьшие величины уменьшающих звеньев, найдем наибольшую величину замыкающего звена

$$P_\Delta^{нб} = (P_5^{нб} + P_6^{нб}) - (P_1^{нм} + P_2^{нм} + P_3^{нм} + P_4^{нм}). \quad (I.7)$$

Аналогично найдется наименьшая величина замыкающего звена, которая в данном случае не должна быть меньше нуля, так как по условию работы требуется гарантированный зазор:

$$P_{\Delta}^{нм} = (P_5^{нм} + P_6^{нм}) - (P_1^{нб} + P_2^{нб} + P_3^{нб} + P_4^{нб}) \geq 0. \quad (I.8)$$

Это и есть условие абсолютной собираемости всех узлов.

Разность двух последних величин даст величину поля рассеяния замыкающего звена

$$\omega_{\Delta} = P_{\Delta}^{нб} - P_{\Delta}^{нм} = \sum_1^{m-1} (P_i^{нб} - P_i^{нм}) = \sum_1^{m-1} \omega_i. \quad (I.9)$$

Аналогично отклонениям размеров звеньев суммируются допуски для них, поэтому допуск на замыкающее звено равен

$$\delta_{\Delta} = \sum_1^{m-1} \delta_i. \quad (I.10)$$

Пользуясь последней формулой, определим среднюю величину допуска, одинаковую для всех звеньев цепи,

$$\delta_{cp} = \frac{\delta_{\Delta}}{m-1}. \quad (I.11)$$

Для собираемости всех узлов при суммировании отклонений по максимуму и минимуму должно быть выдержано условие

$$\omega_{\Delta} \leq \delta_{\Delta}. \quad (I.12)$$

При выполнении последних двух условий обеспечивается полная взаимозаменяемость деталей. Теория размерных цепей дана в работах [43; 44].

**Виды сборки приборов.** Взаимозаменяемостью деталей (узлов) называется их свойство занимать свои места в узле (приборе) без дополнительной обработки и выполнять при этом свои функции с соблюдением требований технических условий к работе данного узла (прибора).

На практике применяют различные методы обеспечения точности при сборке; соответствующие виды сборки приведены в табл. 2.

1. Сборка по принципу взаимозаменяемости основывается на том, что необходимая точность при сборке достигается простым соединением любых экземпляров деталей или узлов, составляющих изделие, без применения каких-либо искусственных мер для уменьшения ошибки замыкающего звена цепи. Это обеспечивается изготовлением размеров по допускам составляющих звеньев, рассчитанным по максимуму-минимуму.

Сборка, основанная на принципе полной взаимозаменяемости, наиболее производительна: она превращается в простое соединение деталей без всякой пригонки и контроля их взаимного

## Виды сборки, применяемые в оптическом приборостроении

1. Сборка по принципу взаи- мозаменяемости	полной	абсолютной	
		ограничен- ной	при сопряженных средствах контроля; при сопряженной обработке партии деталей
	неполной		
2. Сборка с подбором (селек- тивная)	групповым	с предварительной сортировкой и группировкой деталей в преде- лах равных интервалов поля до- пуска;  с группировкой деталей в пре- делах неравных интервалов с со- блюдением равенства количеств сопрягаемых деталей	
	индивидуальным	с подбором сопрягаемой детали путем предварительного обмера без последующего контроля;  с подбором сопрягаемой детали без обмера с последующим кон- тролем качества сопряжения	
3. Сборка с компенсацией	кон- струк- тивной	непрерывной (постоянной во времени, автоматической) за счет включения в размерную цепь упругого звена	
		единовре- менной	изменением физических свойств материала детали (показатели пре- ломления и др.);  изменением положения детали подвижкой на сборочной базе:  с помощью регулировоч- ного приспособления, отде- ляемого от прибора;  с помощью механизма, предусмотренного кон- струкцией самого прибора;  вручную;  подбором детали из на- бора (ступенчатый компен- сатор)

3. Сборка с компенсацией	технологической	результативным формообразованием сборочных баз	
		путем пригонки	результативной обработкой сборочных баз узла в сборе; обработкой деталей по индивидуальному паспорту; обработкой по месту; совместной обработкой сопряженных деталей

положения. Упрощается также и ремонт приборов, превращаясь в простую замену изношенных деталей или узлов новыми. Поэтому всегда желательна сборка приборов по принципу полной взаимозаменяемости.

Однако экономически этот принцип оправдывается лишь в небольшом числе случаев: или при широких допусках  $\delta_d$  на замыкающее звено, или при коротких размерных цепях, состоящих из трех-четырех звеньев; во всех остальных случаях при расчете по способу максимума-минимума допуски на изготовление деталей получаются чрезмерно жесткие, экономически не приемлемые или технически не выполнимые.

При ограниченной взаимозаменяемости возможность сборки без искусственных мер ограничена рамками данного завода или данной партии выпускаемых изделий.

В первом случае примером может служить взаимозаменяемость пары поверхностей склеиваемых друг с другом линз, которые обработаны под контролем парными пробными стеклами, сверенными с заводским набором образцовых пробных стекол. Во втором случае примером является обработка на настроенных станках многозаходных окулярных резьб в сопряженных свинчивающихся деталях.

При неполной взаимозаменяемости расчет допусков основан на вероятностном методе суммирования ошибок при заранее принятом проценте риска, т. е. проценте возможной несобираемости узлов. При таком расчете допуски на составляющие звенья несколько расширяются по сравнению с допусками, рассчитанными по максимуму-минимуму.

2. Сборка с подбором (селективная сборка) позволяет еще более расширить допуски на отдельные, особо ответственные звенья.

На рис. 3 сравнивается сопряжение вала и отверстия с использованием групповой селекции и по методу полной взаимозаменяемости. В последнем случае, например, зазор между поршнем



и цилиндром в партии изделий будет иметь отклонения от наибольшей величины  $P_{\Delta}^{нб}$  до наименьшей величины  $P_{\Delta}^{нм}$ , причем

$$P_{\Delta}^{нб} - P_{\Delta}^{нм} = \delta_s + \delta_o,$$

где  $\delta_s$  и  $\delta_o$  — величины поля допуска вала и отверстия.

После обмера и сортировки деталей по группам размеров в пределах, например, четверти поля допуска можно уменьшить отклонения зазора между сопрягаемыми цилиндрами и поршнями в 4 раза. Для этого следует соединять детали одноименных групп,

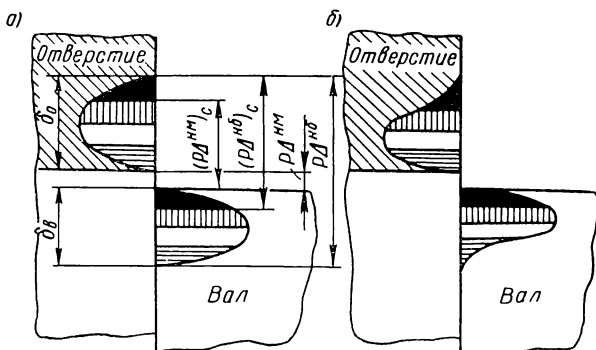


Рис. 3. Уменьшение зазора в сопряжении при использовании группового подбора

которые на рис. 3 выделены одинаковой штриховкой. Теперь для разности предельных зазоров получится

$$(P_{\Delta}^{нб})_c - (P_{\Delta}^{нм})_c = \frac{1}{4} (\delta_s + \delta_o).$$

Из рис. 3, а видно, что при несимметричных кривых распределения размеров отверстий и валов количество сопрягаемых деталей в одноименных группах будет различное, и часть из них не будет иметь парных себе контрдеталей. Этого можно избежать, если делить поле допуска не на равные интервалы, а так, чтобы в одноименных группах имелось одинаковое количество парных деталей (рис. 3, б).

Следует подчеркнуть, что при использовании селекции можно расширить допуски лишь на сопрягаемые геометрические размеры деталей, но допуски на дефекты формы (макροгеометрию) деталей — конусность, бочкообразность, овальность, огранку и др., а также на дефекты микрогеометрии становятся тем строже, чем на большее число групп рассортировываются детали.

Индивидуальный подбор применяется с предварительным обмером сопрягаемых деталей или же с выбором деталей вслепую и последующим контролем точности сопряжения. На первом прин-

ципе основана, например, работа автомата для сборки шарикоподшипников с вызовом шариков нужного диаметра<sup>1</sup>. Взаимозаменяемая и селективная сборка в оптическом приборостроении находят довольно ограниченное применение. Наиболее часто здесь применяется сборка с компенсацией двух видов — конструктивной и технологической.

3. Сборка с конструктивной компенсацией выполняется регулировкой непосредственно самого замыкающего звена или любого другого звена, связанного с ним общей размерной цепью.

Автоматическая, или непрерывная, регулировка в простейшем виде осуществляется с помощью какого-либо упругого звена. В примере на рис. 2, а для этого можно было бы правый подшипник оси шестеренки поместить в кронштейне по посадке движения и пружиной поджимать его правый торец к левому торцу шестеренки. Зазор

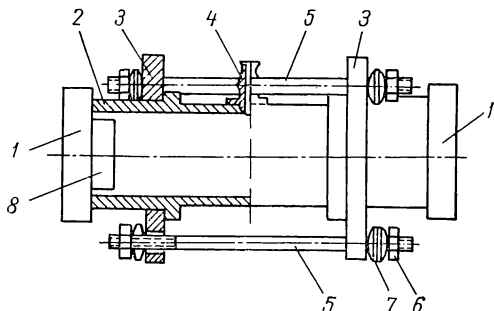


Рис. 4. Пример регулировки параллельности зеркал деформированием корпуса в интерферометре Фабри—Перо

но давление между торцами можно сделать небольшим, чтобы трение не препятствовало свободному вращению шестерни на оси.

В оптических приборах часто используется регулировка с помощью механизма, предусмотренного в конструкции самого прибора. Объективы в биноклях центрируют с помощью эксцентриковых оправ, в нивелирах с накладной трубой — с помощью трех винтов. На рис. 4 показано устройство для тонкой регулировки параллельности зеркал в интерферометре Фабри—Перо. Металлический корпус 2 в виде полого цилиндра снабжен с обеих сторон обоймами 3, соединенными стяжками 5 на гайках 6 с шайбами 7. К полированным торцам корпуса на оптическом контакте с обоих концов установлены зеркала, состоящие из двух плоских пластин 1 и 8, которые соединены друг с другом также оптическим контактом. Параллельность установки пластин окончательно регулируется гнущим всег корпуса посредством стяжек.

В интерферометре используется также особый прием компенсации — не подвижкой элементов, а изменением их физических свойств. Для регулировки разности хода в интерферирующих пучках через патрубок 4 откачивают или нагнетают воздух, изменяя давление внутри трубы и показатель преломления.

<sup>1</sup> В. М. Ковани и А. А. Кохтев. Сборка в машиностроении. М., АН СССР, 1960, с. 66.

Деформирование деталей для компенсации ошибок используется при юстировке оптических приборов довольно редко. Наибольшее применение при заводской сборке и юстировке оптических приборов нашли подвижки деталей на сборочных базах, в этих случаях не полностью определяющих взаиморасположение деталей и узлов. Линзовые детали имеют продольные подвижки для фокусировки изображения, для устранения параллакса сеток и для изменения масштаба изображения. Зеркально-призмённые детали имеют сдвиги или повороты на сборочных базах, используемые для центрирования оптических систем, для устранения наклонов изображения и т. д. Эти подвижки, если они не очень тонкие, выполняются вручную, после чего детали закрепляются в правильном положении. Для выполнения тонких подвижек деталей при сборке, например некоторых призмённых узлов при склейке, используются специальные приспособления, которые после юстировки и закрепления деталей в приборе отделяются от изделия. Так, например, некоторые бинокли французского производства не имеют никаких устройств для юстировки параллельности оптических осей трубок. Эта операция выполняется сдвигами и разворотами призм оборачивающей системы Малафеева 1-го рода на мостике с последующей загипсовкой их в корпусе. Этим обеспечивается высокая надежность сохранения юстировки биноклей при эксплуатации, но ремонт их затруднен.

При склейке сложных и ответственных призмённых блоков также широко используются различные цеховые контрольно-юстировочные приспособления, позволяющие взаимно перемещать и непрерывно контролировать отдельные призмы, а затем и фиксировать их правильное взаиморасположение до окончательного скрепления призм. В последнее время все чаще применяется такой способ юстировки узлов с последующей склейкой деталей.

При сборке оптических приборов используются также ступенчатые компенсаторы. Например, при устранении параллакса сетки применяют прокладные кольца, которые подбирают из набора колец разной толщины.

Сборка с использованием технологических компенсаторов, т. е. различных видов обработки сопрягаемых деталей и целых узлов в сборе для достижения нужной точности их взаимоположения, также широко применяется в оптическом приборостроении.

Результативной обработкой узла в сборе можно значительно сократить размерную цепь. Если, например, результативно обработать узел, изображенный на рис. 2, так, чтобы выдержать заданный размер  $P_{рез}$  между торцами подшипников, то сразу исключатся из цепи четыре размера  $P_1$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  и  $P_6$ , и цепь укоротится на три звена. Важно еще и то, что при такой обработке узла в сборе одновременно исключаются также ошибки сборочной базы, если последняя обеспечивает полную определенность взаиморасполо-

жения соединяемых деталей. На рис. 2, *г* показано, что при наклоне на угол  $\alpha$  правого кронштейна за счет ошибок сборочной базы появится погрешность в размерной цепи величины  $l\alpha$ , где  $l$  — расстояние от сборочной базы до замыкающего звена цепи  $P_{\Delta}$ . При результативной обработке погрешность  $l\alpha$  будет исключена.

Примером использования результативной обработки в оптическом приборостроении может служить обработка сборочных баз оправ линз при сборке объективов по методу В. П. Линника. При этом методе обычная последовательность переходов, принятая при центрировании линз в оправе, заменяется обратной; вначале линзу закрепляют в оправе, затем оптическую ось линзы совмещают с осью шпинделя станка с помощью специального центрировочного патрона и обрабатывают сборочные базы оправы — опорные торцы и наружный диаметр. Размерная цепь при этом сильно сокращается, точность центрирования линзы в оправе повышается. На рис. 5 схематически изображена линза 1 в оправе 2, которая навинчена на оправку 3 центрировочного патрона.

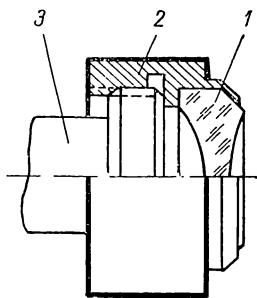


Рис. 5. Результативная обработка сборочных баз оправы линзы от оптической оси и вершин линзы

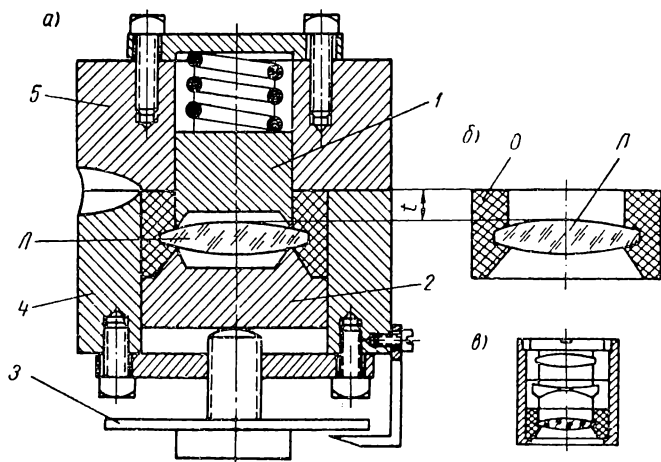


Рис. 6. Результативное формообразование сборочных баз оправы линзы

Жирными линиями отмечены обрабатываемые базовые поверхности оправы — два опорных торца и наружная поверхность.

Интересен вариант результативного формообразования сборочных баз оправы с одновременным центрированием и закреплением в ней линзы. В приспособлении на рис. 6, *а* плунжеры 1 и 2

с кольцевыми ножами автоматически центрируют линзу  $L$ . С помощью отсчетного винта  $З$  устанавливается заданное расстояние  $t$  от вершины линзы  $L$  до опорного торца оправы  $O$  (рис. 6, б). Через отверстие в корпусе, состоящем из двух деталей 4 и 5, пространство между линзой  $L$  и деталями 4 и 5 заполняется жидким пластиком, который при затвердевании превращается в оправу линзы, входящую в систему фотообъектива (рис. 6, в).

При обработке по месту как бы обрабатывается само замыкающее звено, например, на рис. 2 при работе по этому методу можно было бы подрезать торец шестеренки, если при сборке узла не получился зазор  $P_{\Delta}$ . Подрезка опорного торца объективов при установке изображения на резкость — пример наиболее распространенной обработки по месту в оптических приборах.

При сборке сложных и ответственных фотообъективов используется сборка с обработкой оправ по паспорту. Для компенсации отклонения констант оптических стекол, а также погрешностей изготовления линз по толщине производится комплектовка линз с учетом влияния этих ошибок на аберрации объектива. Для получения предписанного качества изображения в паспорте объектива указываются скорректированные воздушные промежутки, которые и необходимо выдержать при подрезке оправ на станке в процессе сборки.

Совместная обработка сопряженных деталей применяется для пригонки пар движения сложного профиля. Примерами могут служить прикатка шестерен с целью получить более плавное зацепление, шлифовка многозаходных окулярных резьб для получения плавного хода.

Выбор наиболее приемлемого вида сборки делается с учетом требований технических условий на прибор в отношении его точности и надежности при эксплуатации; серийности выпуска приборов; экономических соображений, характеризующих себестоимость изготовления и сборки прибора, его ремонтоспособность при эксплуатации.

Сменные узлы, такие, как окуляры микроскопов, микро- и фотообъективы, фотокассеты и др., безусловно, должны быть взаимозаменяемы.

Узлы и приборы, в которых требуется высокая точность сборки и надежность ее сохранения, лучше юстировать технологическими пригонками, а не регулированием с помощью винтов и других устройств.

Для заводских юстировок можно использовать и технологические, и конструктивные компенсаторы, для эксплуатационных выверок — очевидно, только конструктивные.

Рассмотрим несколько практических примеров.

Наиболее строгие допуски задаются на самые ответственные узлы. Например, фронтальные линзы микрообъективов должны быть весьма точно центрированы в своих оправках, расстояние от

опорного торца оправы до вершин линз должно быть строго равно заданному. На рис. 7, а показана фронтальная линза серийного микрообъектива  $90 \times 1,25$  в оправе. Допуск на децентрировку (наклон) первой плоской поверхности составляет десятки секунд угла, что при диаметре линзы  $1,5 \text{ мм}$  соответствует торцевому биению всего в десятки доли микрометра. Допуск на децентрировку второй полусферической поверхности составляет несколько микрометров, а допуск на расстояние от ее вершины до опорного торца оправы  $\pm 0,01 \text{ мм}$ . Столь строгие допуски на заводе выдерживаются расточкой конусного отверстия на прецизионном ножном центрировочном станке. Оправа базовой поверхностью  $\varnothing 13C$  закрепляется в цанговом патроне с упором на верхний торец. Расстояние  $5 \pm 0,01$  в процессе расточки многократно промеряют глубиномером, на конце измерительного щупа которого приклеена такая же фронтальная линза, под какую производится расточка конусного отверстия в оправе. Центрирование задней сферической поверхности линзы обеспечивается в этом отверстии автоматически, а плоская поверхность перед закреплением линзы должна быть установлена перпендикулярно оси шпинделя станка. Таким образом, здесь применяются пригонка по месту при расточке конусного отверстия по глубине и подвижки на сборочной базе — наклоны линзы в этом отверстии — при ее центрировании в оправе.

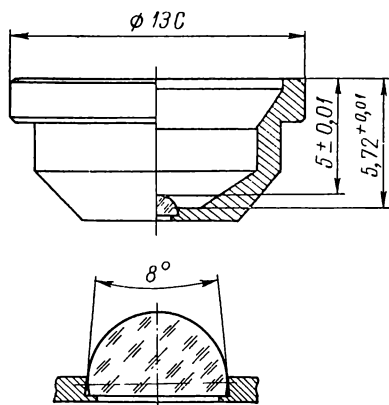


Рис. 7. Центрирование фронтальной линзы микрообъектива в оправе

Ответственные детали и узлы оптических приборов в течение длительного времени должны надежно сохранять свое взаимоположение. Поэтому их юстировку выполняют не с помощью подвижек винтами, а путем тонкой подгонки (припиловки, шлифовки сборочных баз).

Акад. Д. С. Рождественский отмечает, например, что когда регулировку зеркал интерферометра винтами заменили подгонкой высоты их опорных выступов, юстировка прибора стала неизменной, а до этого она постоянно нарушалась.

Время, затраченное на более трудоемкую подгонку выступов подполированием, окупилось при работе с прибором, так как отпала необходимость в повторных выверках интерферометра перед работой <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Д. С. Рождественский. Работы по аномальной дисперсии в парах металлов. М., АН СССР, 1951, с. 266.

### 3. Назначение юстировки, способы выполнения и типы юстировок

**Назначение юстировки.** Точность сборки зависит не только от точности изготовления деталей по геометрическим размерам, но также от определенности и точности взаимной базировки деталей.

Взаимное положение деталей в приборе определяется сборочными базами — реальными поверхностями, по которым сопрягаются соединяемые детали. При сборке неподвижных деталей положение каждой следующей присоединяемой детали в приборе, вообще говоря, будет вполне определено только в том случае, когда она лишена всех шести возможных степеней свободы, т. е. трех поворотов вокруг трех осей прямоугольной системы координат и трех сдвигов вдоль тех же осей.

Оптические детали имеют собственные оси, вращение вокруг которых или сдвиги вдоль которых являются недейственными, т. е. не влияющими на замыкающее звено размерной цепи. Положение деталей будет вполне определено, если лишить их только действенных подвижек, т. е. поворотов и сдвигов, влияющих на рассматриваемые свойства и характеристики прибора. Число действенных подвижек почти всегда меньше шести.

Во многих случаях для обеспечения точности сборки оптических приборов недостаточно только размерной (геометрической) точности изготовления и взаимобазирования сопрягаемых деталей и узлов, а требуется еще строгое соответствие физических характеристик оптических материалов, например показателей преломления, дисперсии, их стандартным значениям.

Во всех случаях, когда не обеспечивается полная геометрическая и физическая взаимозаменяемость деталей и узлов при сборке оптических приборов, приходится прибегать к юстировке, с помощью которой достигают правильного взаимодействия, взаимного расположения и относительного перемещения частей и систем юстируемых приборов. На практике юстировка необходима в тех случаях, когда:

- 1) заданы весьма строгие допуски на замыкающее звено;
- 2) встречаются длинные размерные цепи;
- 3) в размерной цепи имеются звенья, отклонения которых превосходят допуск на замыкающее звено, вследствие чего решение размерной цепи по условию формулы (I. 12) невозможно;
- 4) сборочные базы не вполне определены или недостаточно точны;
- 5) в процессе эксплуатации недопустимо нарушается рабочее состояние прибора и требуется его выверка перед работой.

Примеры задания весьма строгих допусков на замыкающее звено были рассмотрены в конце предыдущего параграфа. Приведем примеры длинной размерной цепи. На рис. 8 схематически изображены половинки галилеевского и призмленного биноклей

с шарнирным соединением трубок. Ось вращения шарнира в обоих случаях является конструкторской базой ( $КБ$ ), параллельно которой должна быть установлена оптическая ось каждой из трубок. В первом приближении оптической осью трубки является прямая через центры  $O_1$  и  $O_2$  объектива и окуляра. В галилеевском бинокле (рис. 8, *а*) для выполнения указанного требования центры  $O_1$  и  $O_2$  должны лежать в общей плоскости, содержащей ось шарнира, и находиться на равных расстояниях от этой оси, т. е. должно быть выполнено условие о равенстве друг другу радиусов-векторов обоих центров от оси шарнира

$$\bar{\delta}_1 = \bar{\delta}_2.$$

В действительности это равенство не соблюдается точно: радиусы-векторы  $\bar{\delta}_1$  и  $\bar{\delta}_2$  не равны друг другу, а связаны соотношением

$$\bar{\delta}_2 = \bar{\delta}_1 + \bar{P}_\Delta,$$

где  $\bar{P}_\Delta$  — замыкающее звено трехзвенной размерной цепи.

В призмном бинокле (рис. 8, *б*) размерная цепь значительно длиннее, так как в нее включены две прямоугольные призмы оборачивающей системы Малафеева, действие которых показано звеньями  $\bar{P}_1$  и  $\bar{P}_2$ . На параллельность осей трубки и шарнира здесь влияют также ошибки изготовления и установки каждой призмы в отдельности и всей системы в целом. У каждой призмы имеются две ошибки изготовления — отклонение угла  $90^\circ$  от прямого и пирамидальность — и три действенных подвижки — продольное смещение призмы вдоль главного сечения и два поворота вокруг осей, параллельных главному сечению.

Допуск  $\delta_\Delta$  на замыкающее звено в формуле (I. 12) в данном случае относительно широкий: обычно в биноклях сдвиг центров окуляров (или объективов) из правильного положения допустим почти до 0,1 мм (см. п. 25). Такой величины допуск легко выдержать при изготовлении галилеевских биноклей, в которых параллельность осей трубок получается без регулировки. В призмных биноклях этот же допуск оказывается трудно выполнимым. Поэтому в их конструкции приходится предусматривать возможность осуществления двух юстировок; предварительной — грубой и окончательной — точной; первая выполняется подвижками призм, вторая — поперечными сдвигами объектива. Подробности даны в п. 25.

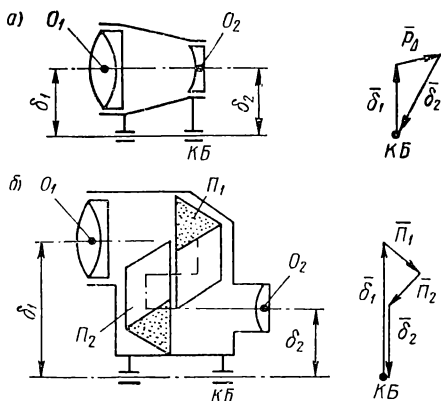


Рис. 8. Размерная цепь бинокля: *а* — галилеевского; *б* — призмного



В качестве примера размерной цепи, включающей звено с недопустимо большими отклонениями, на рис. 9 показан простой коллиматор, в котором требуется плоскость сетки  $C$  совместить с фокальной плоскостью объектива  $O$  с точностью до величины  $\Delta z$ . В данном случае имеем кратчайшую размерную цепь, которая состоит всего лишь из трех звеньев: расстояния  $l$  между опорными торцами трубки, на один из которых устанавливается своей задней плоской поверхностью объектив, на другой — плоскость сетки; заднего фокусного отрезка  $s'_{F'}$  объектива; расстояния  $\Delta z$  между задним фокусом объектива  $F'$  и плоскостью сетки (в номинале это расстояние — размер замыкающего звена  $P_{\Delta} = \Delta z$  — равно нулю).

В соответствии с формулой (I.6) можно написать

$$P_{\Delta} = \Delta z = l - s'_{F'}.$$

Для отклонений размеров замыкающего звена по формуле (I.9) найдем

$$\omega_{\Delta} = \omega_l + \omega_{s'_{F'}}.$$

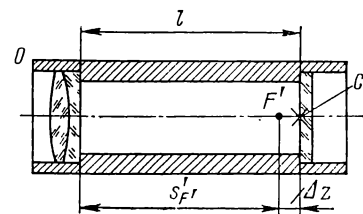


Рис. 9. Размерная цепь трубки с объективом и сеткой

В серийном производстве отклонения фокусного расстояния и фокусного отрезка от расчетной величины для ахроматического объектива из двух линз достигают плюс — минус одного процента, т. е.

$$\omega_{s'_{F'}} \leq 0,01 s'_{F'}.$$

Допуски же на неточность продольной установки сетки по отношению к фокусу объектива в большинстве практических случаев значительно — на один-два порядка — строже. Например, для объектива с фокусным расстоянием  $f' = 100 \text{ мм} \approx s'_{F'}$  и относительным отверстием  $d_p : f' = 1 : 5$  наибольшее возможное отклонение заднего фокусного отрезка в партии объективов при серийном производстве будет равно  $\omega_{s'_{F'}} = \pm 1 \text{ мм}$ , а допуск на ошибку установки сетки составит величину [17]

$$\Delta z = \frac{0,2}{u^2} = \frac{0,8}{(d_p : f')^2} = \frac{0,8}{(1 : 5)^2} = 20 \text{ мкм} = 0,02 \text{ мм}.$$

Таким образом, отклонения величины фокусного отрезка  $\omega_{s'_{F'}}$  в 50 раз превышают допуск  $\Delta z$  на неточность продольной установки сетки, вследствие чего условие формулы (I.12) не выполняется, и сборка трубки без компенсации невозможна.

Следовательно, в оптических системах с неизменной установкой сетки по отношению к объективу всегда следует предусматривать возможность изменения расстояния между ними в обоих направлениях для совмещения плоскости сетки с плоскостью изображения.

В оптических приборах часто встречаются сборочные базы,

которые не вполне определяют взаимоположение сопрягаемых деталей и узлов. Иногда это делается специально — для того, чтобы использовать подвижку на сборочной базе в качестве юстировочных подвижек. Пример неопределенной сборочной базы приведен на рис. 10. В операционном стереомикроскопе призмный блок, склеенный из трех призм 1, 2 и 3, устанавливается нижней шлифованной плоскостью призмы 2 на дно корпуса окулярной коробки 4, которая может поворачиваться на конической оси для изменения расстояния между окулярами. Сдвигами и поворотами блок призм должен быть установлен так, чтобы изображение оси вращения через призмы совпало с осью окуляра 5, после чего призмный блок закрепляется. Только при выполнении указанного условия при повороте окулярной коробки не изменяется направление выходящих пучков лучей, что и требуется в бинокулярных системах.

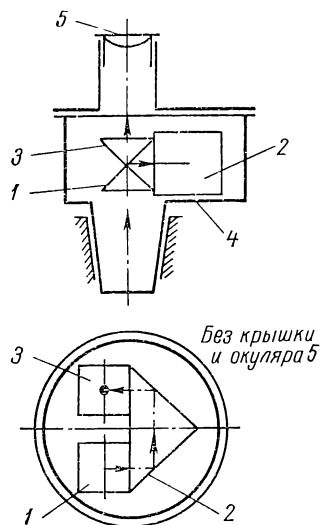


Рис. 10. Пример сборочной базы, не полностью определяющей положение призмного блока в узле

Встречаются и такие случаи, когда точность сборочной базы недостаточна для того, чтобы обеспечить взаимоположение сопрягаемых частей прибора в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями. В этих случаях также неизбежна юстировка.

**Способы юстировки и контроля при сборке оптических приборов.** Любая юстировка узла или прибора выполняется в три этапа.

1. Контроль, т. е. выявление в результате измерения или наблюдения тех ошибок или дефектов, которые подлежат устранению при юстировке.

2. Собственно юстировка, т. е. устранение в наиболее целесообразной последовательности выявленных ошибок и дефектов соответствующими юстировочными подвижками деталей или изменением их физических свойств.

3. Закрепление деталей и фиксация правильного их взаимоположения, достигнутого в результате юстировки.

Эти три взаимосвязанные этапа в совокупности и следует назвать ю с т и р о в к о й. При контроле в процессе юстировки применяются следующие основные методы выявления ошибок: сравнение наблюдаемых результатов с эталоном, образцом или с результатами теоретического расчета;

изменение положения узла или прибора, приводящее к перемене знака ошибки;

включение сменных или смещение подвижных узлов и сравнение полученного результата с тем, который был зафиксирован до этого включения или смещения узлов;

совокупный контроль нескольких одноименных приборов в различных сочетаниях, в результате чего получается система уравнений, из которой можно найти ошибки каждого из испытываемых приборов.

Для контроля используются естественные и искусственные эталоны. Естественными эталонами, например, являются: горизонтальная поверхность неподвижной жидкости, видимый морской горизонт, расстояние до астрономических объектов — Луны, Солнца, звезд — или до далеких земных предметов, известные углы между звездами, длины волн отдельных спектральных линий и т. д.

К искусственным эталонам относятся: нитяной отвес, уровни жидкостные, аттестованные пробные стекла, шкалы, лимбы, пластинки, призмы и угольники, различные коллиматоры, всевозможные образцовые узлы, например объективы.

Коллиматоры и другие искусственные эталоны особенно широко используются при цеховой юстировке угломерных, бинокулярных и других приборов.

Образцы применяются, например, при контроле качества изображения ответственных микрообъективов, которые сравниваются с образцовым объективом, имеющим предельно допустимые дефекты изображения. При отсутствии образцового объектива качество изображения точки, даваемого испытываемым объективом, сравнивают с дифракционной картиной точки, вид которой известен из результатов теоретического расчета.

Качество изображения оптических систем по полю зрения оценивается различными методами — сравнением величин измеренных аберраций с допущенными по расчету, измерением разрешающей способности в разных точках поля зрения, сравнением пробных снимков, полученных при различных условиях съемки, и т. д.

При юстировке измерительных приборов в качестве эталонов часто используют шкалы, микрометрические винты и другие отсчетные устройства самого испытываемого прибора.

Многие приемы контроля основаны на том, что изменение положения узла или прибора на некотором стабильном основании, например, поворот его на пол-оборота вокруг неподвижной оси вращения, перекидка с поворотом на плоскости устойчивой плиты, изменяет знак ошибки. Известны следующие примеры таких приемов:

контроль центрировки линз и объективов вращением их на шпинделе прецизионного станка, в результате чего ошибки центрирования удваиваются;

выявление коллимационной ошибки визирной трубы теодолита или гониометра поворотом на собственной оси вращения, в резуль-

тате чего эта ошибка — неперпендикулярность визирной оси к оси вращения — также удваивается;

выявление неотвесности вертикальной оси вращения теодолита или нивелира с помощью скрепленного с ней точного уровня поворотом инструментов вокруг этой оси.

Следует отметить, что не все ошибки при повороте прибора меняют знак на обратный, и такие ошибки не могут быть выявлены.

На рис. 11 схематически показана визирная труба  $T$  на стойке, закрепленная на плоской линейке  $L$  с ребром  $P$ . Визирная ось трубы  $T$  с большой точностью должна быть параллельна опорной плоскости линейки  $L$  и ее ребру  $P$ .

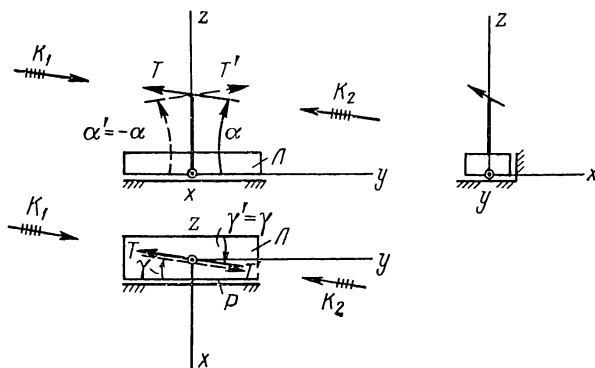


Рис. 11. Влияние поворота визирной трубы на изменение знака непараллельности визирной оси к базам опорной линейки

Предположим, что это требование не выполнено, в результате чего визирная ось трубы наклонена на угол  $\alpha$  к опорной плоскости линейки  $L$  в вертикальной плоскости  $yz$  и развернута на угол  $\gamma$  к ребру  $P$  линейки в горизонтальной плоскости  $xy$ .

На рис. 11 штриховыми линиями показана труба  $T'$  после ее поворота на  $180^\circ$  в горизонтальной плоскости  $xy$ , т. е. вокруг оси  $z$ . Видно, что угол  $\alpha'$  при этом повороте изменил знак, а знак угла  $\gamma'$  сохранился. Обозначив направление визирной оси трубы  $T$  единичным вектором  $\bar{A}$ , напомним через его составляющие по неподвижным осям координат  $xyz$ :

а) в исходном положении трубы

$$\bar{A} = A_x \bar{i} + A_y \bar{j} + A_z \bar{k};$$

б) после поворота трубы вокруг оси  $z$  на  $180^\circ$

$$\bar{A}' = A'_x \bar{i} + \bar{A}'_y \bar{j} + A'_z \bar{k} = -A_x \bar{i} - A_y \bar{j} + A_z \bar{k}.$$

Для тангенсов углов  $\alpha'$  и  $\gamma'$  получим

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{A'_z}{A'_y} = \frac{A_z}{-A_y} = -\operatorname{tg} \alpha; \quad \operatorname{tg} \gamma' = \frac{A'_x}{A'_y} = \frac{A_x}{A_y} = \operatorname{tg} \gamma.$$

При повороте трубы на плоскости  $xu$  меняются знаки только у горизонтальных составляющих орта визирной оси  $\bar{A}'$ , вследствие чего знак угла  $\alpha'$  при этом изменится, а знак угла  $\gamma'$  сохранится. Отсюда следует, что при повороте узла или прибора вокруг некоторой неподвижной оси (в нашем случае вокруг оси  $z$ ) меняется знак угла, лежащего в плоскости, параллельной оси вращения, и не меняется знак угла, лежащего в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Для контроля направления визирной оси трубы в обоих положениях используются два неподвижных встречных коллиматора  $K_1$  и  $K_2$ .

Ошибки сменных или подвижных узлов выявляются, если результаты, полученные после включения и перемещения узла, сравнивать с теми результатами, которые наблюдались до этого. Таким приемом можно, например, проверить центрировку сменных микрообъективов, закрепленных на общем револьверном диске (см. пример на стр. 8), или правильность юстировки систем перемены увеличения скачком или панкратических систем.

Погрешности и дефекты, наблюдаемые при контроле, устраняются при юстировке отдельно, поочередно. Поэтому важно выявить их также раздельно, т. е. «в чистом виде». Так, например, устраняют три основные ошибки теодолита — коллимационную ошибку  $k$  трубы, наклон  $l$  горизонтальной оси поворота трубы и неотвесность  $m$  вертикальной оси вращения инструмента.

Все эти ошибки вызывают систематические погрешности измерения горизонтальных углов, и при повороте теодолита на пол-оборота вокруг вертикальной оси можно было бы обнаружить их суммарное действие. Но это неудобно для юстировки, которая выполняется быстрее, если каждую ошибку выявить отдельно. Для этого пользуются особыми приемами разделения ошибок (см. п. 27).

Юстировка прибора может выполняться непосредственно на контрольно-юстировочной установке под непрерывным контролем, или же контроль может быть отделен, т. е. осуществлен перед юстировкой и после ее выполнения, а величина необходимой подстройки может быть найдена расчетом.

**Типы юстировок.** Если при контроле каждую ошибку удастся выявить в чистом виде, то удобнее всего и устранять эти ошибки независимо. Но это не всегда бывает возможно; тогда имеют дело с зависимой юстировкой.

Независимой юстировкой называют такую, при которой данную ошибку удастся устранить отдельно от остальных ошибок и без возникновения новых дефектов. Зависимой юстировкой называют такую, при которой в процессе устранения данной ошибки или нарушается сделанная ранее юстировка, или появляются новые ошибки.

Наиболее желательна независимая юстировка, так как она позволяет устранять каждую из ошибок отдельно и полностью

в строго намеченной последовательности, благодаря чему юстировочные операции легко нормируются во времени, могут быть разделены на независимые переходы, проще обеспечены контрольными средствами.

Зависимая юстировка выполняется методом последовательных приближений, а если используется одновременный комплексный контроль всех имеющихся дефектов, то возможно и одновременное их устранение. Центрировочные диоптровые трубки, например, позволяют замечать все три действенные подвижки плоского зеркала в сходящемся ходе лучей, т. е. оба поворота его вокруг двух осей, перпендикулярных нормали зеркала, и смещение зеркала вдоль его нормали. Автоколлимационная же трубка выявляет одни лишь повороты зеркала. Метод контроля с диоптровыми трубками, как более комплексный, предпочтительнее использовать при зависимой юстировке зеркал в сходящемся ходе лучей (см. п. 23).

Рассмотрим примеры зависимой и независимой юстировок. На рис. 12 схематически изображен объектив, состоящий из двух компонентов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , между которыми в одном случае помещено плоское зеркало  $З$  (рис. 12, а), а в другом случае — угловое зеркало  $У$ , состоящее из двух плоских зеркал  $1$  и  $2$  (рис. 12, б). В обоих случаях ось системы изломана под прямым углом.

Для получения высокого качества изображения система должна быть хорошо центрирована: оптические оси обоих компонентов должны быть совмещены друг с другом с большой точностью, а расстояние между ними должно равняться расчетному.

На рис. 12 штриховыми линиями построены зеркала в сдвинутом положении. Видно, что при смещении плоского зеркала  $З$  в положение  $З'$  нарушаются сразу оба требования — появляется децентрировка и одновременно изменяется расстояние между компонентами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . При смещении углового зеркала  $У$  вдоль биссектрисы угла между зеркалами  $1$  и  $2$  в положение  $У'$  децентрировка линзовой системы не возникает, изменяется лишь расстояние между линзами. Если угловое зеркало сдвинуть в направлении, перпендикулярном к биссектрисе, то появится только децентрировка системы, а расстояние между линзами не изменится.

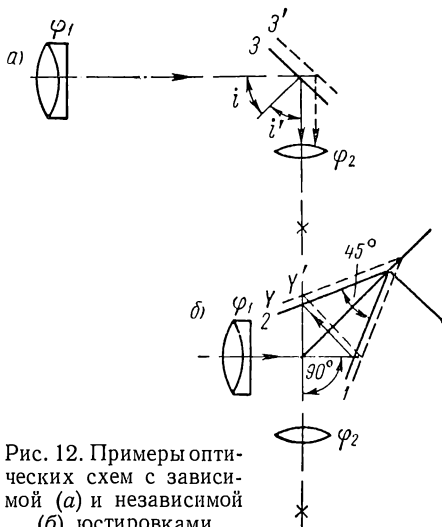


Рис. 12. Примеры оптических схем с зависимой (а) и независимой (б) юстировками

Следовательно, схему объектива по рис. 12, б можно юстировать независимыми смещениями углового зеркала  $Y$ . Смещения плоского зеркала в схеме по рис. 12, а являются зависимыми.

У большинства оптических приборов в процессе эксплуатации или при транспортировке нарушается их основная юстировка, вследствие чего необходима их периодическая поверка и многократная повторная юстировка — выверка прибора перед работой. Это относится в первую очередь к точным приборам — оптическим дальномерам, интерферометрам, астрономическим и геодезическим приборам, а также к цеховым приборам для измерения длин и углов.

Из изложенного следует, что подавляющее число оптических приборов нуждается в юстировке при сборке на заводах, а многие приборы требуют еще и выверки в процессе эксплуатации. Таким образом, юстировочные операции являются основными при изготовлении приборов и при работе с ними.

**Оптические схемы с неизменной юстировкой.** В современных приборах все чаще используются так называемые нерасстраивающиеся или малорасстраивающиеся оптические схемы. Такие схемы обладают как бы неизменной (стабильной или инвариантной) юстировкой и имеют большую перспективность.

Неизменяемость юстировки оптических схем обеспечивается тем, что возможные подвижки системы в целом или отдельных ее основных элементов стремятся сделать недейственными, т. е. не влияющими на заданные свойства прибора. Создание таких схем требует большой изобретательской работы.

Пример системы с неизменной юстировкой приведен на рис. 13. В оптических дальномерах одной из основных частей является биаксиальный коллиматор. Главное его назначение состоит в том, чтобы обеспечить строгую параллельность визирных осей двух ветвей, имеющих самостоятельные объективы.

Вариант первый по рис. 13, а представляет собой лишь принципиальную схему трубы, которая состоит из двух объективов  $F_1$  и  $F_2$  и общего перекрестия сетки  $C$ , совмещенного с их фокусами  $F'_1$  и  $F'_2$ .

Если перекрестие  $C$  находится на прямой, соединяющей задние узловые точки  $K_1$  и  $K_2$  обоих объективов, то визирные оси или выходящие пучки лучей параллельны друг другу. Сдвиг сетки в точку  $C'$  на величину  $e$  за счет, например, прогиба трубы вызывает наклон визирных осей на углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ; непараллельность выходящих пучков равна сумме этих углов, т. е.

$$\Delta\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = e \left( \frac{1}{a'_1} + \frac{1}{a'_2} \right),$$

где  $a'_1$  и  $a'_2$  — расстояния между сеткой  $C'$  и задними узловыми точками объективов.

Вариант второй по рис. 13, б представляет собой схему биаксиального коллиматора, состоящего из двух объективов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и двух перекрестий сеток  $C_1$  и  $C_2$ , которые, предполагаем, совмещены с их задними узловыми точками  $K_2$  и  $K_1$  соответственно и скреплены с объективами:  $C_1$  с  $\varphi_2$  и  $C_2$  с  $\varphi_1$ . Если, например, объектив  $\varphi_2$  совместно с сеткой  $C_1$  сдвинется на величину  $e = \overline{K_2 K'_2} = \overline{C_1 C'_1}$  поперек оси в положение, показанное штрихо-

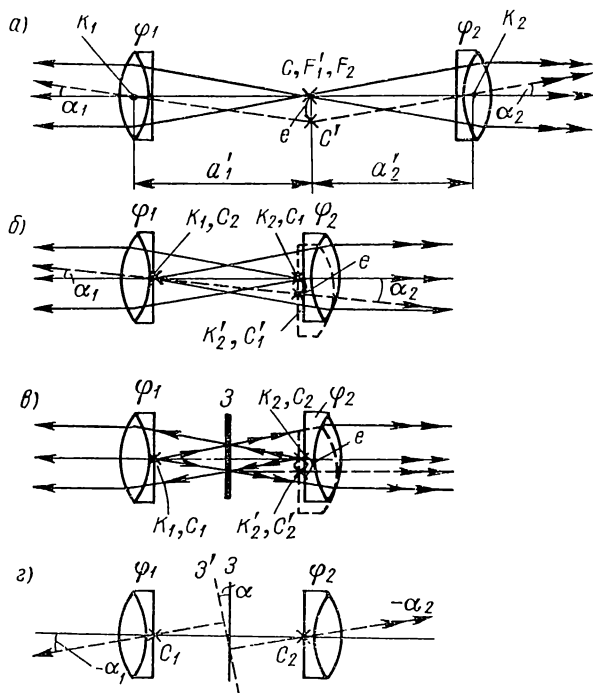


Рис. 13. Пример системы с неизменной юстировкой — биаксиальный коллиматор

выми линиями, то, как видно из рисунка, направление визирных осей изменится, но параллельность визирных осей биаксиального коллиматора почти не нарушится. Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  несколько отличаются друг от друга, если различны расстояния между одноименными сетками и задними узловыми точками, т. е. если  $\overline{C_1 K_1} - \overline{C_2 K_2} = \Delta a$ . Эта разница расстояний даст малую ошибку второго порядка, которая и равна разности углов  $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = \frac{e \Delta a}{f'^2}$ , где  $f'$  — фокусное расстояние объективов.

В третьем варианте (рис. 13, в) последний недостаток устраняется тем, что между объективами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  поставлено плоское двухстороннее зеркало  $Z$ . На рис. 13, в показано, что сдвиг



объектива поперек оси не изменяет направления выходящих лучей. Из рис. 13, а видно, что наклон зеркала 3 вызывает наклон обеих визирных осей на одинаковый угол  $\alpha$ , в результате чего выходящие лучи остаются взаимно параллельными, даже если фокусные расстояния объективов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  отличаются друг от друга.

Приборы, построенные на основе нерасстраивающихся оптических схем, более надежны и производительны в эксплуатации. Это видно на примере современных геодезических приборов — нивелиров с неизменным направлением визирной оси и других.

В оптических приборах применяются также и автоматические компенсаторы для исключения ошибок, возникающих в процессе эксплуатации, например, за счет изменения температуры и давления среды, из-за нестабильности основания и т. д.

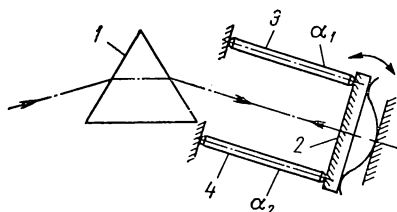


Рис. 14. Температурный компенсатор призмного монохроматора

На рис. 14 показано схематически устройство температурного компенсатора призмного монохроматора. Диспергирующая призма 1 работает в атоколлимационной схеме с зеркалом 2. При изменении температуры среды, как известно, изменяется и показатель преломления материала призмы,

в результате чего смещается ноль градуировочной кривой. Для компенсации этой ошибки применены два стержня 3 и 4, изготовленные из материалов с различными коэффициентами линейного расширения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , причем  $\alpha_2 > \alpha_1$ . Длина стержней и расстояние между ними подобраны так, что они, упираясь концами в зеркало 2, поворачивают его на нужный угол компенсации.

Использование нерасстраивающихся оптических схем, а также автоматических компенсаторов в оптическом приборостроении весьма перспективно.

#### 4. Основные юстировочные задачи и методы их аналитического решения

Множество разнообразных юстировочных вопросов и задач возникает перед конструктором, технологом и исследователем на всех стадиях разработки, изготовления, контроля и исследования оптических приборов. От правильного, полного и быстрого решения юстировочных вопросов зависят качество выпускаемых приборов, их себестоимость, точность и надежность в работе. Поэтому вопросы юстировки относятся к числу основных.

Уже при разработке и выборе принципиальной схемы проектируемого прибора конструктору необходимо оценить достоинства и недостатки отдельных вариантов схем, для чего нужно иметь хотя бы общее представление о степени сложности юстировки будущего прибора и о влиянии условий эксплуатации на его работу.

При разработке конструктивной схемы прибора необходимо глубоко продумать его юстировку и контроль, предусмотреть соответствующие регулировочные или иные компенсаторные устройства, а также выверочные устройства.

Если нет аналогичного образца прибора, то указанные юстировочные задачи могут быть решены лишь аналитическим путем.

При изготовлении, особенно при сборке, опытного образца прибора возникают новые, подчас непредвиденные юстировочные задачи, которые также приходится решать аналитически, хотя здесь правильность полученных выводов можно уже проверить пробной юстировкой прибора.

При эксплуатации прибора необходимо иметь совершенно ясное понимание его выверки, которая должна быть строго регламентирована в отношении приемов проверок, последовательности устранения погрешностей и точности контроля.

Трудность задач возрастает с увеличением сложности конструктивных схем и с повышением ответственности приборов, что как раз и является характерным для развития современного оптического приборостроения.

Не имеется общей методики решения всех задач, возникающих при юстировке оптических приборов. Более других развиты способы аналитического решения общих типовых задач, возникающих на первой стадии юстировки приборов, которую условно можно назвать геометрической юстировкой. Задача геометрической юстировки состоит в том, чтобы установить основные оптические детали и узлы <sup>1</sup> в правильное взаимное положение. Следующая стадия юстировки, которую можно условно назвать специальной юстировкой, имеет целью приведение прибора в рабочее состояние с тем, чтобы он удовлетворял всем требованиям технических условий.

Геометрическая юстировка включает решение трех основных групп задач:

фокусировку изображения, устранение параллакса шкал и сеток, регулировку масштаба изображения или увеличения оптической системы;

центрирование узлов системы относительно заданных направлений или осей;

ориентирование изображения или траектории его перемещения в поле зрения системы относительно заданного направления или заданной линии.

Задачи первой группы решаются в основном изменением расстояний между силовыми элементами <sup>2</sup> оптической системы путем их продольных подвижек. Задачи второй группы решаются с помощью поперечных сдвигов силовых элементов или с помощью

---

<sup>1</sup> Основными деталями и узлами будем называть те, которые влияют на заданные свойства или характеристики узла или прибора.

<sup>2</sup> Силовыми элементами будем называть все неафокальные системы, а также афокальные системы с увеличением, не равным единице.

сдвигов и наклонов отражающих поверхностей вокруг поперечных осей. Задачи третьей группы решаются главным образом путем поворота зеркально-призмennых систем вокруг продольных осей.

Важнейшее значение при сборке приборов имеет и задача обеспечения высокого качества изображения оптической системы. Эта задача не является чисто геометрической, так как качество изображения зависит также и от свойств оптических материалов деталей.

Для полного решения оптической юстировочной задачи необходимо выполнить следующее.

1. На основании изучения устройства прибора, его назначения и условий работы, а также технических условий на него строго сформулировать юстировочную задачу, т. е. выделить свойства или характеристики прибора, на которые могут влиять ошибки деталей и узлов, выявить основные конструкторские и юстировочные базы деталей, узлов и прибора в целом и установить требования к точности их взаимоориентирования.

2. Рассмотреть возможные подвижки основных оптических элементов, деталей и узлов; найти величины передаточных коэффициентов их действительных подвижек — смещений и поворотов, влияющих на данные свойства и характеристики прибора; выбрать вид сборки, рассмотрев в первую очередь возможность сборки узла или прибора по принципу взаимозаменяемости. При неизбежности использования сборки с компенсаторами следует рассмотреть возможность полной или частичной взаимокompенсации влияния действительных подвижек деталей и узлов на данные свойства прибора и наметить минимальное, но достаточное число юстировочных подвижек, желательно независимого действия.

3. Предложить способ контроля, позволяющий прямо или косвенно выявить, желательно в «чистом виде», погрешности, подлежащие устранению в процессе юстировки.

4. Разработать методику юстировки, т. е. наметить рациональную последовательность и способы устранения погрешностей с заданной точностью и в ожидаемых пределах.

5. Предусмотреть надежную фиксацию юстируемых деталей и узлов в установленном правильном положении, исключив возможность появления при этом нежелательных подвижек деталей и деформаций рабочих поверхностей.

6. Продумать вопрос о сохранении, или (при его невозможности) о непрерывном поддержании, или, наконец, о периодическом восстановлении рабочего состояния прибора в условиях эксплуатации. Соответственно в конструктивной схеме прибора использовать оптические схемы с неизменной юстировкой, или ввести автоматические компенсаторы, или предусмотреть выверочные устройства, желательно также независимого действия.

Полное решение юстировочной задачи, как видно, представляет собой трудоемкий процесс, особенно при проектировании нового прибора, когда приходится рассматривать несколько воз-

можных вариантов его принципиальной схемы для выбора из них оптимального варианта. Однако нельзя жалеть труда на решение юстировочных вопросов, особенно в процессе разработки прибора, так как эти вопросы являются основными. Неполное или тем более неверное решение вопросов юстировки отрицательно сказывается как на изготовлении приборов, так и на их эксплуатации, что подтверждается многими примерами из практики.

В качестве простого примера рассмотрим юстировку оптической системы коллиматора, который состоит из трех узлов —

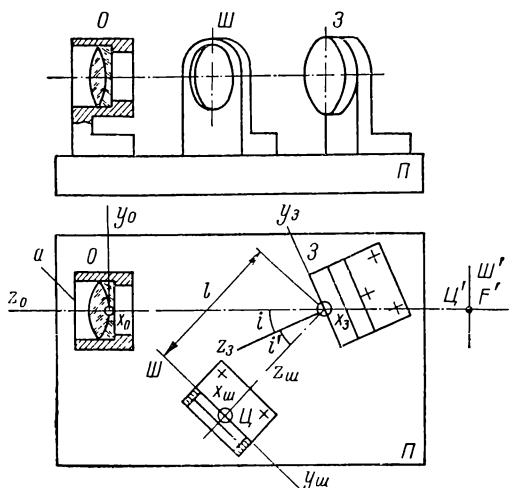


Рис. 15. Юстировка коллиматора из трех отдельных узлов — объектива, зеркала и шкалы

объектива  $O$ , плоского зеркала  $З$  и шкалы  $Ш$  (рис. 15). Все узлы закреплены в кронштейнах и установлены на плоской плите  $П$ . Нижние опорные плоскости кронштейнов и плоскость плиты являются сборочными базами узлов. Эти базы не вполне определяют взаимоположение объектива, зеркала и шкалы, так как кронштейны можно смещать и поворачивать на плите.

Цель юстировки состоит в том, чтобы найти правильное взаимоположение узлов и после закрепления их кронштейнов в установленном положении на плите получить изображение шкалы  $Ш$ , особенно ее центра  $Ц$ , за объективом в бесконечности. Для этого плоскость шкалы  $Ш$  должна быть совмещена с фокальной плоскостью объектива  $O$ , а центр  $Ц$  шкалы — с фокусом  $F'$ .

Для числовых расчетов положим, что объектив  $O$  имеет фокусное расстояние  $f' = 250$  мм, относительное отверстие  $1 : 5$ , диаметр шкалы  $d_{ш} = 60$  мм.

При аналитическом решении задачи будем придерживаться изложенного выше плана, состоящего из шести этапов.

Первый этап: формулирование задачи, выявление основных баз.

На рис. 15 показано номинальное взаимоположение объектива  $O$  и изображения шкалы  $Ш'$ , когда плоскость шкалы совпадает с фокальной плоскостью объектива, а центр шкалы — с фокусом  $F'$ , т. е. центр  $C$  лежит на оптической оси, где получается изображение наивысшего качества. Рассмотрев подвижки изображения шкалы  $Ш'$  в неподвижной системе осей  $x_0y_0z_0$ , связанных с объективом  $O$ , приходим к выводу, что пять подвижек шкалы из шести возможных в данном случае являются действенными, т. е. влияющими на основные требования к коллиматору. В самом деле, сдвиги шкалы поперек оптической оси объектива — вдоль оси  $x_0$  на величину  $\Delta x_0$  и вдоль оси  $y_0$  на величину  $\Delta y_0$  — непосредственно равны децентрировкам шкалы  $Ш'$  относительно оптической оси объектива, а смещение этой шкалы вдоль оси  $z_0$  на величину  $\Delta z_0$  — ее расфокусировке. Повороты шкалы вокруг осей  $x_0$  и  $y_0$  соответственно на малые углы  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  вызывают так называемый наклон плоскости изображения, т. е. непараллельность плоскости шкалы по отношению к фокальной плоскости объектива. Поворот шкалы вокруг оси  $z_0$  на угол  $\gamma_0$  не будет действенным, если предположить, что шкала имеет круговую симметрию, например представляет собой семейство концентрических окружностей.

Юстировочную задачу теперь можно сформулировать следующим образом:

- 1) центр шкалы  $C$  должен быть совмещен с фокальной плоскостью объектива  $O$  с точностью не ниже  $\Delta z_0 = \pm 0,02$  мм;
- 2) центр шкалы  $C$  должен быть совмещен с оптической осью объектива с точностью до нескольких десятых долей миллиметра;
- 3) плоскость делений шкалы  $Ш$  должна быть параллельна фокальной плоскости объектива с точностью не ниже  $\alpha_0 = \beta_0 = \pm 2,5'$ .

Допуски  $\Delta z_0$ ,  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  получены из условия, что нерезкость изображения центра и краевых точек шкалы при наблюдении из бесконечности не превосходит в волновой мере 0,1 мкм. Такой величины допуск принят проф. А. Н. Захарьевским в известной расчетной формуле [17]

$$\Delta z = \frac{0,2}{u^2} \text{ мкм.} \quad (\text{I.13})$$

В нашем случае апертурный угол пучка лучей  $u = 0,1$ , в результате чего и получается  $\Delta z_0 = 0,02$  мм.

Допуская и на краю шкалы расфокусировку  $\Delta z_0 = \pm 0,02$  мм, для допустимого угла наклона плоскости изображения найдем

$$\alpha_0 = \beta_0 = \frac{2\Delta z_0}{d_{\text{ш}}} 3440 \approx \pm 2,5'.$$

Допуск на сдвиг центра  $C$  шкалы с оптической оси объектива задан из того условия, что качество изображения вблизи оси на

расстоянии до нескольких миллиметров мало отличается от качества изображения на оси объектива.

Второй этап: анализ влияния действенных подвижек схемных деталей, возможности их взаимокompенсации; выбор вида сборки, определение числа и типа необходимых юстировочных компенсаторов.

Возможные подвижки каждого из трех узлов коллиматора рассмотрим в неподвижной системе координатных осей, определенным образом ориентированных к узлам при их номинальном положении. Подвижки объектива  $O$  — в системе  $x_0y_0z_0$ , третья ось  $z_0$  которой совмещена с оптической осью объектива; подвижки зеркала  $З$  — в системе  $x_3y_3z_3$ , ось  $z_3$  которой совмещена с нормалью отражающей плоскости в точке пересечения этой плоскости с оптической осью объектива; подвижки шкалы  $Ш$  — в системе  $x_{ш}y_{ш}z_{ш}$ , ось  $z_{ш}$  которой проходит через центр  $Ц$  шкалы перпендикулярно плоскости делений (рис. 15). Третьи оси всех координатных систем ( $z_0$ ,  $z_3$ ,  $z_{ш}$ ) направлены так, что вращение узлов вокруг этих осей не влияет на взаимоориентирование объектива и шкалы, т. е. является недейственным. При такой ориентировке осей получим наименьшее число действенных подвижек. Первые оси всех трех систем ( $x_0$ ,  $x_3$ ,  $x_{ш}$ ) перпендикулярны плоскости опорной плиты, а их вторые оси ( $y_0$ ,  $y_3$ ,  $y_{ш}$ ) параллельны этой плоскости.

Влияние подвижек схемных узлов на выполнение сформулированных выше трех требований к юстировке коллиматора рассмотрим с помощью табл. 3. Возникающие дефекты обозначим следующим образом:

дц 1 — децентрировка 1-го рода частей системы, т. е. в данном случае взаимный наклон объектива  $O$  и шкалы  $Ш$ , приводящий к наклону плоскости изображения;

дц 2 — децентрировка 2-го рода частей системы, т. е. поперечный сдвиг центра  $Ц$  шкалы относительно оптической оси объектива;

рф — расфокусировка изображения, т. е. смещение шкалы относительно фокуса  $F'$  объектива.

Недейственные подвижки будут отмечаться прочерком. Ошибками второго порядка малости будем пренебрегать.

Таким образом, объектив  $O$  и шкала  $Ш$  имеют по пять действенных подвижек, а плоское зеркало  $З$  — только три. Повороты вокруг третьей оси у всех узлов недейственны, что объясняется соответствующей ориентировкой осей  $z_0$ ,  $z_3$ ,  $z_{ш}$ .

Децентрировки 1 и 2-го рода отмечены индексами  $x$  или  $y$  в зависимости от того, вокруг какой из осей произошел взаимный наклон частей системы или сдвиг этих частей.

Из табл. 3 видно, что имеется избыточное число действенных подвижек, так как для правильного взаимоориентирования объектива  $O$  и шкалы  $Ш$  достаточно пяти или даже четырех подвижек,

Влияние действенных подвижек узлов коллиматора

Наименование схемных деталей и узлов	Возможные подвижки деталей и узлов					
	Смещения вдоль осей			Повороты вокруг осей		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
Объектив	дц $2x = \Delta x_0$	дц $2y = \Delta y_0$	рф $= \Delta z_0$	дц $1y = \alpha_0$ ; дц $2y = f'\alpha_0$	дц $1x = \beta_0$ ; дц $2x = f'\beta_0$	—
Зеркало	—	—	рф $= 2 \Delta z_3 \cos i$ ; дц $2x = 2 \Delta z_3 \sin i$	дц $1y = 2\alpha_3$ ; дц $2y = 2l\alpha_3$	дц $1x = 2\beta_3 \cos i$ ; дц $2x = 2l\beta_3 \cos i$	—
Шкала	дц $2x = \Delta x_{III}$	дц $2y = \Delta y_{III}$	рф $= \Delta z_{III}$	дц $1y = \alpha_{III}$	дц $1x = \beta_{III}$	—

если центрировка шкалы по высоте относительно оптической оси объектива обеспечивается технологически при расточке в кронштейнах посадочных отверстий для объектива и шкалы. Избыточное число подвижек говорит о том, что они могут взаимно компенсироваться.

Взаимозаменяемая сборка коллиматора в данном случае невозможна по ряду причин: допуски на замыкающие звенья малы, отклонения отдельных звеньев размерной цепи (здесь — заднего фокусного отрезка  $s'_{F'}$ ) чрезмерно велики; сборочные базы узлов неопределенны, так как они определяют взаимоположение узлов по высоте — вдоль оси  $z_0$ , но не определяют в плоскости  $y_0z_0$ .

В табл. 3 отмечены действенные подвижки и указаны передаточные отношения, т. е. найдена и количественная связь между возникающими частичными и первичными ошибками установки узлов. Влияние поворотов зеркала можно определить по формулам п. 9 или 10, в частности по формуле (III.9), а влияние смещения — по формулам (III.90) и (III.91).

Для сборки коллиматора любые два узла можно закрепить на плите и попытаться всю юстировку выполнить подвижками третьего узла. При этом возможны следующие три варианта:

- 1) закреплены объектив  $O$  и зеркало  $З$ ;
- 2) закреплены зеркало  $З$  и шкала  $Ш$ ;
- 3) закреплены объектив  $O$  и шкала  $Ш$ .

Первые два варианта являются как бы взаимобратными и почти не отличаются друг от друга. Третий вариант не позволяет решить задачу полностью подвижками одного только зеркала (см. пример на стр. 29). Подвижками плоского зеркала систему можно отцентрировать, но для фокусировки необходимы смещения объектива или шкалы вдоль третьих осей их координатных систем. Смещения объектива вдоль оси  $z_0$  или шкалы вдоль оси  $z_{ш}$  являются независимыми при фокусировке коллиматора. Но смещение зеркала  $З$  вдоль оси  $z_0$  будет зависимым: оно будет смещать изображение вдоль оптической оси объектива и одновременно сдвигать его поперек оси, так как при фокусировке коллиматора возникнет также децентрировка 2-го рода.

Следует иметь в виду, что для юстировки коллиматора по третьему варианту объектив  $O$  и шкалу  $Ш$  перед закреплением на плите необходимо установить так, чтобы их оси пересекались в общей точке, а для фокусировки шкалы предусмотреть продольное смещение объектива или самой шкалы.

В данном примере юстировочные подвижки целесообразно распределить между всеми тремя узлами следующим образом:

фокусировку коллиматора на бесконечность выполнить смещением объектива  $O$  вдоль оси  $z_0$ ;

центрировку шкалы  $Ш$  и установку ее перпендикулярно оптической оси объектива осуществить сдвигом шкалы вдоль оси  $y_{ш}$



и наклоном ее вокруг той же оси  $y_{ш}$ , а также поворотами зеркала вокруг оси  $x_z$  и наклонами его вокруг оси  $y_z$ .

Т р е т ь и й э т а п: выбор способа контроля. Юстировка представляет собой процесс взаимоориентирования баз — юстируемой базы по отношению к заданной конструкторской базе. В данном случае основными базами являются: у объектива  $O$  — оптическая ось и фокальная плоскость; у зеркала  $Z$  — отражающая плоскость; у шкалы  $Ш$  — плоскость делений шкалы и ее центр  $Ц$ .

Если базы зеркала и шкалы не требуют пояснений, то базы объектива необходимо рассмотреть несколько подробнее. Оптическая ось в идеальном случае есть геометрическое место центров кривизны всех оптических поверхностей системы. К реальной системе это понятие оптической оси, строго говоря, неприменимо, так как всегда имеется некоторая взаимная децентрировка ее поверхностей. Фокальная плоскость — место изображения бесконечно далеких точек пространства предметов, расположенных под различными углами к оси системы. Фокус системы — точка фокальной плоскости, лежащая на ее оптической оси.

В данном случае задача контроля состоит в том, чтобы сравнить положение плоскости материальной шкалы  $Ш$  с нематериальной фокальной плоскостью объектива  $O$  и положение центра  $Ц$  шкалы — с фокусом  $F'$  объектива.

Легко сравнить взаимоположение однородных по природе баз — материальной с материальной или оптической базы с оптической же. Последний случай имел бы место, например, тогда, когда совмещение шкалы  $Ш$  с фокальной плоскостью объектива коллиматора решили бы контролировать с помощью вспомогательной трубы, установленной на бесконечность. Критерием правильной юстировки коллиматора при таком способе контроля могли бы служить резкость изображения шкалы и отсутствие параллакса по всему полю зрения.

В рассматриваемом случае более удобен другой способ контроля, при котором, однако, требуется «материализация» оптических юстировочных баз. Для этого в процессе расточки отверстия под объектив подрезают за одну установку и торец  $a$  оправы. Если в расточке оправы объектив хорошо центрируется, то торец  $a$  с большой точностью будет перпендикулярен его оптической оси.

С помощью автоколлиматора и двух вспомогательных плоскопараллельных пластинок, одна из которых прикладывается к плоскости шкалы, а вторая — к опорному торцу  $a$  (при вынутом объективе  $O$ ), легко проверить параллельность плоскости шкалы и торца  $a$ . Этим обеспечивается правильное взаимоположение оправы объектива и шкалы, т. е. перпендикулярность шкалы к оптической оси объектива.

Центрирование шкалы, т. е. совмещение ее центра  $Ц$  с фокусом  $F'$  объектива, а заодно и фокусировку также можно проверить автоколлимационным способом. Для этого вспомогательную отра-

жающую плоскость прикладывают к торцу  $a$ , освещают центр  $C$  шкалы и с помощью лупы наблюдают его автоколлимационное изображение  $C'$ . Фокус  $F'$  объектива находится посередине между точками  $C$  и  $C'$ .

Этот же способ можно осуществить с помощью торцевой автоколлимационной трубки, которая устанавливается на торец  $a$ .

Ч е т в е р т ы й э т а п: разработка методики юстировки, т. е. рациональной последовательности выявления и устранения имеющихся ошибок. В данном случае методика юстировки ясна из предыдущего и практическое ее выполнение не сложно.

П я т ы й э т а п: предложение способа надежной фиксации деталей и узлов в их правильном взаимоположении. В рассматриваемом случае эта операция также не составляет труда, так как допуски на точность установки кронштейна с основными узлами на плите сравнительно широкие. Эта операция оказывается сложной, если при фиксации узлов возникают нежелательные подвижки и деформации.

Ш е с т о й э т а п: продумывание способов защиты прибора от возможных расстройств в условиях эксплуатации. В данном случае надежность и долговечность коллиматора обеспечивается без специальных мер, так как прибор предназначен для лабораторного пользования. При необходимости установку коллиматора на бесконечность можно проверить автоколлимационным методом с помощью плоского зеркала и вспомогательного автоколлимационного окуляра.

## Г л а в а II

### ФОКУСИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 5. Типовые задачи, решаемые при фокусировке оптических систем

Линзовые системы, а также системы неплоских зеркал выполняют в оптических приборах ряд важнейших функций. С их помощью можно получить требуемого качества изображение пространства предметов, заданное его увеличение, обеспечить оборачивание изображения. Добавлением сеток, шкал и других устройств для наведения и отсчетов получают визирные, отсчетные или измерительные системы, т. е. системы для задания направлений в пространстве, а также для измерений углов, поперечных и продольных отрезков и т. д.

На рис. 16 показаны примеры типовых линзовых узлов и систем, требования к юстировке которых определим из условий их работы.

На рис. 16, а представлена телескопическая насадка, которая надевается на правую трубу артиллерийской стереотрубы АСТ 10×45. Насадка представляет собой галилеевскую систему 2 × 60, поэтому при надевании ее на трубу увеличение всей системы удваивается и разрешающая способность возрастает, что необходимо для подробного рассмотрения и изучения заинтересовавшего наблюдателя участка местности. К насадке следует предъявить два требования (кроме основного, что она должна иметь высокое качество изображения): во-первых, она должна быть строго телескопической, для чего задний фокус объектива должен быть точно совмещен с передним фокусом окуляра, и, во-вторых, при надевании насадки не должно сбиваться направление визирования; для этого оптическая ось насадки в рабочем положении должна быть параллельна визирной оси трубы.

На рис. 16, б схематически изображена оптическая система головки зенитного перископа подводной лодки. Сферический колпак 1, действующий как отрицательная concentрическая линза,

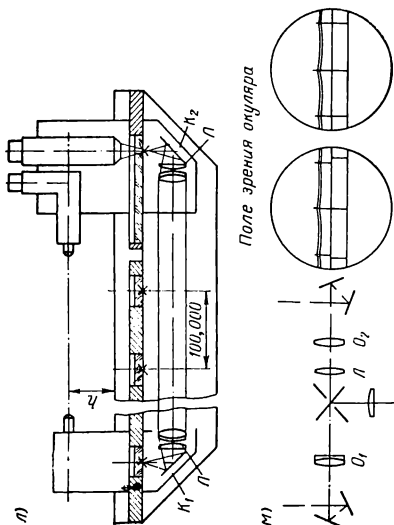
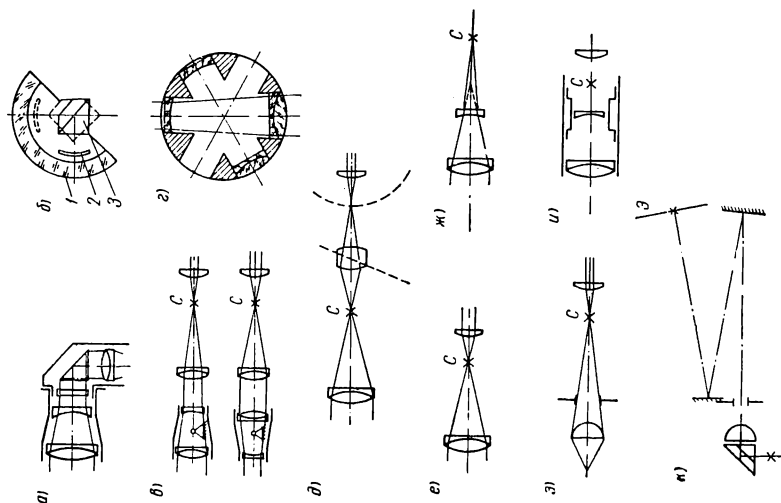


Рис. 16. Типовые линзовые узлы и системы: а — телескопическая насадка стереотрубы АСТ; б — головка зенитного перископа с кубической призмой; в — поворотная трубка искателя визира; г — поворотный барабан для смены увеличений в стереомикроскопе; д — панорамическая система; е — визирная трубка; ж — визирная трубка с телеобъективом; з — отсчетный микроскоп; и — визирная труба с нитяным дальномером; к — профильный проектор; л — линейная измерительная машина; м — монокулярный коинцидент-дальномер; н — наклонный Каврайского с дифференциальным отсчетом

совместно с положительным мениском 2 должны составлять телескопическую систему, так как далее расположена качающаяся куб-призма. Эта призма раздваивает входной зрачок: каждая ее половинка изображает его независимо. Из каждой точки предмета в призму поступают два пучка, главные лучи которых не параллельны друг другу, если предмет находится на близком расстоянии от перископа. Возникает двойное изображение близких предметов. При сборке головки важно также обеспечить центрировку системы, состоящей из сферического колпака 1 и мениска 2, который при визировании по высоте вращается вместе с головной призмой 3, но с удвоенной скоростью.

На рис. 16, в показана поворотная трубка искателя, в качестве которой используется галилеевская система с увеличением  $\Gamma_u$ , стоящая перед основной системой визира с сеткой С. Трубка работает в двух положениях. В первом положении, показанном на рисунке, трубка имеет наибольшее увеличение  $\Gamma_{\max} = \Gamma_u$ . Во втором положении, после поворота на  $180^\circ$ , она имеет наименьшее увеличение  $\Gamma_{\min} = \Gamma_u^{-1}$ , которое в  $\Gamma_u^2$  раз меньше наибольшего увеличения  $\Gamma_{\max}$ . Во столько же раз возрастает поле зрения при включении искателя, т. е. после поворота трубки.

К поворотной трубке предъявляются два основных требования. При ее повороте, во-первых, не должен возникать недопустимый параллакс сетки С основной системы, и не должна появляться заметная нерезкость изображения и, во-вторых, не должно сбиваться направление визирной оси. Первое требование выполняется лишь в том случае, когда трубка представляет собой строго телескопическую систему. Второе требование о несбиваемости визирной оси при повороте трубки должно выполняться в двух плоскостях: в плоскости, перпендикулярной оси поворота, — за счет правильного расположения фиксаторов или упоров, которые закрепляют трубку в двух рабочих положениях, и в плоскости, содержащей ось поворота, — за счет определенной установки оптической оси трубки в визирной оси основной системы.

Подобные же требования следует предъявить к поворотному барабану, применяемому для смены увеличений в стереомикроскопах типа МБС (рис. 16, г). Барабан имеет две пары галилеевских систем и пару сквозных отверстий и позволяет получить пять различных увеличений. В связи с тем, что это устройство используется в стереоприборе, предъявляются еще два дополнительных требования: каждая пара галилеевских систем не должна иметь непараллельности оптических осей и разности увеличений.

На рис. 16, д показана панкратическая система, состоящая из оборачивающей линзы и окуляра, которые при изменении увеличения одновременно перемещаются с помощью соответствующих пазов. Основные требования к юстировке системы состоят в том, чтобы при любом увеличении изображение плоскости пред-

метов совпадало с плоскостью полевой диафрагмы окуляра. Для этого необходимо, чтобы при любом увеличении оборачивающая линза и окуляр имели правильное взаимоположение, а также и правильное положение по отношению к плоскости изображения впереди стоящего объектива (на рисунке не показан). Кроме того, фокусное расстояние оборачивающей линзы должно равняться номинальной величине, принятой при расчете формы пазов для передвижения панкратической линзы и окуляра.

В визирных трубах в фокальной плоскости объектива закреплена сетка, в плоскости которой должно получаться резкое изображение плоскости предметов (рис. 16, *е*). В качестве объективов используются системы различных типов, в том числе и телеобъективы (рис. 16, *ж*). Если расстояние между объективом и сеткой при работе не меняется, то при заводской сборке требуется установить сетку так, чтобы она была резко видна одновременно с изображением предметов и чтобы остаточный параллакс сетки не превосходил допуска, полученного из требований точности работы прибора. В первой схеме (рис. 16, *е*) параллакс можно устранить взаимным смещением объектива и сетки, во второй схеме (рис. 16, *ж*) — смещением одной из линз.

В отсчетных микроскопах (рис. 16, *з*) к двум предыдущим требованиям (о резкости изображения предмета в плоскости сетки *С* и об отсутствии между ними недопустимого по величине параллакса) добавляется третье — об отсутствии так называемого рена — ошибки масштаба изображения. Для выполнения последнего требования при юстировке микроскопа необходимо изменять увеличение микрообъектива с тем, чтобы получить номинальное его значение, принятое при расчете и изготовлении шкалы окулярного микрометра.

На рис. 16, *и* показана схема трубы нивелира, где также необходимо обеспечить заданный масштаб изображения, так как расстояние между горизонтальными штрихами сетки нитяного дальногомера должно равняться одной сотой величины фокусного расстояния объектива, который состоит из двух компонентов. Изменяя воздушный промежуток между этими компонентами во время заводской сборки, можно получить расчетное эквивалентное фокусное расстояние объектива, а затем установить и сетку *С* на нужном расстоянии.

На рис. 16, *к* дана схема профильного проектора для получения правильного (ортоскопического) увеличенного изображения предмета на экране большого размера. Угол поля зрения объективов проектора значительно больше, чем у объективов микроскопов, а задний апертурный угол значительно меньше. При юстировке проекторов необходимо выполнить два основных требования: изображение на экране *Э* должно иметь заданный масштаб, и этот масштаб должен быть постоянным в любых направлениях от центра экрана.

В системах с наложенными или совмещенными изображениями, а также в стереосистемах, служащих для измерений в пределах значительной части поля зрения, требуется с большой точностью обеспечить равенство масштабов изображений. На рис. 16, л, м приведены примеры таких систем. В отсчетной системе линейной измерительной машины (рис. 16, л) в поле зрения микроскопа накладываются друг на друга изображение одного из биссекторов, закрепленных в линейке через каждые 100 000 мм, и изображение 100-миллиметровой шкалы с ценой деления 0,100 мм. Изображение биссекторов линейки в поле зрения микроскопа проектируется системой двух коллиматоров  $K_1$  и  $K_2$  с увеличением  $1\times$ . Это увеличение должно быть выдержано с точностью до сотых долей процента, иначе говоря, с такой же точностью должны быть равны фокусные расстояния  $f'_1$  и  $f'_2$  объективов коллиматоров  $K_1$  и  $K_2$ . Это требование можно было бы обеспечить регулировкой фокусного расстояния объектива одного из коллиматоров, для чего в схеме следовало бы предусмотреть подвижную вдоль оси юстировочную линзу  $L$ . В действительности такая линза имеется в каждом объективе, что позволяет выполнить еще и второе требование при юстировке коллиматоров — фокусные расстояния обоих объективов сделать равными расстоянию от плоскости шкалы до линии измерения машины, т. е. высоте  $h$ . В данном случае только при этом условии ошибки направляющих станины, служащих для передвижения измерительных бабок, не вызовут ошибок первого порядка. Символически оба требования к юстировке отсчетной системы линейной измерительной машины можно записать так:

$$f'_1 = f'_2 = h.$$

На рис. 16, м приведена схема монокулярного дальномера системы коинциденц с совмещенными полями зрения левой и правой половин, которые разделены узкой линией раздела. В случае, если фокусные расстояния объективов телескопа  $O_1$  и  $O_2$  неодинаковы, масштаб изображений будет различным, например в верхней половине меньше, чем в нижней. Это приведет к тому, что при совмещении изображений в центре поля будет наблюдаться их расхождение на краях. На рис. 16, м этот дефект показан на примере измерения дистанции до телеграфных столбов, расположенных фронтально к линии визирования (поле зрения окуляра, слева). Чтобы избежать при этом ошибок измерения, потребовалось бы наводить дальномер на предмет с большой точностью по горизонту.

Аналогичный дефект наблюдается и в стереодальномере при неравенстве фокусных расстояний объективов телескопа: при измерении дистанции до одной и той же точки предмета, но в разных боковых участках поля зрения будут получаться различные результаты. Для исключения этого недостатка следует уравнивать фокус-

ные расстояния объектов  $O_1$  и  $O_2$ , например, с помощью специальной юстировочной положительной линзы, предусмотренной в системе правого объектива. Изменяя воздушный промежуток между основным объективом  $O_2$  и линзой  $L$ , можно изменять и фокусное расстояние всей этой системы. После этого при наводке на те же столбы наблюдается их совмещение в пределах всего поля зрения (рис. 16, *м*, справа).

В бинокулярных наблюдательных системах требуется еще выдержать равенство увеличений в обеих ветвях, например в бинокле — равенство угловых увеличений в спаренных трубках, в стереомикроскопе — равенство видимых увеличений в обеих половинках.

На рис. 16, *н* показана дифференциальная отсчетная система с наложенными изображениями на примере наклономера Каврайского. Работа такой системы основана на том, что в поле зрения накладываются два изображения объекта, масштабы которых отличаются на строго определенную величину, например на 1%. При перемещении изображений по полю они движутся с различными скоростями, отличающимися друг от друга тоже на 1%. Вследствие этого взаимоположение изображений будет непрерывно изменяться при их смещении от центра поля зрения к краю. При принятых условиях изображения будут перемещаться в сто раз быстрее, чем будет изменяться их взаимоположение. Появляется возможность измерять малые взаимные сдвиги изображений по многократно большей величине их перемещения по полю зрения.

Если при юстировке схем, представленных на рис. 16, *л*, *м*, надо было уравнивать масштабы изображений, то в дифференциальной отсчетной системе (рис. 16, *н*) необходимо выдерживать строго определенную разность масштабов изображений. В схеме наклономера Каврайского, например, для этого предусмотрена у правого объектива  $O_2$  коррекционная линза  $L$ , продольным смещением которой можно изменять эквивалентное фокусное расстояние системы, состоящей из объектива  $O_2$  и линзы  $L$ .

Таковы основные юстировочные задачи, которые решаются при фокусировке оптических систем продольными смещениями фокусных элементов. Все эти задачи сводятся к нескольким типовым юстировочным операциям, а именно:

- к фокусировке изображения;

- к устранению параллакса;

- к регулировке масштаба изображения в соответствии с заданным его значением, или к уравниванию масштабов двух изображений, или, наконец, к выдерживанию заданной разности масштабов изображений.

В последующих параграфах рассматривается решение перечисленных частных задач.



## 6. Фокусировка изображения

Для решения многих юстировочных задач, относящихся к данной главе, необходимо знать зависимость между продольными сдвигами фокусных элементов и величиной смещения, или расфокусировки, изображения. Продольные сдвиги линз и зеркал при юстировке в большинстве случаев относительно малы по величине. Для расчетов при этом условии удобнее использовать дифференциальные формулы, непосредственно связывающие величину малой подвижки системы от исходного положения с соответствующей величиной расфокусировки изображения. Выведем

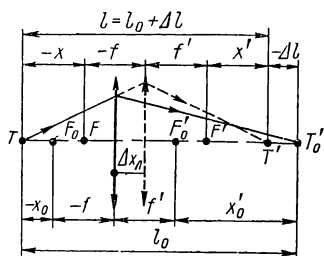


Рис. 17. Влияние смещения линзы на расфокусировку изображения

такие формулы для одной линзы, представленной на рис. 17, где сплошными линиями показан ход лучей между сопряженными точками  $T$  и  $T'_0$  при исходном положении линзы, а штриховыми линиями — ход лучей между сопряженными точками  $T$  и  $T'$  после смещения линзы на величину  $\Delta x_l$ , в результате которого изображение  $T'$  точки смещается на величину  $\Delta l$ . Будем считать эти смещения вправо — по ходу луча — положительными.

Для расстояния между сопряженными точками (при совмещенных главных плоскостях линзы) найдем

$$l = -x - f + f' + x'. \quad (\text{II.1})$$

Для линзы в воздухе переднее и заднее фокусные расстояния равны по величине, т. е.  $-f = f'$ . Используя формулу Ньютона

$$xx' = -f'^2. \quad (\text{II.2})$$

Из формулы (II.1) получим

$$l = -x + 2f' - \frac{f'^2}{x}. \quad (\text{II.3})$$

Здесь  $x$  — передний отрезок — расстояние до точки предмета  $T$  от переднего фокуса  $F$  линзы;  $x'$  — задний отрезок — расстояние до изображения  $T'$  точки предмета от заднего фокуса  $F'$  линзы.

Поскольку линейное увеличение

$$V = \frac{f'}{x} = \frac{x'}{f} = -\frac{x'}{f'}, \quad (\text{II.4})$$

то формулу (II.3) преобразуем к виду

$$l = (2 - V - V^{-1}) f', \quad (\text{II.5})$$

где  $V$  — линейное увеличение линзы для сопряженных точек  $T$  и  $T'$ .

Применив формулу (II.3) дважды — для смещенного и исходного положения линзы, отметив в последнем случае расстояние  $l$ , отрезок  $x$ , увеличение  $V$  и соответственно фокусы  $F$  и  $F'$  индексом 0, найдем для величины расфокусировки изображения  $\Delta l$  точное выражение

$$\Delta l = l - l_0 = \left(1 - \frac{f'^2}{x_0 x}\right)(x_0 - x). \quad (\text{II.6})$$

Как видно из рис. 17,  $x_0 - x = \Delta x_A$ ; кроме того,  $\frac{f'^2}{x_0 x} = V_0 V$ , поэтому окончательно получим

$$\Delta l = (1 - V_0 V) \Delta x_A. \quad (\text{II.7})$$

Это простое точное выражение, однако, неудобно для практических расчетов, так как увеличение  $V$  для смещенной линзы обычно непосредственно не известно.

Рассмотрим влияние продольных сдвигов линзы на смещение изображения в зависимости от расстояния до точки предмета  $T$ . Почти всегда, за исключением случая, когда точка предмета  $T$  находится в пределах узкой области вблизи переднего фокуса  $F$ , линейное увеличение  $V$  линзы, смещенной на малую величину  $\Delta x_A$ , мало отличается от ее увеличения  $V_0$  в исходном положении, так что можно написать  $V = V_0 - \Delta V$ , где  $\Delta V$  — малая величина.

Формулу (II.7) перепишем в виде

$$\Delta l = (1 - V_0^2 + V_0 \Delta V) \Delta x_A. \quad (\text{II.8})$$

Из формулы (II.8) видно, что следует различать три случая.

1.  $|V_0| \ll 1$ , когда точка предмета  $T$  удалена влево от переднего фокуса  $F$  линзы на расстояние, измеряемое бóльшим числом ее фокусных расстояний  $f'$ ; при этом для величины расфокусировки получим

$$\Delta l \approx \Delta x_A, \quad (\text{II.8a})$$

т. е. изображение точки  $T'$  смещается вместе с линзой, будучи с ней как бы неизменно связано.

2.  $|V_0| = 1$ , когда точка предмета  $T$  удалена влево от переднего фокуса линзы на фокусное расстояние  $f$ , или когда она совпадает с передней главной точкой линзы.

В обоих случаях, как известно, расстояние  $l$  между сопряженными точками  $T$  и  $T'$  наименьшее: в первом случае  $l_{m1} = 4f'$ , а во втором —  $l_{m2} = 0$ . Смещение изображения

$$\Delta l = V_0 V \Delta x_A.$$

Найдя дифференцированием формулы (II.4)  $\Delta V = -\frac{f'}{x_0^2} \Delta x_A$ , преобразуем последнее выражение:

$$\Delta l = -V_0 \frac{f'}{x_0^2} \Delta x_A^2 = -V_0^2 \frac{\Delta x_A^2}{x_0} = -\frac{\Delta x_A^2}{x_0}. \quad (\text{II.8б})$$

При  $V_0 = -1 \times$   $x_0 = f'$ , поэтому  $\Delta l \approx \frac{\Delta x_a^2}{f'}$ , а при  $V_0 = +1 \times$   $x_0 = f'$ , откуда  $\Delta l \approx \frac{\Delta x_a^2}{f'}$ .

Следовательно, при малом смещении линзы в любом направлении из исходного положения, когда ее линейное увеличение равно единице, изображение смещается всегда в одном направлении и так, что расстояние  $l$  между сопряженными точками  $T$  и  $T'$  возрастает на малую величину второго порядка. Направления смещений изображения для  $V_0 = 1 \times$  и  $V_0 = -1 \times$  противоположны друг другу.

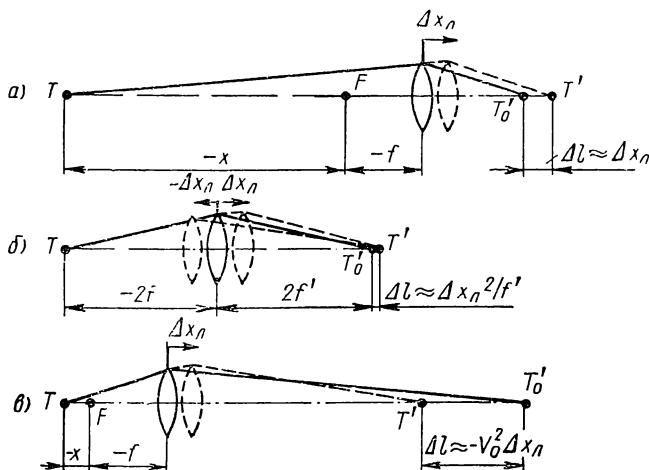


Рис. 18. Частные случаи взаимоположения точки предмета и линзы

3.  $|V_0| \gg 1$ , когда точка предмета  $T$  удалена влево от переднего фокуса  $F$  линзы на расстояние, значительно меньшее ее фокусного расстояния  $f'$ .

Для смещения изображения получим

$$\Delta l \approx -V_0^2 \Delta x_a. \quad (\text{II.8в})$$

Видно, что здесь изображение движется в ускоренном масштабе в сторону, противоположную направлению смещения линзы, так что расстояние  $l$  между сопряженными точками  $T$  и  $T'$  быстро уменьшается.

Все три рассмотренных случая представлены на рис. 18, а, б, в. Преобразуя формулу (II.6), найдем

$$\Delta l = \left( 1 - \frac{V_0^2}{1 - \frac{V_0}{f'} \Delta x_a} \right) \Delta x_a = \left( 1 - \frac{V_0^2}{1 - \frac{\Delta x_a}{x_0}} \right) \Delta x_a. \quad (\text{II.9})$$

Это выражение также не очень удобно для расчетов и анализа.

По правилам приближенных вычислений из формулы (II.9) найдем более простое и удобное выражение, но точное лишь до вторых степеней величины подвижки линзы  $\Delta x_a$  и справедливое только в тех случаях, когда смещение линзы  $\Delta x_a$  по величине значительно меньше отрезка  $x_0$ . Для этого напомним

$$\begin{aligned}\Delta l &= \left(1 - \frac{V_0^2}{1 - \frac{\Delta x_a}{x_0}}\right) \Delta x_a \approx \left[1 - V_0^2 \left(1 + \frac{\Delta x_a}{x_0}\right)\right] \Delta x_a = \\ &= (1 - V_0^2) \Delta x_a - \frac{V_0^2}{x_0} \Delta x_a^2 = (1 - V_0^2) \Delta x_a - \frac{V_0^3}{f'} \Delta x_a^2, \quad (\text{II.10})\end{aligned}$$

где  $V_0$  — величина линейного увеличения при исходном положении линзы;

$f'$  — заднее фокусное расстояние линзы;

$\Delta x_a$  — величина продольной подвижки линзы от исходного положения.

Из расчетных формул (II.7) и (II.10) видно, что они не позволяют найти величину расфокусировки, когда точка предмета  $T$  весьма близко расположена к переднему фокусу  $F$  линзы или переходит через него, так как в этих случаях увеличение  $V_0$  очень велико или соответственно переходит через  $\infty$ . Между тем и этот случай нередко встречается при юстировке линзовых систем.

Когда увеличение системы  $V_0 = \infty$  (точка предмета совпадает с ее передним фокусом  $F$ ), вместо величины расфокусировки  $\Delta l$  удобнее находить непосредственно из формулы Ньютона положение изображения точки за системой после ее смещения на величину  $\Delta x_a$ . Поскольку передний отрезок равен величине смещения линзы с обратным знаком, т. е.  $x = -\Delta x_a$ , то для заднего отрезка  $x'$  напомним

$$x' = \frac{f'^2}{\Delta x_a}, \quad (\text{II.11})$$

где  $x'$  — расстояние до изображения точки от заднего фокуса  $F'$  системы в ее смещенном положении.

Если по заданному отрезку  $x' = a$  определяют соответствующую величину смещения системы  $\Delta x_a$ , то формулу (II.11) следует переписать к виду

$$\Delta x_a = \frac{f'^2}{a}. \quad (\text{II.12})$$

Выражая отрезок  $a$  в диоптрийной мере через  $A = \frac{1000}{a}$ , получим

$$\Delta x_a = \frac{f'^2 A}{1000}. \quad (\text{II.12a})$$

Применим полученные выводы к решению практических задач.

**Задача 1.** Рассмотрим юстировку однолинзовой панкратической системы, схематически показанной на рис. 19.

Расчет формы пазов для передвижения панкратической линзы и окуляра можно выполнить, например, по формулам (II.3) и (II.5), которые для предметного отрезка  $x$  и расстояния  $l$  между сопряженными точками дают

$$x = \frac{f'}{V}; \quad l = (2 - V - V^{-1}) f'.$$

На рис. 19 показана форма таких пазов при равномерной шкале линейных увеличений  $V$  и при условии, что продольные отрезки

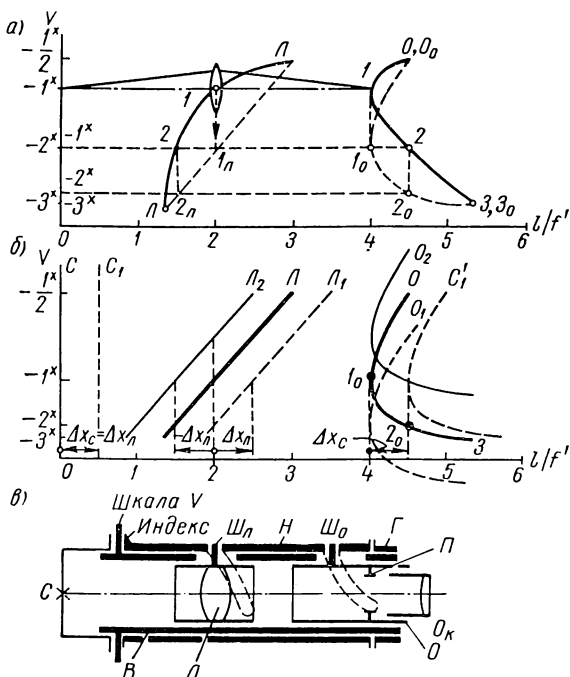


Рис. 19. Влияние смещения панкратической линзы на положение изображения

выражены через фокусное расстояние линзы  $f'$ . Оба паза при этом получают криволинейной формы. В дальнейшем будет показано, что требования к точности изготовления строже к первому — линзовому — пазу, который отмечен индексом  $L$ . Поэтому на практике линзовый паз спрямляют, нарезаая его по винтовой линии. Поскольку второй (окулярный) паз имеет точку минимума при  $V_{\text{ex}} = -1\times$ , то при использовании панкратической системы для увеличений, меньших единицы, спрямление этого паза становится невозможным.

Спрямление линзового паза рассмотрено на рис. 19, а, б в предположении, что панкратическая система работает в пределах увеличений от  $V_{\min} = -\frac{1^\times}{2}$  до  $V_{\max} = -3^\times$ . Для спрямления концы линзового пазы на развертке (рис. 19, а) соединены наклонной прямой  $ЛЛ$ , на которую и должны быть перенесены все точки криволинейного пазы. Штриховыми вертикальными прямыми показан перенос точек 1 и 2 в точки  $1_a$  и  $2_a$ . Штриховыми горизонтальными прямыми, идущими влево из точек  $1_a$  и  $2_a$ , найдем точки  $-1^\times$  и  $-2^\times$  на новой шкале увеличений, которая теперь становится неравномерной — деления на новой шкале с ростом увеличений сгущаются (рис. 19, б).

В соответствии с делениями новой шкалы увеличений аналогично предыдущему, но в обратной последовательности находят сопряженные точки окулярного пазы  $1_o$  и  $2_o$  и по ним строят трансформированный окулярный паз, который на рис. 19, б показан жирной кривой, отмеченной индексом  $O$ .

На рис. 19, б еще раз, но уже без построительных линий показана развертка обоих направляющих пазов с выпрямленным линзовым пазом и неравномерной шкалой увеличений. Линзовый паз нарезается по винтовой линии, а окулярный паз — с помощью копира.

Рассмотрим основные ошибки изготовления, а затем и юстировку такой панкратики.

Конструктивная схема узла изображена на рис. 19, в. Оправа  $Л$  с линзой и окулярный тубус  $O$  передвигаются в трубе  $B$  вдоль продольного пазы, в который входят шпонки  $Ш_a$  и  $Ш_o$ , скрепленные соответственно с оправой линзы  $Л$  и с окулярным тубусом  $O$ . Шпонку  $Ш_a$  при юстировке можно смещать в пазу вдоль оправы линзы  $Л$  и закреплять ее в правильном положении. Цилиндрические головки шпонок  $Ш_a$  и  $Ш_o$  входят соответственно в спиральный паз линзы и в криволинейный паз окуляра. Эти пазы нарезаны в наружной поворотной трубе  $H$  в соответствии с развертками по рис. 19, б. Наружная труба  $H$  может только вращаться на направляющих поясах внутренней трубы  $B$ , так как своими торцами она поджата слева к опорному торцу этой трубы  $B$ , а справа — к опорному торцу гайки  $Г$ . На левом торце трубы  $B$  нанесена неравномерная шкала увеличений  $V$ , а на левом конце трубы  $H$  нанесен индекс.

Из конструктивной схемы панкратики видно, что имеется лишь один юстировочный компенсатор — шпонка  $Ш_a$ , смещаемая вдоль пазы оправы линзы  $Л$ . Следует упомянуть еще об одной юстировочной компенсации: подрезая опорный торец корпуса с оправой сетки  $C$ , можно изменять расстояние между сеткой  $C$  и полевой диафрагмой  $П$  окуляра  $Ок$ . Кроме того, можно центрировать оправу сетки  $C$  на оси панкратической системы с помощью трех винтов с коническими головками, расположенных через  $120^\circ$

по окружности оправки с конической фаской. Схематически узел шпонки и узел оправки сетки с регулировочным винтом показаны на рис. 20.

К юстировке панкратики предъявляются два основных требования:

1) при перемещении панкратической линзы в пределах всей шкалы увеличений от  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$  резкое изображение сетки и предмета всегда должно оставаться в плоскости полевой диафрагмы окуляра с точностью обычно не ниже  $\pm 1$  дптр за окуляром;

2) изображение центра перекрестия сетки при этом не должно сдвигаться по полю зрения более, чем допустимо; допуск за окуляром обычно составляет не более 10—15'.

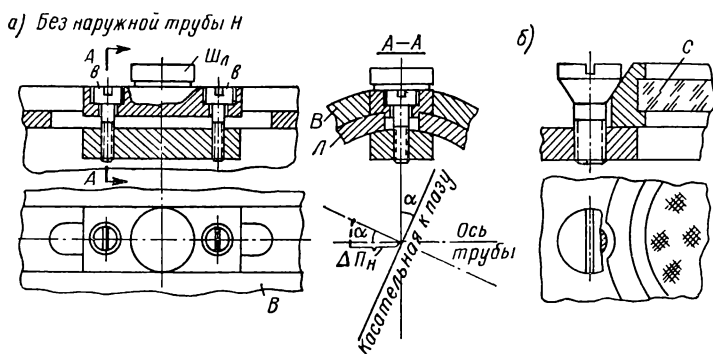


Рис. 20. Конструктивные схемы узлов шпонки (а) и сетки (б)

Для расчетов предположим, что фокусное расстояние панкратической линзы  $f' = 30$  мм, увеличение окуляра  $\bar{\Gamma} = 10 \times (f'_{ок} = 25$  мм). Наименьшее значение увеличения панкратики примем  $V_{\min} = -\frac{3 \times}{4}$ , наибольшее увеличение  $V_{\max} = -2 \frac{1 \times}{2}$ .

Первое требование о совмещении изображения сетки с плоскостью полевой диафрагмы нарушают следующие основные ошибки: сдвиг панкратической линзы из расчетного положения;

ошибки изготовления пазов и зазоры в пазах, а также зазоры между торцами наружной трубы  $H$ ;

отклонение действительного фокусного расстояния панкратической линзы от его номинального значения  $f'$ .

Рассмотрим влияние перечисленных ошибок, способы их выявления и устранения или компенсации в процессе юстировки панкратики. Влияние сдвига линзы из правильного положения показано на рис. 19, б. Буквами  $L$  и  $O$  отмечены расчетные траектории соответственно панкратической линзы и окуляра. Буквами  $L_1$  и  $L_2$  обозначены траектории той же линзы при ее сдвиге из расчетного положения вправо на величину  $\Delta x_d$  или влево на

величину  $-\Delta x_A$ . После таких сдвигов линза при работе панкратики будет смещаться параллельным курсом по наклонным прямым  $L_1$  или  $L_2$ , которые отстоят на величину  $\Delta x_A$  или  $-\Delta x_A$  от расчетной прямолинейной траектории  $L$ . Геометрические места сопряженных изображений сетки  $C$  через пакратическую линзу, т. е. кривые  $O_1$  и  $O_2$ , можно найти, сместив расчетную кривую  $O$  по вертикали на ту же величину, на какую сместилась по высоте траектория линзы  $L$  после ее сдвига на величину  $\Delta x_A$ .

Полученные кривые позволяют контролировать установку линзы в правильное положение. Если, например, контролировать правильность установки линзы при увеличении  $V = -1\times$ , то когда  $\Delta x_A > 0$ , при вращении наружной трубы  $H$  (рис. 19, в) в сторону больших увеличений  $V$  замечается уход изображения сетки от наблюдателя, а когда  $\Delta x_A < 0$ , наоборот, при тех же условиях замечается быстрый уход изображения в сторону наблюдателя. Это легко и точно обнаруживается по наблюдению знака и величины параллакса между изображением сетки  $C$  и штрихами вспомогательной сетки, которую на время юстировки следует поместить в плоскости полевой диафрагмы окуляра.

Для установки линзы в правильное положение можно было бы воспользоваться тем, что при  $V = -1\times$  расстояние между сопряженными точками минимально, или тем, что линейное увеличение по абсолютной величине равно единице. Но оба эти способа контроля правильной установки линзы неудобны: первый потому, что нечувствителен, а второй потому, что для сравнения увеличений требуются две вспомогательные линейные шкалы в поле зрения.

В самом деле, из формулы (II.8б) найдем, что вероятная погрешность установки линзы в правильное положение при  $V = -1\times$  или при  $x_0 = f'$  равна

$$\Delta x_A \approx V \sqrt{\Delta l f'}.$$

Предполагая, что с помощью наблюдения параллакса может быть обнаружена расфокусировка  $\Delta l = 0,15$  мм (за окуляром это соответствует 0,25 дптр), получим  $\Delta x_A \approx 2,1$  мм.

При максимальном увеличении  $V_{\max} = -2 \frac{1\times}{2}$  такое смещение линзы вызвало бы расфокусировку изображения в 8,5 мм или почти в 15 дптр (!). Из этих же расчетов видно, что допустимо смещение линзы из правильного положения менее чем на 0,1 мм.

Рассмотрим установку сетки  $C$  в правильное положение. Пусть штриховая вертикальная прямая  $C_1$  на рис. 19, б соответствует положению плоскости сетки после ее смещения вправо на малую величину  $\Delta x_c$ , равную смещению панкратической линзы вправо на  $\Delta x_A$ , так что  $\Delta x_c = \Delta x_A$ . Взаимное положение смещенных сетки и панкратической линзы при этом останется правильным. Кривая сопряженного изображения сетки  $C'_1$  получится в результате параллельного смещения ее номинальной кривой вправо на ту же



величину  $\Delta x_d = \Delta x_c$ . Легко заметить, что в данном случае при юстировке панкратической системы в поле зрения окуляра наблюдается постоянный параллакс изображения сетки  $C'_1$  по отношению к вспомогательной юстировочной сетке, помещенной в поле зрения окуляра. Для исправления дефекта необходимо лишь замерить это постоянное смещение изображения и устранить его одновременным сдвигом сетки и линзы влево на одинаковую величину  $\Delta x_c = \Delta x_d$ .

Перейдем ко второй группе ошибок. Ошибки изготовления пазов могут быть местные и прогрессивные. Рассмотрим здесь лишь ошибки местного характера. Ошибки окулярного паза влияют на расфокусировку изображения в единичном масштабе. Например, если допустить смещение изображения менее  $0,25 \text{ дптр}$ , то допустимая величина проекции нормальной ошибки паза на направление оси трубы будет менее  $0,15 \text{ мм}$ . Допуск на ошибку паза зависит не от увеличения панкратики, а лишь от угла подъема паза: чем больше угол  $\alpha$ , тем шире допуск на нормальную ошибку паза (рис. 20, а). Ошибки линзового паза передаются к окуляру с увеличением, а проекция нормальной ошибки этого паза на ось трубы и представляет собой величину допустимого смещения линзы  $\Delta x_d$ . Если расфокусировку изображения за окуляром допустить менее  $0,25 \text{ дптр}$ , т. е. перед окуляром менее  $\Delta l = 0,15 \text{ мм}$ , то проекция допустимой ошибки паза составит

$$\Delta \Pi_n = \Delta x_d \leq \frac{\Delta l}{1 - V^2} = \frac{\pm 0,15}{1 - V^2} \text{ мм}.$$

Допуск на неточность изготовления паза зависит от увеличения линзы, и для его наибольшей величины  $V_{\max} = -2 \frac{1}{2} \times$  получим

$$\Delta \Pi_n = \mp 0,03 \text{ мм}.$$

Это — строгий допуск, если учесть, что кроме ошибки изготовления паза сюда же следует включить еще зазор между цилиндрической шпонкой линзы  $Ш_d$  и пазом.

Иначе влияет зазор между торцами наружной трубы  $H$ : он проявляется как безвредный «мертвый ход», вызывающий лишь ошибку отсчета по шкале увеличений и не дающий расфокусировки изображения.

Теперь рассмотрим третью ошибку — отклонение  $\Delta f'/f'$  фокусного расстояния панкратической линзы от расчетного значения, которое в серийном производстве может достигать одного процента, т. е.  $\frac{\Delta f'}{f'} 100\% = \pm 1\%$ . Из рис. 21 видно, что если на графике разверток пазов по оси абсцисс отложить расчетные фокусные расстояния линзы  $f'_0$ , то этот график станет универсальным — пригодным для любых однолинзовых панкратических систем. Если же вернуться к выражению расстояний по оси абсцисс в ли-

нейной мере, то для панкратических линз разных фокусных расстояний графики разверток пазов будут иметь неодинаковый горизонтальный масштаб. Линзовые пазы при этом будут изображаться пучком наклонных прямых  $\mathcal{L}$ ,  $\mathcal{L}_1$ , пересекающихся в начале осей, где  $V = 0$ , а окулярные пазы — семейством смещенных по горизонту и отличающихся друг от друга по форме кривых  $C'$ ,  $C'_1$ . Форму этих кривых можно вычислить по формуле (II.5) или построить графически.

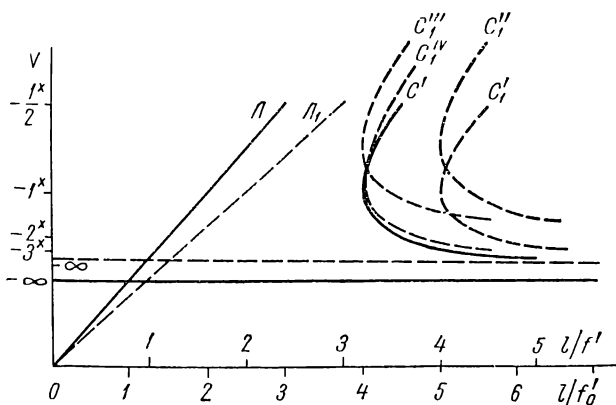


Рис. 21. Влияние отклонения фокусного расстояния панкратической линзы на положение изображения

Предположим, что фокусное расстояние линзы больше расчетной величины  $f'_0$  на  $\Delta f'$ . Если бы линзовый паз был изготовлен по развертке  $\mathcal{L}_1$ , соответствующей величине действительного фокусного расстояния данной линзы, то при увеличении  $V$  и правильной установке линзы имела бы расфокусировка  $\Delta l_1$ , которую можно вычислить с помощью формулы (II.5)

$$\Delta l_1 = (2 - V - V^{-1}) \Delta f', \quad (\text{II.13})$$

или найти из рис. 21, где штриховой кривой  $C'_1$  показано геометрическое место резких изображений сетки через линзу с фокусным расстоянием  $f' = f'_0 + \Delta f'$ .

При переходе от предположительного паса  $\mathcal{L}_1$  к действительному пазу, показанному прямой  $\mathcal{L}$ , геометрическое место изображений сетки  $C$  дается кривой  $C'_1$ . Постоянную составляющую расфокусировки, которая равна разности абсцисс кривых  $C'_1$  и  $C'$ , можно скомпенсировать сдвигом сетки и панкратической линзы, как это делалось при наличии смещений сетки. Это приведет к параллельному смещению кривой  $C'_1$  влево на ту же величину, в результате чего получим кривую  $C''_1$ , а затем и кривую  $C''_2$ .

Величину остаточной расфокусировки можно найти графически из сравнения кривых  $C_1^{IV}$  и  $C'$  или вычислить.

Для вычисления найдем уравнение смещенной кривой, которая получается в результате сложения двух расфокусировок — одной, выражаемой формулой (II.13), и другой, возникающей вследствие того, что действительное положение линзы с отклонением фокусного расстояния на величину  $\Delta f'$  отличается от соответствующего расчетного положения (при движении по штриховой кривой  $L_1$ ). Вследствие расхождения наклонных прямых  $L_1$  и  $L$  появляется сдвиг линзы на величину

$$\Delta x_a = -(1 + V^{-1}) \Delta f'. \quad (\text{II.14})$$

По формуле (II.10) до малых величин первого порядка этот сдвиг вызовет расфокусировку

$$\Delta l_2 = \frac{(1 + V)(V^2 - 1)}{V} \Delta f'. \quad (\text{II.15})$$

Величина общей расфокусировки от действия обеих причин

$$\Delta l = (1 + V^2 - 2V^{-1}) \Delta f'. \quad (\text{II.16})$$

Предположим, что компенсация постоянной составляющей произведена при увеличении  $V = -1\times$ , где суммарная расфокусировка составляла  $\Delta l = 4\Delta f'$ . Тогда для величины остаточной расфокусировки напомним

$$\Delta l_{ост} = (V^2 - 3 - 2V^{-1}) \Delta f'. \quad (\text{II.17})$$

Для крайних значений увеличения получим:

$$\text{при } V_{\min} = -\frac{3\times}{4}$$

$$\Delta l_{ост} = \frac{11}{48} \Delta f' \approx 0,23 \Delta f';$$

$$\text{при } V_{\max} = -2 \frac{1\times}{2}$$

$$\Delta l_{ост} = 4,05 \Delta f'.$$

Остаточную расфокусировку можно еще располовинить, если дополнительно сместить сетку и линзу влево, примерно на  $2\Delta f'$ . Тогда ошибка составит величину

$$\Delta l_{ост} \approx \pm 2 \Delta f'.$$

Если опять допустить  $\Delta l_{ост}$  до 0,15 мм, то отклонение фокусного расстояния панкратической линзы не должно быть более  $\pm 0,1$  мм, т. е. около 0,3% от его величины.

Аналогично действует и прогрессивная ошибка винтового паза линзы. В данном случае величину проекции допустимой ошибки на направление оси трубы можно найти по формуле (II.14)

$$\Delta L = -(1 + V^{-1}) \Delta f'.$$

Как явствует из рис. 21, наибольшая величина отклонения линзового паза от расчетного положения получится при  $V_{\min} = -\frac{3\times}{4}$  и будет равна  $\Delta\P = -\frac{1}{3}\Delta f'$ . Положив  $\Delta f' \approx \pm 0,1$  мм, получим допуск на прогрессивную ошибку паза  $\Delta\P = 0,03$  мм.

Таким образом, в результате рассмотрения ошибок панкратической системы можно строго обосновать допуски на основные погрешности, а также быстро и целеустремленно выполнить юстировку системы и добиться наименьшей остаточной ошибки.

Методика юстировки панкратики заключается (кратко) в следующем.

1. Собрав панкратическую систему, следует установить в полевой диафрагме окуляра вспомогательную сетку.

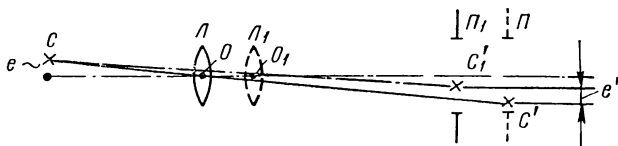


Рис. 22. Влияние децентрировки сетки на сдвиг изображения

2. Изменяя увеличение от  $V_{\min}$  к  $V_{\max}$ , необходимо следить за знаком и величиной параллакса; если наблюдается параллакс переменного знака, например при  $V_{\min}$  обратного знака, а при  $V_{\max}$  — прямого знака (кривая  $O_2$  на рис. 19, б), то панкратическую линзу следует сместить к окуляру. Это смещение выполняется при отпущенных винтах  $e$  шпонки  $\text{Ш}_A$  оправы линзы  $L$  (рис. 20, а).

3. Если параллакс в пределах  $V_{\min} - V_{\max}$  остается однозначным (кривая  $C'_1$  на рис. 19, б), то необходимо сместить и сетку, и линзу: при параллаксе прямого знака их необходимо приблизить к окуляру.

4. Если же параллакс меняет знак дважды, например от прямого знака при  $V_{\min}$  переходит к обратному знаку вблизи  $V = -1\times$  и затем при дальнейшем возрастании увеличения возвращается к прямому знаку при  $V_{\max}$ , то следует заключить, что фокусное расстояние панкратической линзы превышает наибольшую допустимую величину. В этом случае сдвигами сетки и линзы можно лишь целесообразно перераспределить остаточную расфокусировку.

5. В заключение следует поместить центр сетки на ось панкратической системы. Как видно из рис. 22, осью панкратической системы является траектория передвижения центра  $O$  линзы.

Допустимое смещение перекрестия  $C$ , т. е. величину  $e$  на рис. 22, можно найти по формуле

$$e \leq \frac{e'}{V_{\max} - V_{\min}}, \quad (\text{II.18})$$

если известно допустимое смещение изображения перекрестия  $e'$  в плоскости полевой диафрагмы при изменении увеличения от  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$ . В нашем случае  $e' = f'_{ок} \operatorname{tg} (10 \div 15')$  или  $e' \approx 0,08 \div \div 0,1$  мм. Точность центрировки сетки составляет в среднем  $C \approx 0,05$  мм.

**Задача 2.** Для коррекции аметропии глаза наблюдателя в инфракрасном микроскопе предусмотрено смещение линзы, которая с увеличением  $V_0 = -1,2\times$  переносит изображение экрана ЭОПа в плоскость полевой диафрагмы окуляра при расстоянии между сопряженными плоскостями  $l_0 \approx 225$  мм. Фокусирующая линза с помощью винтового механизма может перемещаться в обе стороны от нулевого положения настолько, чтобы изображение из плоскости полевой диафрагмы окуляра смещалось на  $\pm 2$  мм. Это движение линзы и используется для коррекции аметропии при неподвижных сменных окулярах с увеличением  $\bar{\Gamma}_1 = 7\times$  и  $\bar{\Gamma}_2 = 15\times$ .

При пользовании фокусирующей линзой, когда установлен сильный окуляр ( $\bar{\Gamma}_2 = 15\times$ ), никаких особых неудобств не замечалось, но при установке слабого окуляра ( $\bar{\Gamma}_1 = 7\times$ ) наблюдались ненормальности при коррекции гиперметропии. При передвижении линзы в одном и том же направлении с постоянной скоростью изображение экрана ЭОПа сначала смещалось в нужную сторону — от наблюдателя с постепенным замедлением, затем оно останавливалось и начинало с ускорением смещаться в противоположную сторону.

Выявим причину этого явления, для чего найдем зависимость между величиной смещения фокусирующей линзы  $\Delta x_a$  и величиной получающегося смещения изображения  $\Delta l$ .

По формуле (II.5) фокусное расстояние линзы равно

$$f' = \frac{l_0}{2 - V_0 - V_0^{-1}} \approx 55,8 \text{ мм.}$$

Относительное смещение линзы сравнительно невелико, поэтому для расчетов можно воспользоваться приближенной формулой (II.10), которая приведет к виду

$$\Delta l \approx -0,44 \Delta x_a + 0,031 \Delta x_a^2.$$

Результаты вычислений по приближенной формуле и по точной формуле (II.7) для несколько расширенных пределов передвижения фокусирующей линзы приведены в табл. 4.

Из таблицы и рис. 23 видно, что при смещении вправо линза проходит через минимум, соответствующий наименьшему расстоянию между сопряженными точками, которое равно  $l_{\min} = 4f' \approx \approx 223,2$  мм. Это и проявляется в том, что при переходе через точку  $V = -1\times$  ( $\Delta x_a \approx 9,3$  мм) направление смещения резкого изображения меняется на обратное, хотя линза перемещается

**Величина смещения изображения,  
вычисленная по приближенной и точной формулам (в мм)**

Номера расчет- ных формул	Величина смещения $\Delta x_d$ в мм									
	-2,00	-1,00	0,00	1,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00
(II.10)	1,04	0,471	0,00	-0,409	-0,756	-1,26	-1,524	-1,53	-1,3	-0,82
(II.7)	1,01	0,472	0,00	-0,411	-0,764	-1,31	-1,66	-1,83	-0,85	-1,73

постоянно в одном направлении — вправо. В точке  $V = -1 \times$  наибольшая величина смещения изображения составит  $-1,85$  мм. Этого достаточно для коррекции гиперметропии до  $+6,5$  дптр при включенном сильном окуляре  $\bar{\Gamma}_2 = 15 \times$ . При слабом окуляре  $\bar{\Gamma}_1 = 7 \times$  смещения изображения на  $-1,85$  мм хватает лишь для коррекции гиперметропии до  $+1,5$  дптр, а требуется коррекция в пределах  $\pm 5$  дптр.

Окончательный вывод состоит в том, что применение рассмотренной фокусирующей линзы для коррекции аметропии нецелесообразно по трем причинам: при слабых окулярах недостаточны пределы коррекции гиперметропии; шкала диоптрийных делений, если ее связать с передвижной линзой, получилась бы неравномерной; при пользовании коррекцией изображение экрана ЭОПа смещается из плоскости полевой диафрагмы окуляра.

В настоящее время для коррекции аметропии в том же приборе используется смещение глазной линзы окуляра, что позволяет избежать первых двух недостатков. Фокусирующая линза теперь неподвижно закрепляется в своем нулевом положении.

**Задача 3.** Рассчитаем допуски на неточность подрезки по высоте опорных торцов корпусов микрообъективов и на отклонение толщины развертки полупентапризмы окулярного тубуса микроскопа МБР-1.

В данном микроскопе используется набор из трех сменных объективов  $8 \times 0,20$ ,  $40 \times 0,65$  и  $90 \times 1,25$  (иммерсионный), которые укреплены на общем поворотном револьверном диске. Объектив  $8 \times 0,20$ , имеющий наибольшее предметное поле зрения, используется в качестве искателя для предварительного

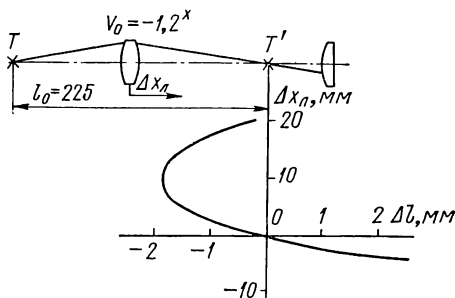


Рис. 23. Влияние смещения фокусирующей линзы на положение изображения

осмотра препарата и выбора участка, подлежащего исследованию с более сильным рабочим объективом. При этом требуется, чтобы после включения вместо объектива-искателя рабочего объектива, например объектива  $40 \times 0,65$ , выбранная точка препарата изображалась бы не далее, чем на расстоянии  $\Delta l = \pm 10$  мм от полевой диафрагмы, в плоскости которой получалось резкое изображение препарата с объективом-искателем.

Такой большой допуск на расфокусировку соответствует за окуляром нерезкости изображения, выражаемой в диоптрийной

$$\text{мере числом } A = \frac{\pm 10 \text{ мм}}{f'_{ок} / 1000} = 0,16 \bar{\Gamma}_{ок}^2,$$

где  $f'_{ок}$  и  $\bar{\Gamma}_{ок}$  — фокусное расстояние и увеличение окуляра. Даже при самом слабом окуляре с  $\bar{\Gamma}_{ок} = 7\times$  размытость изображения может достигать почти 8 *дмтр*. Однако и при этом еще возможно заметить, в какую сторону следует сместить микроскоп для того, чтобы восстановить резкое изображение предмета.

На рис. 24 приведена схема микроскопа с нормальным расстоянием между сопряженными плоскостями  $l = 180$  мм.

Положив, что корпус объектива-искателя с увеличением  $V_u$  подрезан по высоте с отклонением в  $\Delta x_u$  мм,

по формуле (II.8в) найдем, что для восстановления резкости изображения следует микроскоп или предметный столик (как показано на рис. 24, а) сместить по высоте на величину

$$\Delta l_u = (1 - V_u^{-2}) \Delta x_u. \quad (\text{II.19})$$

При включении рабочего объектива с увеличением  $V_p$ , который, предположим, подрезан по высоте точно, т. е. для нормального расстояния  $l = 180$  мм, появится расфокусировка изображения величины (рис. 24, б)

$$\Delta l'_u = \Delta l_u V_p^2. \quad (\text{II.20})$$

Из сравнения с формулой (II.19) для допуска на неточность подрезки по высоте корпуса объектива-искателя получится

$$\Delta x_u = \frac{\Delta l'_u}{(1 - V_u^{-2}) V_p^2}. \quad (\text{II.21})$$

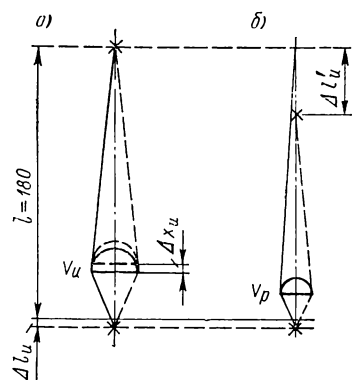


Рис. 24. Влияние смещения микрообъектива из расчетного положения на расфокусировку изображения в микроскопе

Для допуска на неточность подрезки опорного торца рабочего объектива (в предположении, что объектив-искатель подрезан точно) найдем

$$\Delta x_p = \frac{\Delta l'_p}{1 - V_p^2}. \quad (\text{II.22})$$

Допуск на отклонение  $\Delta d$  толщины развертки полупентапризмы, расположенной между объективом и плоскостью изображения, найдем из того условия, что при точно подрезанных по высоте всех сменных объективах это отклонение вызовет расфокусировку изображения на величину  $\Delta l'_n = \frac{n-1}{n} \Delta d$ , где  $n$  — показатель преломления призмы.

Для восстановления резкости изображения с объективом-искателем плоскость предмета придется сместить от нормального положения на величину

$$\Delta l_{nu} = \Delta l'_n V_u^{-2}. \quad (\text{II.23})$$

При переключении на рабочий объектив появится расфокусировка изображения

$$\Delta l'_{np} = \Delta l'_n \left[ \left( \frac{V_p}{V_u} \right)^2 - 1 \right]. \quad (\text{II.24})$$

Для допуска на отклонения толщины развертки призмы, используя формулы (II.23) и (II.24), найдем

$$\Delta d = \Delta l'_{np} \frac{V_u^2}{V_p^2 - V_u^2} \cdot \frac{n}{n-1}. \quad (\text{II.25})$$

Для микроскопа МБР-1, подставляя  $V_u = -8\times$ ;  $V_p = -40\times$ ;  $n = 1,5$  и  $\Delta l'_u = \Delta l'_p = \Delta l'_{np} \leq \pm 10$  мм, получим следующие допуски:  $\Delta x_u \approx \Delta x_p < 0,006$  мм;  $\Delta d < 1,2$  мм.

## 7. Параллакс в оптических приборах.

### Допуски на параллакс, способы его контроля и устранения

**Вывод расчетных формул.** В оптических измерительных приборах плоскость шкалы или сетки должна строго совпадать с плоскостью резкого изображения измеряемого или наблюдаемого предмета. Это требование с заданной точностью выполняется при сборке и юстировке приборов, а при эксплуатации оно нарушается по многим причинам: за счет теплового удлинения (или сжатия) труб, заключающих объектив и сетку прибора; из-за неточной фокусировки прибора на плоскость наводки; из-за продольных аберраций оптической системы.

В любом оптическом приборе в первую очередь следует получить резкое изображение наблюдаемого предмета в заданном месте. Однако часто при отсутствии заметной нерезкости изображения



наблюдается недопустимой величины остаточный параллакс, вызывающий в измерительных приборах ошибки первого порядка.

Параллаксом в оптических приборах называют сдвиг изображения предмета относительно шкалы, сетки или любой фиксированной точки поля зрения, наблюдающийся при поперечных смещениях зрачка глаза в пределах выходного зрачка системы в том случае, когда изображение предмета не совпадает с плоскостью шкалы или сетки.

Параллаксом в широком смысле слова следует назвать взаимный сдвиг неизменно расположенных друг к другу предметов, наблюдаемый во всех случаях, когда угол между главными лучами на эти предметы изменяется.

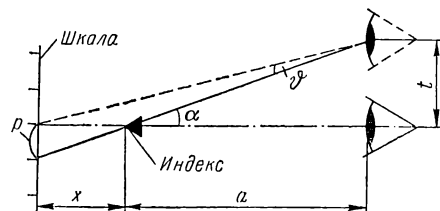


Рис. 25. Параллакс между шкалой и индексом

Параллакс используется для многих измерительных целей в стереокомпараторах, в стереодальномерах, в фотограмметрии, в астрометрии. В настоящем параграфе рассматривается параллакс, вызванный ошибками продольной установки шкал и сеток

в оптических приборах и оказывающий вредное влияние на точность измерений. Рассмотрим простейший случай — параллакс между шкалой и индексом, которые разделены промежутком величины  $x$  (рис. 25).

Если при снятии отсчета глаз наблюдателя сместится в поперечном направлении на расстояние  $t$ , то возникнет ошибка отсчета величины  $p$ , причем

$$p = t \frac{x}{a}. \quad (\text{II.26})$$

Из рисунка видно, что при сдвиге глаза вверх индекс как более близкий предмет сместится по шкале в о б р а т н о м направлении — вниз. Этим признаком пользуются для определения взаимоположения сетки и плоскости изображения при устранении параллакса в оптических приборах.

Из формулы (II. 26) следует, что ошибку отсчета за счет параллакса можно уменьшить, сокращая промежуток  $x$  между индексом и шкалой или ограничивая величину  $t$  поперечного сдвига глаза, поместив, например, перед глазом диафрагму небольшого размера.

Чувствительность глаза к параллаксу выражается углом  $\phi$ , заключенным между главными лучами, один из которых направлен на индекс, а другой — на то деление шкалы, с которым сравнивается положение индекса. Величина  $p$  поперечного сдвига индекса в плоскости шкалы является мерой л и н е й н о г о

параллакса, а угол  $\vartheta$  — мерой углового параллакса. Из рис. 25 с использованием формулы (II. 26) получим

$$\vartheta = \frac{p}{x+a} = \frac{t \frac{x}{a}}{x+a} = \frac{t}{a \left(1 + \frac{a}{x}\right)}. \quad (\text{II. 27})$$

В оптических приборах предмет или сетка за окуляром часто изображаются в бесконечности; для этого случая формулу (II. 27) преобразуем к виду

$$\vartheta_{x \rightarrow \infty} = \frac{t}{a \left(1 + \frac{a}{x}\right)_{x \rightarrow \infty}} = \frac{t}{a} = \alpha. \quad (\text{II. 27a})$$

На рис. 26, а показан параллакс сетки в отсчетной трубе при ее установке на бесконечно далекий предмет, изображающийся

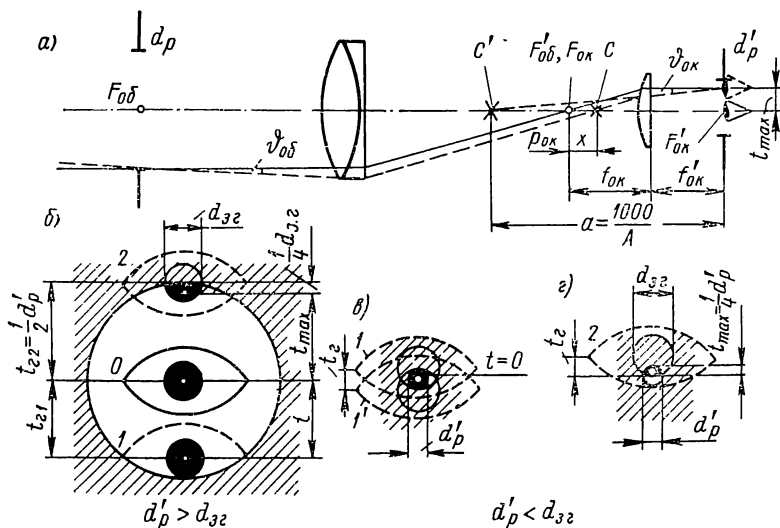


Рис. 26. Параллакс сетки в отсчетной трубе в зависимости от диаметра выходного зрачка

за объективом в плоскости совмещенных фокусов объектива  $F_{об}$  и окуляра  $F_{ок}$ , а за окуляром — в бесконечности. От плоскости изображения сетка удалена на малую величину  $x$ , и за окуляром она изображается на расстоянии  $a$  от его заднего фокуса  $F_{ок}$ , с которым, предположим, совпадает плоскость выходного зрачка. Входным зрачком тогда будет диафрагма, стоящая в переднем фокусе объектива  $F_{об}$ .

При перемещениях глаза в пределах выходного зрачка, диаметр которого  $d'_p$  принят больше диаметра  $d_{3,2}$  зрачка глаза,

наблюдается угловой параллакс. За окуляром величина параллакса равна  $\vartheta_{ок}$ , а перед объективом, в пространстве предметов,  $\vartheta_{об} = \vartheta_{ок}/\Gamma$ , где  $\Gamma$  — угловое увеличение отсчетной трубы.

На рис. 26, б показана зависимость величины углового параллакса  $\vartheta_{ок}$  от диаметра выходного зрачка  $d'_p$  и от диаметра  $d_{з.э}$  зрачка глаза, который при хорошей освещенности равен 2 мм.

Когда выходной зрачок прибора больше зрачка глаза, последний выполняет роль действующего или рабочего выходного зрачка. Рабочим пучком лучей является только та его часть, которая по выходе из прибора целиком попадает в глаз наблюдателя. Сечение такого пучка при различных положениях глаза наблюдателя отмечено на рисунке черным кружком. Главный луч проходит через центр сечения пучка, если оно круглой формы, или через «центр тяжести» сечения пучка произвольной формы. След главного луча отмечен белой точкой в середине черного сечения рабочего пучка лучей. Из рисунка видно, что когда выходной зрачок прибора больше зрачка глаза ( $d'_p > d_{з.э} = 2$  мм), главный луч сдвигается вместе с глазом. Если глаз сдвинется из начального положения  $O$  на оси прибора в положение 1 на величину  $t_{э1}$ , то на столько же сместится и главный луч. При дальнейшем смещении зрачка глаза за пределы выходного зрачка прибора начнется срезание рабочего пучка, и главный луч начнет отставать от движения глаза. В положении 2 пучок лучей будет срезан наполовину, и глаз из начального положения сдвинется на величину  $t_{э2} = \frac{1}{2} d'_p$ ,

а главный луч — только на  $t_{\max} \approx \frac{1}{2} d'_p - \frac{1}{4} d_{з.э}$ , т. е. примерно на  $\frac{1}{2}$  мм меньше. Освещенность изображения при этом упадет вдвое, что будет уже заметно для наблюдателя. Это положение глаза будем считать крайним при работе с прибором.

Таким образом, наибольшее возможное смещение главного луча от центра (при котором наблюдается и наибольший параллакс)

$$t_{\max} = \frac{d'_p - 1}{2}. \quad (\text{II.28})$$

На рис. 26, в, г рассмотрен случай, когда выходной зрачок прибора меньше зрачка глаза ( $d'_p < d_{з.э} = 2$  мм). В этом случае поперечные смещения глаза наблюдателя не вызывают сдвига главного луча до тех пор, пока не наступит срезание выходного зрачка прибора, так как рабочим зрачком здесь является выходной зрачок самого прибора. При сдвиге глаза на величину  $t_э = d_{з.э} - d'_p$  (в положения 1 и 1' на рис. 26, в) главный луч остается на месте и всегда проходит через центр выходного зрачка прибора, поэтому  $t$  будет равно нулю. При большем смещении глаза (рис. 26, г) начнется срезание выходящего пучка, и главный луч начнет мед-

ленно смещаться в ту же сторону. Крайним положением глаза опять будем считать такое, при котором сечение пучка срезается наполовину (положение 2). Наибольший сдвиг главного луча составит

$$t_{\max} = \frac{1}{4} d'_p. \quad (\text{II.28a})$$

Таким образом, при поперечном смещении глаза в пределах выходного зрачка большого размера до самого его края освещенность изображения не меняется, главный луч сдвигается вместе с глазом, и параллакс может возникнуть совершенно незаметно для наблюдателя. При малых выходных зрачках параллакс почти не возникает, а когда он начинает возникать за счет срезания выходящего пучка лучей, тотчас наступает все возрастающее падение освещенности изображения.

Таким образом, параллакс наиболее опасен в измерительных приборах с большим выходным зрачком, превышающим 2 мм.

Величину наибольшего углового параллакса в оптических приборах можно вычислить по формуле (II. 27a), в которую следует подставить наибольшую величину сдвига главного луча  $t_{\max}$  из формул (II. 28) или (II. 28a) — в зависимости от размера выходного зрачка прибора.

В оптических приборах продольные отрезки удобно выражать в диоптрийной мере; например, если расстояние  $a$  (в миллиметрах) до изображения сетки за окуляром выразить числом диоптрий  $A$ , то будет

$$a = \frac{1000}{A}.$$

Теперь формулу (II. 27a) можно привести к виду

$$\varphi_{\text{ок}} = \frac{t_{\max}}{a} = \frac{t_{\max} A}{1000}. \quad (\text{II.27б})$$

**Расчет допусков на продольную установку шкал и сеток.** Продольная установка шкал и сеток в приборах должна удовлетворять двум следующим требованиям.

1. Сетка (или шкала) и изображение предмета, которое на нее проектируется, должны быть видны одновременно резко. Это требование следует предъявлять ко всем приборам, в особенности к визуальным, и его можно назвать обязательным, минимальным или общим требованием.

2. Второе требование вытекает из точности измерения и может быть регламентировано допустимым угловым параллаксом (телескопические системы) или допустимым линейным параллаксом (отсчетные микроскопы, проекторы).

Может оказаться, что вполне достаточно выполнить лишь одно первое требование об одновременной резкости изображений предмета и сетки при наблюдении глазом через окуляр, если

остаточный параллакс не превысит величины, допустимой из требований точности измерения (второе требование). В противном случае следует уточнить продольную установку сетки.

В соответствии с этим в первом случае допуск на установку сетки задается в диоптрийной мере ( $A_{\partial on}$ ), а во втором случае — величиной допустимого параллакса, например величиной  $(\vartheta_{об})_{\partial on}$  (рис. 26, а).

Как известно, все удаленные предметы, начиная с некоторого расстояния  $x_{\infty}$  и до бесконечности, представляются наблюдателю одинаково резкими. Это расстояние  $x_{\infty}$  называется «практической бесконечностью», и оно равно

$$x_{\infty} = 1,25 (d_p)^2 \text{ м}, \quad (\text{II. 29})$$

где  $d_p$  — диаметр рабочего входного зрачка телескопической системы в мм.

Эта формула получается, если найти расстояние до изображения сетки  $C$ , которая от фокуса объектива  $F'_{об}$  удалена на величину вероятной погрешности продольной фокусировки  $\Delta z$  по формуле (I. 13).

Применяя формулу (II. 29) к пространству изображений за окуляром, напомним

$$x'_{\infty} = 1,25 (d'_p)^2 \text{ м}. \quad (\text{II. 29a})$$

Выражая допуск на продольную установку сетки (из условия одновременной резкости) величиной расстояния в диоптрийной мере до ее изображения за окуляром (рис. 26, а), получим

$$A_{резк} \leq \frac{1}{x'_{\infty}} = \frac{0,8}{(d'_p)^2} \text{ дптр}, \quad (\text{II. 30})$$

где  $d'_p$  — диаметр рабочего выходного зрачка.

При выходном зрачке прибора больше зрачка глаза ( $d'_p > d_{з. з} = 2 \text{ мм}$ )

$$A_{резк} \leq \frac{0,8}{(d'_p)^2} = 0,2 \text{ дптр} = \text{const}, \quad (\text{II. 30a})$$

т. е. допуск на неточность установки сетки из условия одновременной резкости для всех приборов с выходным зрачком больше 2 мм можно принимать одинаковым и равным 0,2 дптр.

При малых выходных зрачках — меньше 2 мм — следует пользоваться формулой (II. 30), которая даст переменный по величине допуск и всегда больше 0,2 дптр.

По величине допуска  $A_{резк}$  за окуляром легко получить допустимую величину  $x_{\partial on}$  смещения сетки из плоскости изображения перед окуляром (рис. 26, а), так как

$$x_{\partial on} \leq \frac{f'^2_{ок}}{a} = \frac{f'^2_{ок} A_{резк}}{1000}. \quad (\text{II. 31})$$

При установке сетки по признаку одновременной резкости с точностью  $A_{резк}$  величину остаточного параллакса следует сравнить с допуском, полученным из требований точности измерения. Остаточный параллакс вычисляется по следующим формулам:

а) остаточный угловой параллакс в отсчетной трубе в угловых минутах по формуле (II. 27б) равен

$$(\vartheta_{ок})'_{отг} = \frac{t_{\max} A_{резк}}{1000} 3440 \approx 3,4' t_{\max} A_{резк}; \quad (II.32)$$

б) остаточный линейный параллакс в отсчетном микроскопе, в плоскости сетки перед окуляром, по формуле (II. 26) равен (ср. рис. 26, а)

$$(p_{ок})_{отг} = t_{\max} \frac{x}{f'_{ок}} = (\vartheta_{ок})'_{отг} f'_{ок} = \frac{t_{\max} A_{резк}}{1000} f'_{ок}. \quad (II.33)$$

Величина остаточного параллакса не должна превосходить следующих допусков:

в отсчетной трубе

$$(\vartheta_{ок})'_{отг} \leq \vartheta'_{дон} \Gamma; \quad (II.32a)$$

в отсчетном микроскопе

$$(p_{ок})_{отг} \leq p_{дон} V_{об}. \quad (II.33a)$$

С правой стороны обоих неравенств стоят величины допустимого параллакса в пространстве предметов, пересчитанные в пространство изображений.

Если при установке сетки на резкость неравенства формул (II. 32a) и (II. 33a) не выполняются, то допуск на несовмещение сетки с плоскостью изображения надо находить из следующих формул:

а) для отсчетной трубы

$$x_{дон} \leq \frac{f'^2_{ок} \vartheta'_{дон} \Gamma}{3440 t_{\max}}; \quad (II.34)$$

б) для отсчетного микроскопа

$$x_{дон} \leq \frac{f'_{ок}}{t_{\max}} p_{дон} V_{об}, \quad (II.35)$$

где  $V_{об}$  — линейное увеличение объектива микроскопа.

Последние две формулы получаются из формул (II. 32) и (II. 33), если принять, что остаточный параллакс равен допустимому.

**Контроль продольной установки шкал и сеток.** Несовпадение сетки с плоскостью изображения предмета контролируется различными способами, но все они основаны или на наблюдении не-одновременной резкости изображений сетки и предмета, или на выявлении остаточного параллакса.

Схемы контроля установки сетки в испытываемой трубе приведены на рис. 27. Аналогичные схемы могут быть применены для контроля установки сетки в отсчетном микроскопе, не имеющем перефокусировки на предмет. Схемы I и II основаны на измерении продольного расстояния между резкими изображениями сетки испытываемого прибора ИП и сетки коллиматора К или трубы Т. Для измерения разности расстояний между изображениями сеток служат диоптрийная трубка ДТ за окуляром испытываемого прибора (схема I) или отсчетная труба Т с фокусировкой, установленная перед объективом прибора (схема II). В первом случае измеряется величина  $A_{ДТ}$ , во втором — в  $\Gamma^2$  раз меньшая величина  $A_T$ , где

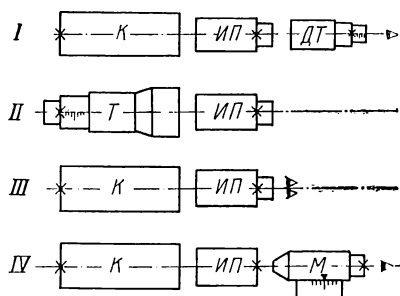


Рис. 27. Схемы контроля параллельности в трубе

увеличение прибора. По схеме III контролируется остаточный угловой параллакс. Глаз наблюдателя перемещается в пределах выходного зрачка, и по угломерной шкале сетки коллиматора К измеряется величина углового параллакса сетки испытываемого прибора со стороны объектива  $\phi_{об}$  (см. рис. 26, а). На схеме IV показан цеховой способ измерения погрешности продольной установки сетки, при котором требуется частичная разборка прибора (на рисунке удален окуляр). Отсчетный микроскоп М последовательно фокусируется на резкое изображение сетки коллиматора, а затем непосредственно на сетку юстируемого прибора; величина перемещения микроскопа, равная величине  $x$ , отсчитывается по шкале продольной фокусировки.

Чувствительность методов можно сравнить по величине предельно малой разности сходимостей между изображениями предмета и сетки за окуляром испытываемого прибора, еще замечаемой при контроле. При пользовании признаком одновременной резкости чувствительность контроля может быть подсчитана по формуле (II 30), в которую в качестве размера рабочего выходного зрачка следует подставить размер входного зрачка диоптрийной трубки. Обычно  $d_p \approx 8$  мм, так как увеличение трубки берется около  $4\times$ ; чувствительность контроля по схеме I равна

$$A_{ДТ} = \frac{0,8}{(d'_p)^2} \text{ дптр.} \quad (\text{II.36})$$

На первый взгляд может показаться, что схема II обеспечивает более высокую чувствительность контроля. Однако, если пересчитать чувствительность фокусировки  $A_T$  отсчетной трубы Т, которая ограничивается размером входного зрачка  $d_p$  испытываемого прибора (предполагается, что входной зрачок отсчетной

трубы больше по величине), за окуляр прибора, то получим величину  $A'_T$ , равную величине  $A_{dT}$  из формулы (II. 36), так как

$$A'_T = A_T \Gamma^2 = \frac{0,8}{(d_p)^2} \Gamma^2 = \frac{0,8}{(d'_p)^2},$$

откуда и следует, что обе схемы дают одинаковую чувствительность контроля параллакса<sup>1</sup>.

Чувствительность контроля по остаточному параллаксу (схема III) в диоптрийной мере определится из формулы (II. 27б)

$$A_{нар} = \frac{2000\vartheta_{ок}}{d'_p - 1}. \quad (\text{II. 37})$$

Очевидно, что при некотором размере выходного зрачка прибора чувствительность обоих методов окажется одинаковой. Известно, что чувствительность поперечных установок оптических приборов зависит не только от диаметра выходного зрачка, но в очень большой мере также и от формы штрихов сетки и вида объекта [17, стр. 10]. Поэтому можно ожидать, что при определенных условиях метод параллакса и метод установки на резкость обеспечат одинаковую чувствительность при диаметре выходного зрачка, равном 2 мм, и тогда

$$A_{резк} = A_{нар} = 0,2 \, \text{дптр} = 2000\vartheta_{ок}.$$

Отсюда для чувствительности глаза к угловому параллаксу получится  $\vartheta''_{ок} = 20''$ , что соответствует действительности.

Подставляя полученное значение в формулу (II. 37), получим

$$A_{нар} = \frac{0,2}{d'_p - 1} \, \text{дптр}. \quad (\text{II. 37a})$$

Из сравнения формул (II. 37a) и (II. 36) видно, что чувствительность обоих методов возрастает с увеличением диаметра выходного зрачка прибора. Заметим, что чувствительность контроля углового параллакса можно увеличить вдвое, смещая глаз не от центра к краю зрачка, а от одного края к другому, противоположному (см. рис. 26, б). Тогда метод параллакса даст большую точность, чем метод одновременной резкости. Напомним также, что при выходном зрачке больше 2 мм, работая по первому методу, необходимо пользоваться диоптрийной трубкой, у которой цена деления шкалы обычно равна 0,25 дптр, редко — 0,1 дптр. При очень больших выходных зрачках (ввиду ограниченности размеров входного зрачка диоптрийной трубки) метод параллакса обеспечит большую точность, что видно также из табл. 5, где приведены расчеты для некоторых типичных случаев устранения параллакса.

<sup>1</sup> Схема II может оказаться выгоднее схемы I, если за сеткой испытуемого прибора стоит плохо скорректированная система, например панкратическая.



Расчет допусков на параллакс  
и сравнение чувствительности методов его контроля

Данные и вычисленные величины	Приборы				
	Панорама ПГ	Винтовочный прицел ПУ	Коллиматорный визир	Отсчетная труба	Отсчетный микроскоп
Диаметр входного зрачка $d_p$ в мм	16	—	40	60	—
Угловое увеличение $\Gamma$ (для микроскопа—линейное увеличение объектива $V_{об}$ )	$4\times$	$3,5\times$	$1\times$	$30\times$	$—8\times$
Допуск на параллакс $(\vartheta_{об})_{доп}$ (для микроскопа— $\rho_{доп}$ )	$1'$	$0,5'$	$1'$	$1''$	$0,001 \text{ мм}$
Диаметр выходного зрачка $d_p$ в мм	4	6,5	40	2	1
Наибольшая величина смещения главного луча $t_{max}$ в мм	1,5	2,75	19,5	0,5	0,25
Допуск из условия одновременной резкости $A_{резк}$ в дптр	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8
Остаточный угловой параллакс $(\vartheta_{ок})_{ост}$ [для микроскопа— $(\rho_{ок})_{ост}$ ]	$1'$	$1,9'$	$13'$	$0,34'$	$0,004 \text{ мм}$
Допустимый угловой параллакс $(\vartheta_{об})_{доп} \Gamma$ [для микроскопа— $(\rho_{ок})_{доп}$ ]	$4'$	$1,8'$	$1'$	$0,5'$	$0,008 \text{ мм}$
Способ задания и величина допуска на параллакс сетки	$A_{доп} \leq \leq 0,2 \text{ дптр}$	$(\vartheta_{об})_{доп} \leq \leq 0,5'$ или $A_{доп} < < 0,2 \text{ дптр}$	$\vartheta_{доп} \leq \leq 1'$	$A_{доп} \leq \leq 0,2 \text{ дптр}$	$A_{доп} \leq \leq 0,8 \text{ дптр}$
Фокусное расстояние окуляра $f'_{ок}$ в мм	20	20	100	20	20
Допуск на точность продольной установки сетки $x_{доп}$ в мм	0,08	0,08	0,15	0,08	0,32
Чувствительность контроля с помощью диоптрийной трубки $A_{ДТ}$ в дптр	0,05	0,019	0,012	0,2	0,8
Чувствительность контроля по остаточному параллаксу $A_{пар}$ в дптр	0,066	0,036	0,005	0,2	—
Отношение $A_{пар} : A_{ДТ}$	1,3	1,9	0,4	1	—

Рассмотрение таблицы и вышеизложенное позволяют сделать следующие практические выводы.

1. При несовпадении сетки с плоскостью изображения в приборах с большим выходным зрачком (более 2 мм) параллакс возникает незаметно, так как освещенность изображения при сдвигах глаза в пределах выходного зрачка не изменяется, а в приборах с малым выходным зрачком (меньше 2 мм) параллакс почти не возникает.

2. Во всех визуальных приборах сетку следует устанавливать по крайней мере так, чтобы она была видна одновременно резко с изображением предмета (минимальное общее требование). Если при этом остаточный параллакс больше допустимого, то следует уточнить продольную установку сетки в соответствии с допуском, полученным из требований точности измерения (специальное требование).

3. Правильность установки сетки в приборах с малым выходным зрачком лучше контролировать по признаку одновременной резкости сетки и изображения предмета; в приборах с большим выходным зрачком положение сетки выгоднее контролировать по остаточному параллаксу. Установку сетки в приборах с выходным зрачком среднего размера можно контролировать обоими методами.

В последней строке табл. 5 сравнивается чувствительность указанных методов контроля. Следует иметь в виду, что точность измерения диоптрийной трубкой значительно ниже приведенной в таблице вследствие того, что цена деления ее шкалы обычно грубее 0,1 дптр.

Параллакс устраняется взаимным смещением сетки или объектива в нужную сторону; например, в случае, изображенном на рис. 26, а, объектив следует приблизить к сетке ввинчиванием оправы объектива на резьбе, подрезкой опорного торца оправы или трубы и т. д. В крупносерийном и массовом производстве применяется результативная обработка—подрезка в размер оправы на специальном настроенном станке, что подробно описано в работе [38].

На практике встречаются особые случаи устранения параллакса, например в оптических приборах, имеющих систему перемещения увеличения, в стереодальномерах, в системах с большой остаточной продольной аберрацией, где наблюдается неустраняемый параллакс, когда сетка находится внутри каустики. К этим случаям также могут быть применены формулы и выводы, полученные в настоящем параграфе.

## **8. Юстировка масштаба изображения и увеличения оптических систем**

Во многих случаях в заданной плоскости требуется обеспечить не только резкость изображения, но и номинальное значение его увеличения. Это относится к отсчетным микроскопам, профильным

проекторам, отсчетным трубам. Иногда необходимо с большой точностью обеспечить равенство увеличений в двух совместно работающих системах, как, например, в коллиматорах линейных измерительных машин [39], в трубах телескопов дальномеров [53], во всех бинокулярных системах. В дифференциальных отсчетных системах надо выдерживать строго обусловленную разность увеличений в ветвях [7]. Выполнение перечисленных требований обеспечивается специальной юстировкой увеличения и масштаба изображения.

Отсчетные микроскопы для точной оценки долей делений основных линейных или круговых шкал широко применяются во многих измерительных приборах — в линейных измерительных машинах, в измерительных и инструментальных микроскопах, гониометрах, теодолитах и т. д. Отсчетные микроскопы имеют большое разнообразие схем и конструкций, но все они в основном отличаются лишь устройством отсчетных окулярных микрометров. Соответственно различают:

- 1) шкаловые окуляр-микрометры;
- 2) винтовые окуляр-микрометры, как, например, стандартные окуляр-микрометры МОВ 1—15 $\times$  по ГОСТу 7865—56;
- 3) оптические окуляр-микрометры:
  - а) со спиральной шкалой-нониусом, как, например, серийный оптический спиральный микрометр типа ОМС;
  - б) с поворотной плоскопараллельной стеклянной пластинкой или с двумя поворотными пластинками, применяемые в оптических теодолитах;
  - в) с поворотными или передвижными клиньями.

Устройство окуляр-микрометров описано в специальной литературе [7; 9; 11; 15; 27].

Требования к отсчетным микроскопам и трубам, в которых используются окуляр-микрометры любых типов, можно сформулировать в общем виде. При юстировке отсчетных микроскопов, труб и измерительных проекторов необходимо выполнить два основных требования:

- 1) получить резкое изображение объекта измерения в поле зрения и не допустить параллакса сетки;
- 2) обеспечить номинальное (расчетное) увеличение или масштаб изображения, т. е. устранить так называемый рен шкалы.

На рис. 28, а показана схема шкалового отсчетного микроскопа, где обозначено: *ОШ* — основная шкала; *1* — микрообъектив в корпусе; *2* — тубус микроскопа; *3* — окуляр со шкалой *ш* малых делений; *f'* — фокусное расстояние микрообъектива;  $\Delta$  — оптический интервал, равный расстоянию от заднего фокуса *F'* микрообъектива до изображения основной шкалы; *l* — расчетное расстояние между сопряженными плоскостями предмета и изображения.

Установка микроскопа на резкость изображения может быть выполнена тремя способами (рис. 28):

- 1) продольным смещением всего микроскопа по отношению к основной шкале *ОШ*;
- 2) смещением только одного объектива;
- 3) смещением только одной окулярной шкалы.

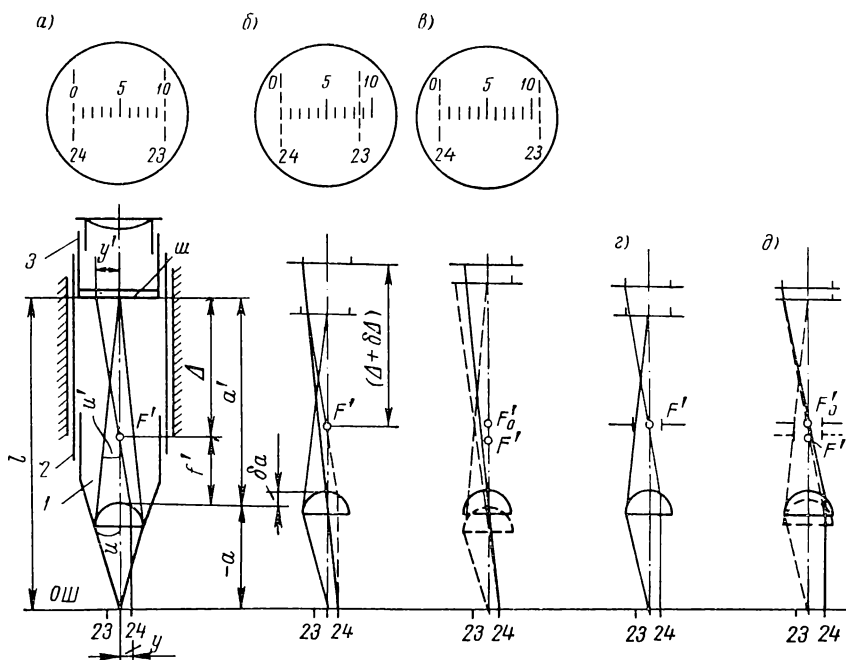


Рис. 28. Юстировка отсчетного микроскопа

Для фокусировки на резкость отсчетной трубы, если объект находится в бесконечности, можно воспользоваться лишь двумя последними подвижками, которые в этом случае совершенно равноценны.

Выбор способа фокусировки определяется конструктивной схемой прибора, а пределы юстировочных подвижек ограничиваются также и оптическими характеристиками микрообъективов.

На рис. 29 показаны три возможных варианта конструктивной схемы отсчетного микроскопа или измерительного проектора.

В первом варианте (рис. 29, а) закреплена плоскость предмета, а весь микроскоп можно смещать вдоль оси. Так, например, в гониометре плоскость лимба неподвижна по отношению к его наружному корпусу, несущему отсчетные микроскопы. Для фокусировки на резкость здесь можно использовать любую из трех перечисленных выше подвижек.

Во втором варианте (рис. 29, б), как, например, сделано в измерительных проекторах, расстояние между плоскостью экрана и опорной плоскостью объектива конструктивно не может быть изменено, т. е.  $l_3 = \text{const}$ . Для фокусировки изображения предмета на резкость в этом случае предусматривается передвижение предметного стола, например его вертикальный подъем, вдоль оси объектива. Таким образом, для фокусировки на резкость здесь используется первая из трех вышеуказанных подвижек.

В третьем варианте (рис. 29, в) закреплены обе сопряженные плоскости — предметная и плоскость изображения (или шкалы  $ш$ ),

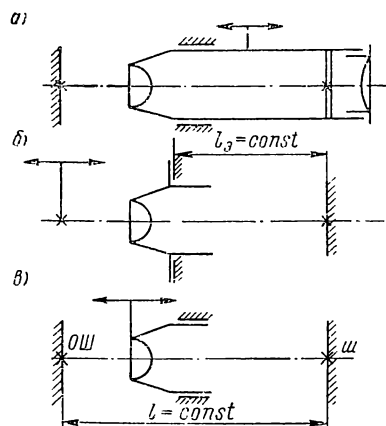


Рис. 29. Конструктивные схемы отсчетных микроскопов

так что здесь расстояние между ними  $l = \text{const}$ . Этот вариант схемы встречается довольно редко (применен, например, в рентгеногониометре ГУР-3), так как очень неудобен в юстировке. Для фокусировки на резкость изображения здесь можно использовать лишь смещение объектива — вторую из названных выше подвижек.

Любая из юстировочных подвижек влияет на качество изображения системы, так как объективы скорректированы для строго определенного расстояния между сопряженными плоскостями. Это расстояние можно изменять от расчетной величины лишь в небольших пределах.

В зависимости от выбора способа регулировки резкости изображения — подвижкой объектива или окуляра вместе с сеткой — определяются и чувствительность, и пределы действия фокусирующих устройств.

Рассмотрим юстировку увеличения и масштаба изображения. В отсчетных микроскопах и в измерительных проекторах, как правило, применяется телецентрический ход главных лучей в пространстве предметов. Это позволяет исключить влияние погрешностей продольной фокусировки на масштаб изображения и, кроме того, сделать юстировку самого масштаба изображения независимой от установки на резкость.

Предположим вначале, что после фокусировки микроскопа на резкость параллакс между штрихами основной шкалы  $ОШ$  и окулярной шкалы  $ш$  (рис. 28, а) отсутствует. При этом масштаб изображения  $M$  непосредственно равен линейному увеличению микрообъектива  $V$ , которое можно выразить следующими пятью соотношениями:

$$M = V = \frac{y'}{y} = -\frac{\Delta}{f'} = \frac{f'}{x} = \frac{a'}{a} = \frac{u}{u'}, \quad (\text{II.38})$$

где  $y$  и  $y'$  — размер предмета (или шкалы), перпендикулярного оптической оси микроскопа и стоящего на этой оси, и соответственно размер изображения того же предмета через микрообъектив;

$f'$  и  $\Delta$  — фокусное расстояние микрообъектива и оптический интервал микроскопа;

$x$  — расстояние от переднего фокуса объектива до плоскости предмета;

$a$  и  $a'$  — передний (предметный) и задний (картинный) отрезки, т. е. соответственно расстояния от передней узловой точки микрообъектива до предмета и от задней узловой точки до плоскости изображения;

$u$  и  $u'$  — передний и задний апертурные углы пучка лучей, создающего изображение сопряженной осевой точки предмета.

Если предположение об отсутствии параллакса в процессе регулировки масштаба изображения или, что в данном случае то же самое, в процессе юстировки увеличения микрообъектива всегда остается в силе, то из последней формулы следует, что масштаб изображения или увеличение можно юстировать только двумя способами:

1) изменением оптического интервала  $\Delta$ ;

2) изменением величины фокусного расстояния  $f'$  микрообъектива.

Логарифмическим дифференцированием формулы (II. 38) можно найти точность выполнения каждой из этих операций в соответствии с заданным допуском на отклонения масштаба изображения. В результате получим

$$\frac{\delta M}{M} = \frac{\delta V}{V} = \frac{\delta \Delta}{\Delta} = -\frac{\delta f'}{f'}, \quad (\text{II. 39})$$

откуда для первого из двух способов юстировки увеличения найдем

$$\delta \Delta = \Delta \frac{\delta V}{V} \quad (\text{II. 40})$$

и соответственно для второго способа

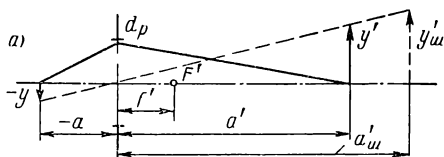
$$\delta f' = -f' \frac{\delta V}{V}. \quad (\text{II. 41})$$

На самом деле сопряженное изображение предмета не совпадает точно с плоскостью шкалы, поэтому возможен и третий способ изменения масштаба — смещением всего микроскопа; при нетелецентрическом ходе лучей изменение предметного расстояния  $a$  вызовет соответствующее изменение масштаба изображения.

При наличии параллакса последние три формулы (II. 39) — (II. 41) могут быть несправедливы, так как они выведены для сопряженных точек и плоскостей.

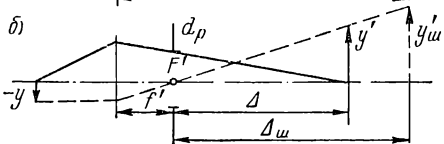
Обозначив размер изображения предмета в плоскости окулярной шкалы через  $y'_{ш}$ , расстояние до плоскости окулярной шкалы от заднего фокуса объектива  $F'$  через  $\Delta_{ш}$  и от задней узловой точки микрообъектива через  $a'_{ш}$ , для масштаба изображения по аналогии с формулой (II. 38) можем написать следующие соотношения:

в случае, когда входной зрачок микроскопа совпадает с передней узловой точкой объектива (рис. 30, а),



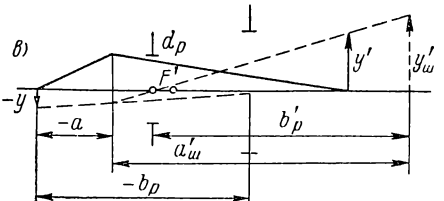
$$M = \frac{y'_{ш}}{y} = \frac{a'_{ш}}{a}; \quad (\text{II. 42a})$$

в случае, когда в пространстве предметов осуществлен телецентрический ход главных лучей (входной зрачок в бесконечности, а выходной зрачок объектива совпадает с его задним фокусом  $F'$ , как на рис. 30, б),



$$M = \frac{y'_{ш}}{y} = \frac{\Delta_{ш}}{f'}; \quad (\text{II. 42б})$$

в случае произвольного расположения входного зрачка (рис. 30, в)



$$M = \frac{y'_{ш}}{y} = \frac{b'_p}{b_p} \cdot \frac{b_p - a}{a'_{ш} - b_p}, \quad (\text{II. 42в})$$

Рис. 30. Влияние положения действующей диафрагмы на масштаб изображения

где  $b_p$  и  $b'_p$  — расстояния от входного зрачка до плоскости предмета и от выходного зрачка до плоскости шкалы соответственно.

Из общей формулы (II. 42в) получаются формулы (II. 42а) и (II. 42б) для обоих частных случаев.

Видно, что при телецентрическом ходе лучей масштаб изображения нельзя регулировать изменением предметного расстояния  $a$ . Для этой цели остаются только две возможности — изменение расстояния  $\Delta_{ш}$  или изменение величины фокусного расстояния объектива  $f'$ .

Для варианта, приведенного на рис. 29, в, остается лишь вторая из названных возможностей; так, например, увеличение в отсчетном микроскопе прибора ГУР-3 можно регулировать только изменением фокусного расстояния микрообъектива за счет воздушного промежутка между линзами.

Дифференцированием формул (II. 42а)—(II. 42в) можно найти влияние юстировочных подвижек на изменение масштаба изо-

бражения. Последовательность юстировки отсчетного микроскопа схематически показана на рис. 28.

Из рис. 28, б видно, что смещение объектива из номинального положения вверх на величину  $\delta a$  при отсутствии параллакса приводит к уменьшению масштаба изображения: одно деление основной шкалы *ОШ* не перекрывает всей длины окулярной шкалы.

При нетелецентрическом ходе главных лучей, увеличив расстояние  $\Delta_{ш}$  до шкалы на  $\delta\Delta$ , так что  $\Delta_{ш} = \Delta + \delta\Delta$ , можно получить номинальный масштаб изображения, но основная шкала будет изображаться нерезко. Для восстановления резкости необходимо сместить объектив или весь микроскоп вниз, как это показано на рис. 28, в. Но при этом возрастет увеличение микрообъектива, т. е. нарушится первая юстировка.

Отсюда следует, что юстировочные подвижки окуляра со шкалой или микрообъектива являются взаимозависимыми. В таком случае удовлетворить обоим требованиям к отсчетному микроскопу, т. е. добиться одновременно резкости изображения и заданного увеличения шкалы, можно лишь путем последовательных приближений, что требует много времени.

На рис. 28, г показано такое же взаимоположение объектива и шкал, как на рис. 28, б, но теперь ход главных лучей принят телецентрический. Масштаб изображения регулируется удлинением тубуса. Сравнение рис. 28, в и 28, д показывает, что при телецентрическом ходе требуется меньшее удлинение тубуса, чем при обычном ходе главных лучей.

На рис. 28, д показано, что при смещении микроскопа вниз для восстановления резкости в данном случае масштаб изображения не изменяется, т. е. при телецентрическом ходе юстировка увеличения и резкости изображения становится независимой. Если же резкость изображения восстанавливать смещением одного лишь микрообъектива, то масштаб изображения будет вновь изменяться, правда, незначительно.

Рассмотрим несколько подробнее юстировку отсчетного микроскопа ГУР-3 с фиксированным расстоянием между плоскостью основной шкалы *ОШ*, опорной плоскостью объектива и плоскостью шкалы *ш* (рис. 29, в). В данном случае основная шкала *ОШ* — лимб гониометра — имеет градусные деления, отсчетная шкала *ш* имеет 60 минутных делений для снятия отсчетов на глаз с точностью до  $0', 1$ . Объектив  $7,91 \times 0,15$  с телецентрическим ходом лучей в пространстве предметов состоит из двух пар склеенных линз. Фокусное расстояние таких объективов при изготовлении может отклоняться до  $\pm 2\%$  и более от расчетной величины. Расстояние  $l$  между сопряженными плоскостями шкал *ОШ* и *ш* прием равным 200 мм без учета расстояния  $\delta$  между главными плоскостями микрообъектива.

При сборке масштаб изображения регулируется с такой точностью, чтобы изображение одного градусного деления лимба



равнялось длине всей минутной шкалы в пределах толщины штриха, что примерно соответствует одной десятой интервала малого деления, следовательно, допустима погрешность масштаба изображения  $\frac{\delta M}{M} \leq \pm \frac{1}{600}$ .

При расчете допуска на точность фокусировки изображения необходимо исходить из величины остаточной нерезкости и величины остаточного параллакса. В данном случае шкалы *ОШ* и *ш* последующей системой проектируются на матовый экран, вследствие чего параллакс между их изображениями не обнаруживается. Величину допустимой расфокусировки изображения можно найти по формуле (I. 13)

$$\Delta z = \frac{0,2}{0,15^2} \approx 10 \text{ мкм} = 0,01 \text{ мм}.$$

Правильное положение объектива обеспечивается подрезкой опорного торца его корпуса или прокладного кольца. Величина  $\Delta z = \pm 0,01 \text{ мм}$  в этом случае соответствует также и допуску на подрезку торца или подгонку кольца по толщине.

Итак, задача сводится к тому, чтобы при заданном неизменном расстоянии между сопряженными плоскостями ( $l \approx 200 \text{ мм}$ ) обеспечить необходимый масштаб изображения с точностью не ниже  $\pm \frac{1}{600}$  и резкость изображения с допуском  $\Delta z = \pm 0,01 \text{ мм}$  при условии, что фокусное расстояние микрообъективов может отклоняться от расчетной величины на  $\frac{\Delta f'}{f'} = \pm 0,02$ .

Поскольку в нашем случае расстояние  $l$  между сопряженными плоскостями не может быть изменено при юстировке, то

$$\Delta l = 0 = (2 - V - V^{-1}) \Delta f' + (V^{-2} - 1) \Delta V f',$$

откуда найдем

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1 - V}{1 + V} \cdot \frac{\Delta f'}{f'}. \quad (\text{II.43})$$

Фокусное расстояние микрообъектива  $f'$  через фокусные расстояния его двух компонентов  $f'_1$  и  $f'_2$  и расстояние  $d$  между их совмещенными главными плоскостями выражается формулой

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2}.$$

При подрезке промежуточного кольца, т. е. при изменении расстояния  $d$  между линзами, изменяется и фокусное расстояние  $f'$  объектива в целом согласно формуле

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{f'}{f'_1 f'_2} \Delta d. \quad (\text{II.44})$$

Из формулы (II. 43) найдем, как влияет подрезка кольца на масштаб изображения, а именно:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1-V}{1+V} \cdot \frac{\Delta d}{f'_1 + f'_2 - d}, \quad (\text{II.45})$$

откуда

$$\Delta d = \frac{1+V}{1-V} (f'_1 + f'_2 - d) \frac{\Delta V}{V}. \quad (\text{II.46})$$

Подставляя данные для микрообъектива ГУР-3, получим

$$\Delta d \approx -40 \frac{\Delta V}{V}.$$

Отсюда получается известное из опыта соотношение, что для изменения масштаба изображения градусной шкалы лимба ГУР-3 на  $\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{60}$  необходимо изменить расстояние между линзами объектива на величину  $\Delta d \approx 0,7$  мм. Чтобы увеличить масштаб изображения, фокусное расстояние  $f'$  объектива необходимо уменьшить, для чего следует уменьшить расстояние  $d$ , т. е. подрезать прокладное кольцо между линзами микрообъектива.

Несмотря на то, что в отсчетном микроскопе осуществлен телецентрический ход, для чего действующая диафрагма помещена в задней фокальной плоскости объектива, при регулировке резкости изображения его масштаб здесь несколько меняется, так как при смещении объектива совместно с этой диафрагмой расстояние  $\Delta_{ш}$  между выходным зрчком и шкалой  $ш$  на столько же изменяется.

Это расстояние равно 160 мм; допустимо его изменение не более  $\frac{1}{600}$  его величины, т. е. не более  $\pm 0,2$  мм. Если же для восстановления резкости потребуется смещение объектива большей величины, то придется вновь изменять его фокусное расстояние повторной подгонкой воздушного промежутка между линзами.

В последней модели микроскопа рентгеногониометра ГУР-4 расстояние между шкалами  $ОШ$  и  $ш$  можно регулировать при юстировке, что значительно ее упрощает.

Юстировка масштаба изображения измерительных или профильных проекторов от рассмотренного случая отличается тем, что в проекторах почти всегда применяются сменные объективы для получения различных увеличений и что рабочее поле изображения здесь значительно больше, чем в микроскопах, а угловая апертура выходящих пучков, наоборот, в проекционных объективах значительно меньше, чем в микрообъективах.

Первое обстоятельство — наличие комплекта сменных объективов — вынуждает устройства для регулировки масштаба изображения конструктивно связывать с самими объективами.

На рис. 31, а, б, в схематически изображена конструкция трех сменных объективов  $10\times$ ,  $20\times$  и  $50\times$  большого проектора БП. На каждом из них показано резьбовое опорное кольцо  $K$ , торец  $T$  которого определяет продольное положение объектива в корпусе проектора. Подвижкой этого кольца на резьбе можно изменять длину заднего отрезка  $x'$  объектива проектора. При большом расстоянии по ходу луча между объективом и экраном и при сравнительно невысокой точности изменений в плоскости экрана требо-

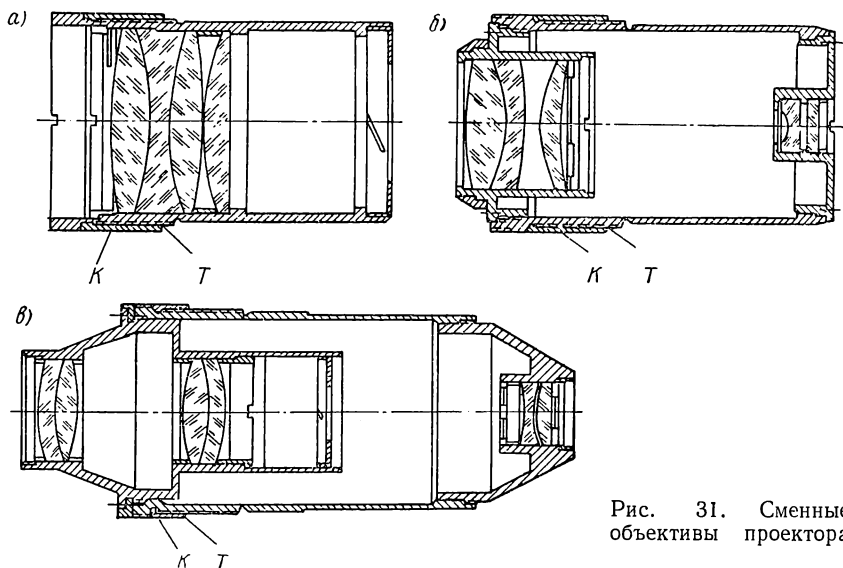


Рис. 31. Сменные объективы проектора

вания к точности регулировки масштаба изображения или к точности регулировки линейного увеличения проекционных объективов не очень высоки. В проекторе БП, например, расстояние от выходного зрачка который для получения телецентрического хода всегда совпадает с задним фокусом объектива, до экрана  $x' \approx 1800$  мм.

Согласно требованиям инструкции [39] относительная точность регулировки увеличения проекционных объективов должна быть не ниже  $\pm 0,1\%$ . Фокусное расстояние этих объективов с учетом сложности их конструкции может отклоняться от расчетной величины на несколько процентов. Это отклонение можно компенсировать соответствующим изменением расстояния — подвижкой упомянутого опорного кольца.

Дифференцированием формулы (II. 38) получим

$$\frac{\delta V}{V} = 0 = \frac{\delta x'}{x'} - \frac{\delta f'}{f'}$$

откуда

$$\frac{\delta x'}{x'} = \frac{\delta f'}{f'}. \quad (\text{II. 47})$$

Пределы подвижки опорных колец объективов получаются довольно большие, так как в проекторах один процент отрезка  $x'$  составляет величину около  $\pm 20$  мм.

Здесь особенно наглядно можно показать различие между юстировкой масштаба изображения на экране проектора и соответствующим изменением увеличения в сопряженных плоскостях.

Определим для этого необходимую точность регулировки положения упорного кольца  $K$  проекционных объективов. При такой регулировке, начиная от момента, когда плоскость предмета сопряжена с плоскостью экрана, меняется как задний отрезок  $x'$ , так и передний отрезок  $x$ , т. е. изменяются обе величины, входящие в формулу (II. 38) для линейного увеличения объектива. Дифференцированием этой формулы можно получить для допуска на точность регулировки упорного кольца два выражения:

$$\delta x' = \frac{\delta y'}{y'} x' \quad (\text{II. 48})$$

или

$$\delta x = -x \frac{\delta y'}{y'} = -\frac{f'}{V} \cdot \frac{\delta y'}{y'} = -\frac{x'}{V^2} \cdot \frac{\delta y'}{y'} = -\frac{\delta x'}{V^2}, \quad (\text{II. 49})$$

которые отличаются друг от друга в  $V^2$  раз. В то же время оба выражения правильные. Выражение (II. 48) справедливо для юстировки масштаба изображения на экране проектора при телецентрическом ходе главных лучей, а выражение (II. 49) справедливо для размера изображения в сопряженной плоскости, которая при сдвиге объектива на величину  $\delta x$  смещается вдоль оси из плоскости экрана в противоположную сторону смещения объектива.

Для точности регулировки положения упорного кольца по формуле (II. 48) и в соответствии с требованиями упомянутой инструкции получим

$$\delta x' \leq \pm 1,8 \text{ мм.}$$

Следует еще отметить такую особенность, что точность регулировки положения упорного кольца не зависит от увеличения объективов, так как допустимая относительная погрешность масштаба изображения одинакова для всех проекционных объективов независимо от их увеличения.

Для сокращения продольных габаритов ход осевого луча в проекторах ломают с помощью плоских зеркал. Погрешности изготовления и установки этих зеркал вызывают разномасштабность изображения в плоскости экрана. Этот вопрос был рассмотрен ранее в самом общем виде<sup>1</sup>. Полученные выводы позволяют найти допуски для изготовления и юстировки зеркал в любом случае.

<sup>1</sup> Г. В. Погарев. О точности изготовления и юстировки плоских зеркал проекторов. — Изв. вузов. Приборостроение, 1962, № 4.

Теперь кратко рассмотрим юстировку масштаба изображения в телескопических системах. В отличие от оптических систем микроскопа и проекционных приборов в системах телескопических нет возможности изменять масштаб изображения в широких пределах изменением расстояния между объективом и окулярной шкалой. Для этого можно пользоваться лишь изменением фокусного расстояния собственно объектива трубы или эквивалентного фокусного расстояния системы, состоящей из объектива и дополнительного длиннофокусного коллектива, расположенного обычно вблизи плоскости изображения. Изменение фокусного расстояния в первом случае достигается варьированием воздушного промежутка между линзами объектива, а во втором случае — смещением коллектива.

Первую операцию необходимо выполнять с большой точностью, вторую — значительно грубее. Это следует из формулы (II. 44), которая для величины смещения линз дает

$$\Delta d = \frac{f'_1 f'_2}{f'} \cdot \frac{\Delta f'}{f'}. \quad (\text{II.50})$$

В первом случае фокусные расстояния линз ахроматического объектива примерно таковы:  $f'_1 \approx \frac{1}{2} f'$ ;  $f'_2 \approx -f'$ , поэтому

$$|\Delta d| \approx \frac{\Delta f'}{2}. \quad (\text{II.50a})$$

Во втором случае фокусное расстояние коллектива  $f'_2$  значительно больше  $f'$  собственно объектива, например в  $k$  раз, и  $|f'_2| = k f'_1$ , вследствие чего  $f'_1 \approx f'$ , поэтому

$$|\Delta d| \approx k \Delta f'. \quad (\text{II.50б})$$

Если, например,  $k = 2$ , то подвижка коллектива будет в 4 раза менее чувствительна, чем изменение воздушного промежутка между линзами собственно объектива.

Более подробные расчеты для конкретного практического случая сделаны при решении задачи о юстировке масштаба изображения угломерной трубы в работе М. Я. Кругера и др. (изд. 1-е, 1963 г.) [27].

В трубах оптических дальномеров и в коллиматорах длинноизмерительных машин особо высокие требования предъявляются к точности уравнивания масштаба изображений. Допуск на разность масштабов в первом случае получается в относительной мере порядка 0,1—0,02% [53], а во втором случае — порядка 0,1% [39].

Для юстировки масштаба изображений в оптической системе объективов предусмотрены специальные линзы, которые при заводской сборке можно смещать вдоль оси. На рис. 32 схематически

показан узел объектива коллиматора длиноизмерительной машины ИЗМ-10, а буквой *К* отмечена линза-компенсатор.

Контроль разности масштабов изображений в ветвях осуществляется пробными измерениями в различных местах поля зрения — в центре и на краях поля, справа или слева от центра. Разность увеличений проявляется в том, что в симметричных от центра боковых точках поля систематические ошибки результатов измерений равны по величине и противоположны по знаку и что эти ошибки возрастают пропорционально удалению от центра к краям поля. Ошибки обнаруживаются проще, если следить лишь за тем, не изменяется ли взаимная нулевая установка штрихов, сделанная в центре поля точно, при смещениях по полю в стороны, так как глаз особенно чувствителен именно к нарушению нулевой установки штрихов.

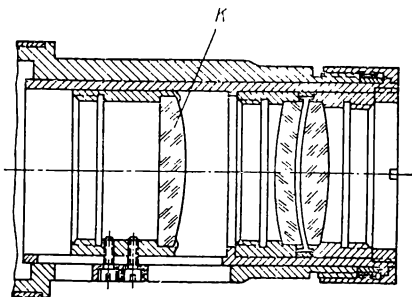


Рис. 32. Объектив коллиматора линейной измерительной машины

В настоящее время все большее распространение получают дифференциальные схемы для снятия отсчетов. Устройство их основано на том, что сравниваются два изображения с несколько отличающимися масштабами, наложенные друг на друга в одном

общем поле зрения. Такая схема применена, например, в известном навигационном приборе — наклонном Каврайского, который схематически изображен на рис. 33, а. Левый ЛО и правый ПО объективы дают изображения соответствующих частей горизонта через разделительную призму *П<sub>р</sub>* в плоскости окулярной шкалы *ш* (окуляр не показан). Вследствие наклона морского горизонта его изображения через оба объектива не совпадут с осью

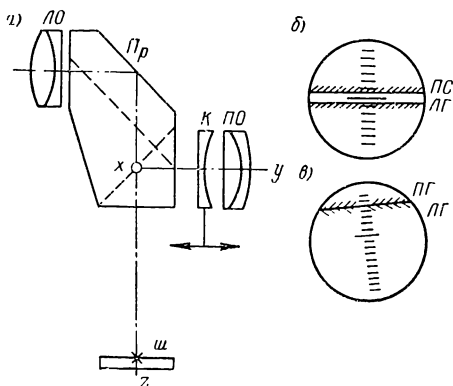


Рис. 33. Схема наклонмера Каврайского

трубы и разойдутся, как это показано на рис. 33, б. Для совмещения изображений горизонта наклонмер следует развернуть вокруг оси трубы *z* на небольшой угол против движения часовой стрелки. Фокусное расстояние правого объектива *ПО* совместно с коррекционной линзой *К* меньше ( $f'_n \approx 70 \text{ мм}$ ), чем

фокусное расстояние левого объектива ( $f'_d = 80 \text{ мм}$ ). Вследствие этого изображение правой части горизонта  $ПГ$  будет смещаться по полю зрения медленнее, чем изображение левой части горизонта  $ЛГ$ , и в некоторой точке шкалы оба изображения соприкоснутся друг с другом. В этот момент исчезнет полоска неба между горизонтами, что показано на рис. 33, *в*, где угол поворота трубы для наглядности преувеличен. Шкала рассчитана так, что отсчет по совмещенной линии горизонтов равен углу наклона.

Для получения необходимой разности масштабов изображений с точностью до  $\frac{1}{150}$  изменяют воздушный промежуток между правым объективом (рис. 33, *а*) и коррекционной линзой  $K$  в пределах до 5 мм с точностью примерно до  $\pm 0,1 \text{ мм}$ .

Контроль разности масштабов в лабораторных условиях осуществляется с помощью встречных коллиматоров и вспомогательного точного клина.

### Глава III

#### ЮСТИРОВКА ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННЫХ СИСТЕМ

##### 9. Аналитические способы решения пространственных задач, возникающих в связи с юстировкой зеркально-призменных систем

При анализе работы и свойств зеркальных систем в процессе их юстировки часто возникают разнообразные пространственные задачи по определению величины отклонения выходящих лучей или поворота изображения; эти дефекты могут появиться в результате малых подвижек зеркал и призм из их номинального положения.

Для решения таких задач на практике применяют различные способы, основанные на использовании сферической тригонометрии, векторной алгебры, матричного исчисления, а также аналитической или начертательной геометрии. Некоторые задачи решаются графическим способом. При решении сложных задач пользуются разнообразными приемами их упрощения. Наибольшее применение в инженерной практике получили способы, основанные на использовании сферической тригонометрии, векторной алгебры и матричного исчисления.

Выясним особенности этих способов на примере решения простой практической задачи об отражении луча от вращающегося плоского зеркала.

**Задача.** Плоское зеркало  $Z$  вращается вокруг оси  $y$  неподвижной координатной системы  $x y z$  (рис. 34,  $a$ ). На зеркало в плоскости  $y z$  падает луч неизменного направления, который с осью  $z$  образует угол  $i_0$  — угол падения луча при исходном положении зеркала, когда его отражающая плоскость перпендикулярна оси  $z$ , а нормаль  $\bar{N}_0$  плоскости параллельна этой оси. Отраженный луч (показан штриховой линией) также лежит в плоскости  $y z$  и с осью  $z$  составляет угол отражения  $i'_0$ , равный по величине углу падения  $i_0$ .

При повороте зеркала  $Z$  из исходного положения вокруг оси  $y$  на угол  $\beta$  его нормаль займет положение  $ON$ , а отраженный луч



(показан сплошной прямой) выйдет из плоскости чертежа. Задача заключается в том, чтобы найти направление отраженного луча или его отклонение от того направления, которое он имел при исходном положении зеркала.

Решим эту пространственную задачу вначале с помощью сферической тригонометрии, для чего прежде всего построим задачу

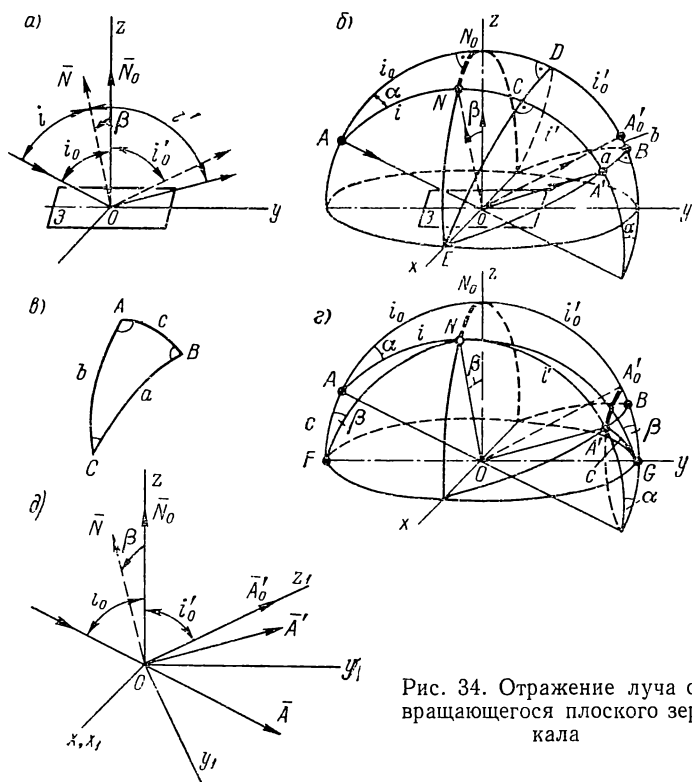


Рис. 34. Отражение луча от вращающегося плоского зеркала

на сфере (рис. 34, б). Для этого проведем сферу единичного радиуса с центром в точке  $O$ , где находится начало координатных осей  $xuz$  (в нашем случае достаточно полусферы), и отметим дугами больших кругов плоскость экватора, которая совпадает с плоскостью  $xy$ , и плоскость начального меридиана — плоскость  $xz$ . Дуги больших кругов на единичной сфере непосредственно равны центральным углам, стягиваемым этими дугами.

Буквой  $N_0$  отметим след нормали зеркала в его исходном положении, буквой  $N$  — след нормали после поворота зеркала вокруг оси  $y$  на угол  $\beta$ . При вращении зеркала след нормали опишет дугу начального меридиана, отмеченную на сфере жирной штриховой линией.

Точкой  $A$  на сфере отмечен след падающего луча, дугой  $\widehat{N_0A}$  — угол падения  $i_0$ . След отраженного от зеркала луча будет лежать на продолжении дуги  $\widehat{AN_0}$  в точке  $A'_0$ , удаленной от точки  $N_0$  на угловое расстояние  $i'_0$ , равное дуге  $i_0$ .

Найдем след луча, отраженного от зеркала, которое повернуто на угол  $\beta$  вокруг оси  $y$ . Согласно закону отражения, падающий луч (след  $A$ ) и нормаль зеркала в точке падения (след  $N$ ) образуют плоскость, в которой найдется и отраженный луч (след  $A'$ ). На сфере эта плоскость отражения изобразится дугой большого круга, проходящей через точки  $A$  и  $N$  и опирающейся на диаметр, который совпадает с падающим лучом. Угол отражения луча по величине равен углу падения, вследствие чего след выходящего луча  $A'$  найдется на дуге  $\widehat{AN}$  на расстоянии, равном этой дуге, т. е.

$$\widehat{NA'} = \widehat{AN} = i' = |i|.$$

Проведем еще одну дугу большого круга, которая опирается на ось  $x$  и проходит через найденный след отраженного луча — точку  $A'$ . Плоскость, в которой лежит дуга  $\widehat{EA'B}$ , перпендикулярна плоскости чертежа, т. е. плоскости  $yz$ ; прямой угол при точке  $B$  отмечен дугой с точкой.

Задача графически построена полностью. Дуга  $\widehat{A'B} = a$  есть величина бокового отклонения отраженного луча, а дуга  $\widehat{A'_0B} = b$  — величина отклонения луча по высоте. Теперь необходимо найти аналитическую зависимость между заданными величинами — углом поворота зеркала  $\beta$  и углом наклона луча  $i_0$  — и искомыми углами отклонения луча, которые измеряются дугами  $a$  и  $b$ . Эту зависимость можно найти с помощью формул сферической тригонометрии, которые связывают углы и дуги в сферических треугольниках. Такие формулы приводятся в курсах или справочниках сферической тригонометрии [13; 19].

Одной из основных является формула синусов, согласно которой отношение синусов углов к синусам противолежащих дуг в данном сферическом треугольнике есть величина постоянная, т. е. (рис. 34, в)

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}. \quad (\text{III.1})$$

Пользуясь этой формулой, из прямоугольного сферического треугольника  $AA'B$  найдем

$$\sin a = \sin \alpha \sin 2i. \quad (\text{III.2})$$

Из другого прямоугольного треугольника  $AN_0N$  для синуса дуги  $i$  получим

$$\sin i = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}. \quad (\text{III.3})$$

Для дальнейшего вывода можно провести еще одну дугу большого круга, также опирающуюся на ось  $x$  и отстоящую от точки  $A$  на угол  $90^\circ$ . Эта дуга при точках  $C$  и  $D$  образует прямые углы, которые также отмечены дугами с точками. Из образовавшегося прямоугольного сферического треугольника  $NCE$  по той же формуле синусов получится

$$\sin(90^\circ - i) = \cos i = \cos i_0 \cos \beta. \quad (\text{III.4})$$

Подстановками в формулу (III. 2) и после преобразований получим окончательно

$$\sin a = \sin 2\beta \cos i_0. \quad (\text{III.5})$$

Для малого угла поворота зеркала  $\beta$  будет

$$a \approx 2\beta \cos i_0, \quad (\text{III.5a})$$

т. е. боковое отклонение луча будет уменьшаться по мере возрастания угла его падения.

Тот же результат получится быстрее, если воспользоваться одной из формул для косинуса стороны сферического треугольника, например по формуле

$$\cos b = \cos c \cos a + \sin c \sin a \cos B \quad (\text{III.6})$$

из прямоугольного треугольника  $AN_0N$  сразу найдем выражение (III. 4).

По формуле косинусов (III.6) из прямоугольного треугольника  $AA'B$  напомним

$$\cos(2i_0 + b) = \frac{\cos 2i}{\cos a}, \quad (\text{III.7})$$

где  $b$  — искомое угловое отклонение отраженного луча по вертикали. Используя формулы (III.4) и (III.5), можно выразить дугу  $b$  через заданные углы  $i_0$  и  $\beta$ .

На рис. 34,  $z$  показано другое построение на сфере, которое позволяет проще и быстрее решить рассмотренную задачу. Для этого через точку  $N$  проведена дуга  $FN G$ , опирающаяся на ось  $y$ . В результате образуются два треугольника  $\overline{ANF}$  и  $\overline{A'NG}$ , которые равны друг другу по двум сторонам ( $\overline{AN} = \overline{NA'}$ , так как  $i = |i'|$ , и  $\overline{FN} = \overline{NG} = 90^\circ$ ) и углу, заключенному между ними ( $\angle ANF = \angle A'NG$  как вертикальные). В силу этого равны друг другу и третьи стороны  $\overline{AF} = \overline{A'G} = 90^\circ - i_0$ , а также углы  $\angle AFN = \angle A'GN = \beta$ . Поскольку угол  $i_0$  по условию задачи постоянной величины, то  $\overline{A'G} = 90^\circ - i_0 = c = \text{const}$ , т. е. след  $A'$  отраженного луча лежит на дуге малого круга с центром на оси вращения  $y$ .

Окончательно получается такой вывод: при вращении зеркала вокруг оси  $y$ , параллельной его отражающей плоскости, луч неиз-

менного направления, отражаясь от зеркала  $З$ , вращается с удвоенной скоростью вокруг той же оси и в ту же сторону.

Положение следа  $A'$  отраженного луча на сфере теперь удобнее выражать в полярной системе координат с полюсом в точке  $G$ , так как след  $A'$  описывает вокруг этого полюса окружность радиуса  $c$ . Из прямоугольного сферического треугольника  $A'BG$  сразу получим формулу (III.5), так как по формуле синусов напишем

$$\sin a = \sin 2\beta \sin c = \sin 2\beta \sin (90^\circ - i_0) = \sin 2\beta \cos i_0.$$

Теперь ту же задачу решим векторным способом. Однако прежде чем приступить к решению задачи, необходимо записать в векторной форме выражения для направлений отраженного и преломленного лучей.

При пользовании сферической тригонометрией, где центральные углы непосредственно равны стягивающим их дугам, связь между углом отражения  $i'$  и соответственно углом преломления  $i_n$ , с одной стороны, и углом падения  $i$ , с другой, очень простая,

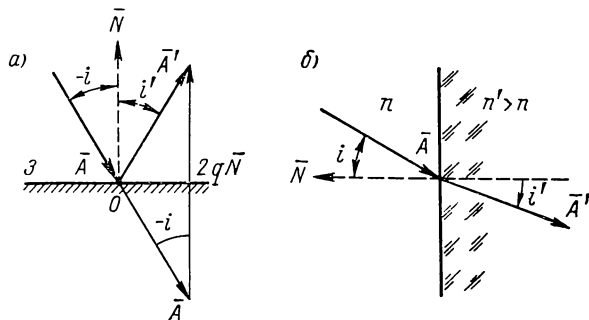


Рис. 35. Отражение и преломление луча в векторном представлении

а именно: угол отражения, измеряемый дугой  $i'$ , равен дуге  $i$ —углу падения — и угол преломления, измеряемый дугой  $i_n$ , равен дуге, синус которой находится из выражения

$$\sin i_n = \frac{n}{n'} \sin i,$$

где  $i$  — угол падения луча на плоскость, разделяющую среды с показателями преломления  $n$  и  $n'$  по ходу луча.

Векторные выражения для отражения и преломления лучей несколько сложнее. Отражение луча от плоского зеркала показано на рис. 35, а, где отмечены угол падения  $i$  и угол отражения  $i'$ .

Луч падающий, параллельный орту направления  $\bar{A}$ , и луч отраженный, параллельный орту направления  $\bar{A}'$ , совместно

с нормалью в точке падения, параллельной орту  $\bar{N}$ , всегда лежат в общей плоскости, перпендикулярной плоскости зеркала  $\mathcal{Z}$ . Построив от общего полюса  $O$  оба орта  $\bar{A}$  и  $\bar{A}'$ , образующие равные по величине углы  $i$  и  $i'$  соответственно, получим равнобедренный треугольник с основанием  $2\bar{q} = 2q\bar{N}$ , где модуль вектора  $q$ , направленного по нормали зеркала, равен  $q = |\bar{A}| \cos i$ .

Для орта направления отраженного луча  $\bar{A}'$  можно написать

$$\bar{A}' = \bar{A} + 2\bar{q} = \bar{A} + 2q\bar{N} = \bar{A} + 2\bar{N} |\bar{A}| \cos i. \quad (\text{III.8})$$

Скалярное произведение ортов  $\bar{A}$  и  $\bar{N}$ , как известно, равно

$$\bar{A}\bar{N} = |\bar{A}| |\bar{N}| \cos (\widehat{\bar{A}\bar{N}}).$$

Из рис. 35, а для угла  $\widehat{\bar{A}\bar{N}}$  между векторами получится

$$\widehat{\bar{A}\bar{N}} = 180^\circ - i.$$

Подстановкой найдем

$$\bar{A}\bar{N} = |\bar{A}| |\bar{N}| \cos (180^\circ - i) = -|\bar{A}| |\bar{N}| \cos i.$$

Модуль орта нормали равен единице, поэтому можно написать

$$q = -\bar{A}\bar{N}.$$

Подставляя эту величину в формулу (III.8), получим векторное выражение для орта направления отраженного луча в окончательном виде

$$\bar{A}' = \bar{A} - 2\bar{N} (\bar{A}\bar{N}). \quad (\text{III.9})$$

Для орта  $A'$  направления преломленного луча (рис. 35, б) в векторной форме можно получить [12]

$$\bar{A}' = \frac{n}{n'} \{ \bar{A} - \bar{N} (\bar{A}\bar{N}) \} - \bar{N} \sqrt{1 - \left( \frac{n}{n'} \right)^2 \{ 1 - (\bar{A}\bar{N}) \}}, \quad (\text{III.10})$$

которое можно записать в более удобном для расчетов виде

$$\bar{A}' = \frac{n}{n'} \bar{A} + \bar{N} \left( \frac{n}{n'} \cos i - \cos i' \right), \quad (\text{III.10a})$$

где  $i$  и  $i'$  — соответственно угол падения и угол преломления луча.

Вернемся к задаче об отражении от плоского зеркала, которая на рис. 34, д еще раз построена в системе прямоугольных осей  $x y z$ , и решим ее, используя формулу (III.9).

Для орта нормали  $\bar{N}$  зеркала, повернутого на угол  $\beta$ , получим

$$\bar{N} = \sin \beta \bar{i} + \cos \beta \bar{k}, \quad (\text{III.11})$$

а для орта  $\bar{A}$  направления падающего луча напишем

$$\bar{A} = \sin i_0 \bar{j} - \cos i_0 \bar{k}. \quad (\text{III.12})$$

Подставляя выражения для ортов  $\bar{A}$  и  $\bar{N}$  в формулу (III.9), после простых преобразований найдем

$$\bar{A}' = \sin 2\beta \cos i_0 \bar{i} + \sin i_0 \bar{j} + \cos 2\beta \cos i_0 \bar{k}. \quad (\text{III.13})$$

Из полученного векторного выражения видно, что отраженный луч описывает вокруг оси  $y$  в сторону вращения зеркала и с удвоенной угловой скоростью круговой конус с углом раствора  $2(90^\circ - i)$ .

Для полного решения поставленной задачи перейдем к новой системе координатных осей  $x_1 y_1 z_1$ , которые относительно неподвижных осей  $xyz$  повернуты вокруг оси  $x$  так, что ось  $z_1$  совпадает с лучом, отраженным от зеркала при его исходном положении, когда угол  $\beta = 0$ . Формулы преобразования координат имеют вид

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x; \\ y_1 &= y \cdot \cos i_0 - z \cdot \sin i_0; \\ z_1 &= y \cdot \sin i_0 + z \cdot \cos i_0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.14})$$

Эти формулы перехода можно также переписать в более общем виде

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 1 \cdot x + 0 \cdot y + 0 \cdot z; \\ y_1 &= 0 \cdot x + \cos i_0 \cdot y - \sin i_0 \cdot z; \\ z_1 &= 0 \cdot x + \sin i_0 \cdot y + \cos i_0 \cdot z. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.14a})$$

Коэффициенты, на которые умножаются старые проекции  $x$ ,  $y$  и  $z$ , можно переписать также в виде общей таблицы

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i_0 & -\sin i_0 \\ 0 & \sin i_0 & \cos i_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} s_{12} s_{13} \\ s_{21} s_{22} s_{23} \\ s_{31} s_{32} s_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{III.14б})$$

или несколько иначе в виде произведения двух таблиц — матриц

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} s_{12} s_{13} \\ s_{21} s_{22} s_{23} \\ s_{31} s_{32} s_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (\text{III.14в})$$

где  $S$  — матрица преобразования — поворотов — координат для перехода от системы осей  $xyz$  к системе осей  $x_1 y_1 z_1$ . Матрица  $S$  состоит из трех горизонтальных строк и трех вертикальных столбцов. В каждой строке и в каждом столбце имеется по три коэффициента, которые называются элементами матрицы. Если число элементов в строке равно числу элементов в столбце, то матрица называется квадратной. Матрица, имеющая только один столбец, называется столбцовой.

Перемножение матриц выполняется по правилу: элементы строк первой матрицы умножаются на элементы столбцов второй матрицы, т. е.

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i_0 & -\sin i_0 \\ 0 & \sin i_0 & \cos i_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot x + 0 \cdot y + 0 \cdot z \\ 0 \cdot x + \cos i_0 \cdot y - \sin i_0 \cdot z \\ 0 \cdot x + \sin i_0 \cdot y + \cos i_0 \cdot z \end{pmatrix}.$$

В результате получится то же, что дают и формулы (III.14a).

С помощью матрицы  $S$  преобразуем орт отраженного луча  $\bar{A}'$  согласно формуле (III.13) из системы координатных осей  $xyz$  в новую систему осей  $x_1y_1z_1$ :

$$\bar{A}'_1 = S\bar{A}' = \begin{pmatrix} s_{11}s_{12}s_{13} \\ s_{21}s_{22}s_{23} \\ s_{31}s_{32}s_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A'_x \\ A'_y \\ A'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11}A'_x + s_{12}A'_y + s_{13}A'_z \\ s_{21}A'_x + s_{22}A'_y + s_{23}A'_z \\ s_{31}A'_x + s_{32}A'_y + s_{33}A'_z \end{pmatrix}. \quad (\text{III.15})$$

Подставляя вместо элементов матрицы соответствующие коэффициенты из формул перехода (III.14a), найдем

$$\begin{aligned} \bar{A}'_1 &= \begin{pmatrix} 1 \cdot A'_x + 0 \cdot A'_y + 0 \cdot A'_z \\ 0 \cdot A'_x + \cos i_0 \cdot A'_y - \sin i_0 \cdot A'_z \\ 0 \cdot A'_x + \sin i_0 \cdot A'_y + \cos i_0 \cdot A'_z \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \sin 2\beta \cdot \cos i_0 & \cos i_0 \cdot \sin i_0 - \sin i_0 \cdot \cos 2\beta \cos i_0 \\ \sin^2 i_0 + \cos i_0 \cdot \cos 2\beta \cos i_0 \end{pmatrix}. \quad (\text{III.16}) \end{aligned}$$

Преобразуя, получим окончательно

$$\begin{aligned} \bar{A}'_1 &= \begin{pmatrix} \sin 2\beta \cos i_0 \\ \sin^2 \beta \sin 2i_0 \\ 1 - 2 \sin^2 \beta \cos^2 i_0 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2\beta \cos i_0 \\ \beta^2 \sin 2i_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= 2\beta \cos i_0 \bar{i}_1 + \beta^2 \sin 2i_0 \bar{j}_1 + \bar{k}_1. \quad (\text{III.16a}) \end{aligned}$$

Последняя столбцовая матрица для орта  $\bar{A}'_1$  направления отраженного луча написана для малого угла поворота зеркала  $\beta$  и затем развернута в векторное выражение. Из матрицы и векторного выражения видно, что отраженный луч отклоняется в сторону на угол  $a \approx 2\beta \cos i_0$  и по вертикали вниз на весьма малый угол  $b \approx \beta^2 \sin 2i_0$ .

В заключение для решения той же задачи с плоским зеркалом применим матричный метод. Решение задачи существенно упрощается, если известна матрица  $M'$  действия плоского зеркала на направление падающих лучей. Направление отраженного луча —

орт  $\bar{A}'$ , тогда найдется умножением орта падающего луча  $\bar{A}$  на эту матрицу плоского зеркала, т. е.

$$\bar{A}' = M' \bar{A}. \quad (\text{III.17})$$

Вывод матрицы  $M'$  сделаем в следующем параграфе.

### 10. Плоское зеркало в параллельном ходе лучей

Векторное выражение (III.9) для орта  $\bar{A}'$ , определяющего направление луча, отраженного от плоского зеркала, можно переписать в развернутом виде — через проекции ортов  $\bar{A}$  и  $\bar{N}$  на неподвижные координатные оси  $x y z$  — следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{A}' = \bar{A} - 2\bar{N}(\bar{A}\bar{N}) &= A_x \bar{i} + A_y \bar{j} + A_z \bar{k} - 2(N_x \bar{i} + N_y \bar{j} + N_z \bar{k}) \times \\ &\times (A_x N_x + A_y N_y + A_z N_z). \end{aligned} \quad (\text{III.18})$$

Перемножая и группируя члены суммы по проекциям орта  $\bar{A}'$  направления падающего луча и по координатным осям, получим

$$\begin{aligned} \bar{A}' &= [(1 - 2N_x^2) A_x - 2N_x N_y A_y - 2N_x N_z A_z] \bar{i} + \\ &+ [-2N_x N_y A_x + (1 - 2N_y^2) A_y - 2N_y N_z A_z] \bar{j} + \\ &+ [-2N_x N_z A_x - 2N_y N_z A_y + (1 - 2N_z^2) A_z] \bar{k}. \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

Согласно формуле (III.17) матрица плоского зеркала  $M'$  равна отношению модулей ортов  $\bar{A}'$  и  $\bar{A}$  или в развернутом виде

$$\begin{aligned} M' = \frac{|\bar{A}'|}{|\bar{A}|} &= \begin{pmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_x N_y & -2N_x N_z \\ -2N_x N_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_y N_z \\ -2N_x N_z & -2N_y N_z & 1 - 2N_z^2 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} m_{11} m_{12} m_{13} \\ m_{21} m_{22} m_{23} \\ m_{31} m_{32} m_{33} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

Видно, что у матрицы плоского зеркала второй и четвертый, третий и седьмой, шестой и восьмой элементы попарно равны друг другу.

Если ось  $z_0$  координатной системы осей, неизменно связанной с зеркалом, направить вдоль нормали плоского зеркала, то матрица общего вида сильно упростится, так как  $N_x = N_y = 0$ , и приведет к виду

$$M'_{N_z=1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = P'. \quad (\text{III.21})$$



Такая матрица называется матрицей канонического вида и обозначается  $P'$ ; координатные оси, неизменно связанные с зеркальной системой так, что ось  $z_0$  совпадает с направлением нормали зеркала, назовем собственными основными осями и обозначим  $x_0y_0z_0$ .

Выражение для орта  $\bar{A}_0$  направления отраженного луча в основных осях зеркала получится наиболее простым, а именно:

$$\bar{A}_0 = P' \bar{A}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{0x} \\ A_{0y} \\ A_{0z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{0x} \\ A_{0y} \\ -A_{0z} \end{pmatrix}. \quad (\text{III.22})$$

Действие плоского зеркала сводится лишь к тому, что оно меняет на противоположное направление третьей проекции орта падающего луча. Однако в большинстве случаев собственная система координатных осей  $x_0y_0z_0$  оказывается неудобной, так как она вращается вместе с зеркалом. Поэтому для решения юстировочных задач, как правило, приходится пользоваться общим выражением матрицы  $M'$  плоского зеркала по формуле (III.20) для произвольной неподвижной системы осей координат.

Продолжим решение задачи об отражении луча от поворотного зеркала, которая в предыдущем параграфе была решена способами сферической тригонометрии и векторной алгебры. В соответствии с рис. 34,  $z$  и с учетом формул (III.11) и (III.12) для ортов направлений падающего луча  $\bar{A}$  и нормали  $\bar{N}$  повернутого зеркала в системе тех же неподвижных осей  $x y z$  для орта  $\bar{A}'$  направления отраженного луча напомним

$$\bar{A}' = M' \bar{A} = \begin{pmatrix} m_{11}m_{12}m_{13} \\ m_{21}m_{22}m_{23} \\ m_{31}m_{32}m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{12}A_y + m_{13}A_z \\ m_{22}A_y + m_{23}A_z \\ m_{32}A_y + m_{33}A_z \end{pmatrix}. \quad (\text{III.23})$$

Поскольку согласно формуле (III.11) орт нормали  $\bar{N}$  перпендикулярен оси вращения зеркала, т. е. оси  $y$ , то  $N_y = 0$  и элементы  $m_{12}$ ,  $m_{23}$  и  $m_{32}$  матрицы  $M'$  будут равны нулю, а элемент  $m_{22}$  будет равен единице. Тогда выражение (III.23) упростится к виду

$$\bar{A}' = \begin{pmatrix} m_{13}A_z \\ A_y \\ m_{33}A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2N_xN_zA_z \\ A_y \\ (1 - 2N_z^2)A_z \end{pmatrix}. \quad (\text{III.24})$$

Подставляя соответствующие проекции из формул (III.11) и (III.12) получим выражение (III.13)

$$\bar{A}' = \begin{pmatrix} \sin 2\beta \cdot \cos i_0 \\ \sin i_0 \\ \cos 2\beta \cdot \cos i_0 \end{pmatrix} = \sin 2\beta \cdot \cos i_0 \bar{i} + \sin i_0 \bar{j} + \cos 2\beta \cdot \cos i_0 \bar{k}.$$

Теперь решим несколько более сложную практическую задачу, которая встречается при юстировке призмы Дове.

**Задача.** Призма Дове в панорамических визирах используется в качестве компенсационной призмы. В орудийной панораме ПГ она ставится в параллельном ходе лучей перед объективом и вращается вместе с головной призмой, но на вдвое меньшие углы при обзоре (панорамировании) по горизонту и тем самым компенсирует возникающий при этом поворот изображения.

Перед установкой в прибор призма Дове юстируется на специальном коллиматоре. При этом необходимо добиться того,

чтобы при вращении призмы на  $180^\circ$  не наблюдалось бие-ния центра изображения сет-

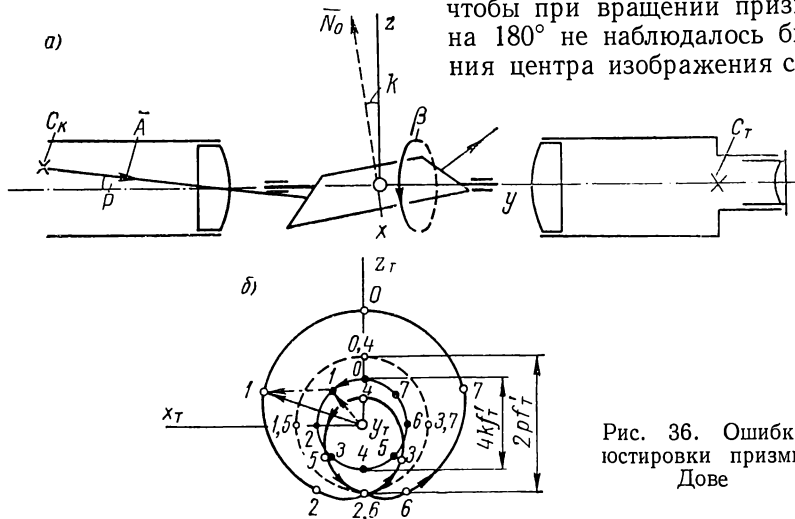


Рис. 36. Ошибки юстировки призмы Дове

ки коллиматора относительно перекрестия в поле зрения трубы. Для этого отражающую грань призмы следует установить параллельно ее оси вращения.

Задача состоит в том, чтобы найти траекторию, описываемую изображением центра сетки коллиматора в процессе юстировки узла призмы Дове, когда указанное требование к ее установке не выполнено и отражающая грань призмы на малый угол  $k$  наклонена к оси вращения, параллельной оси  $y$ , а визирная ось коллиматора наклонена на малый угол  $p$  к той же оси. В параллельном ходе лучей призма Дове с плоско-параллельной разверткой вполне эквивалентна плоскому зеркалу, поэтому для решения задачи используем выведенные ранее формулы для плоского зеркала.

По условиям задачи из рис. 36, а для орта  $\bar{A}$  падающего луча — направления визирной оси коллиматора — и для орта  $\bar{N}$  направления нормали отражающей грани призмы можно написать

$$\bar{A} = \cos pj - \sin pk; \quad \bar{N} = \cos k \sin \beta i - \sin kj + \cos k \cos \beta \bar{k}. \quad (\text{III.25})$$

Полагая, что юстировочные ошибки — углы  $k$  и  $p$  — малы по величине, напомним приближенные выражения

$$\bar{A} \approx \bar{j} - p\bar{k}; \quad \bar{N} \approx \sin \beta \bar{i} - k\bar{j} + \cos \beta \bar{k}. \quad (\text{III.25a})$$

С помощью матрицы  $M'$  для орта  $A'$  направления отраженного луча найдем

$$\bar{A}' = M' \bar{A} \approx \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{12} - pm_{13} \\ m_{22} - pm_{23} \\ m_{32} - pm_{33} \end{pmatrix}. \quad (\text{III.26})$$

Подставляя выражения для элементов из формулы (III.20), после преобразований напомним

$$\bar{A}' \approx \begin{pmatrix} 2k \sin \beta + p \sin 2\beta \\ 1 \\ 2k \cos \beta + p \cos 2\beta \end{pmatrix}. \quad (\text{III.27})$$

Здесь во второй строке мы пренебрегли малыми величинами второго порядка по отношению к единице.

Из выражения (III.27) следует, что выходящий луч в плоскости  $xz$  описывает траекторию, уравнение которой в параметрической форме имеет вид

$$\left. \begin{aligned} A'_x &\approx 2k \sin \beta + p \sin 2\beta; \\ A'_z &\approx 2k \cos \beta + p \cos 2\beta. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.28})$$

Это — уравнение улитки Паскаля, которая получается в результате сложения двух круговых вращений с различающимися в два раза скоростями. Графически такое сложение выполнено на рис. 36, б. Прежде всего запишем уравнение кривой в системе координатных осей  $x_T y_T z_T$ , связанных с плоскостью сетки  $C_T$  трубы. Оси этой системы параллельны осям координат  $x y z$ , а ее начало совпадает с центром перекрестия сетки  $C_T$ ; поэтому

$$\left. \begin{aligned} x_T &= f'_T A'_{Tx} = f'_T (2k \sin \beta + p \sin 2\beta); \\ z_T &= f'_T A'_{Tz} = f'_T (2k \cos \beta + p \cos 2\beta), \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.28a})$$

где  $f'_T$  — заднее фокусное расстояние объектива трубы  $T$ .

Далее построим две окружности с центром в начале системы осей  $x_T y_T z_T$ . Первая окружность диаметром  $4kf'_T$  представляет собой траекторию изображения центра перекрестия сетки  $C_K$  коллиматора при наличии только одной ошибки  $k$ ; вторая окружность диаметром  $2pf'_T$  изображает траекторию того же центра  $C_K$  при наличии только одной ошибки  $p$ . На первой окружности точками через каждые  $45^\circ$  отметим положения изображения центра перекрестия  $C_K$  при повороте призмы Дове на такие же углы. Эти точки на рис. 36, б отмечены цифрами от 0 до 7 в направлении вращения

призмы. Соответствующие точки на второй окружности отмечены теми же цифрами, но через каждые  $90^\circ$ , так как скорость вращения изображения центра перекрестия  $C_k$  под влиянием ошибки  $p$  в два раза больше угловой скорости вращения призмы.

Когда имеются обе ошибки, положение точек траектории центра сетки  $C_k$  найдем сложением радиусов-векторов тех точек обеих окружностей, которые отмечены одинаковыми цифрами. На рис. 36, б это показано на примере сложения радиусов-векторов для нахождения точки 1. Найденные точки суммарной кривой отмечены теми же цифрами и соединены плавной линией. Полученная кривая — улитка Паскаля — имеет две петли, что является характерным признаком наличия обеих ошибок —  $k$  и  $p$ . При определенном соотношении этих ошибок внутренняя петля вырождается. Это будет при  $k = p$ , когда улитка Паскаля переходит в кардиоиду.

Полученные уравнения и кривая позволяют наметить методику юстировки — рациональную последовательность выявления и устранения погрешностей призмы Дове.

Повернув призму на  $180^\circ$ , из уравнения (III.28a) получим новое значение проекций, а именно:

$$\left. \begin{aligned} (x_T)_{180^\circ} &= f'_T (A'_{Tx})_{180^\circ} = f'_T (-2k \sin \beta + p \sin 2\beta); \\ (z_T)_{180^\circ} &= f'_T (A'_{Tz})_{180^\circ} = f'_T (-2k \cos \beta + p \cos 2\beta). \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.28б})$$

Для разности проекций из формул (III.28a) и (III.28б) найдем

$$\begin{aligned} \Delta x_T &= f'_T [A'_{Tx} - (A'_{Tx})_{180^\circ}] = 4kf'_T \sin \beta; \\ \Delta z_T &= f'_T [A'_{Tz} - (A'_{Tz})_{180^\circ}] = 4kf'_T \cos \beta. \end{aligned}$$

Расстояние между изображениями центра перекрестия сетки  $C_k$  при двух взаимно противоположных положениях призмы будет равно  $\sqrt{\Delta x_T^2 + \Delta z_T^2} = 4kf'_T$ .

Таким образом, непараллельность отражающей грани призмы Дове по отношению к своей оси вращения выявилась в «чистом» виде и в учетверенном масштабе. Наклонами призмы в ее оправе, например, с помощью регулировочных винтов следует привести изображение центра сетки  $C_k$  коллиматора в точку, лежащую посередине между указанными точками траектории, соответствующими двум взаимно противоположным положениям призмы. Эта средняя точка лежит на окружности для ошибки  $p$  (рис. 36, б). После устранения первой ошибки наклона отражающей грани призмы к оси вращения угол  $k$  станет равным нулю.

Теперь изображение центра сетки  $C_k$  будет вращаться по окружности с удвоенной скоростью, так как при  $k = 0$  из уравнения (III.28a) получим

$$\left. \begin{aligned} x_T &= pf'_T \sin 2\beta; \\ z_T &= pf'_T \cos 2\beta. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.28в})$$

Это биение можно устранить или наклонами столика коллиматора, на который укладывается узел призмы Дове, или наклонами визирной оси коллиматора, например сдвигами сетки  $C_k$  в поперечном направлении с помощью винтов. Для выявления ошибки  $p$

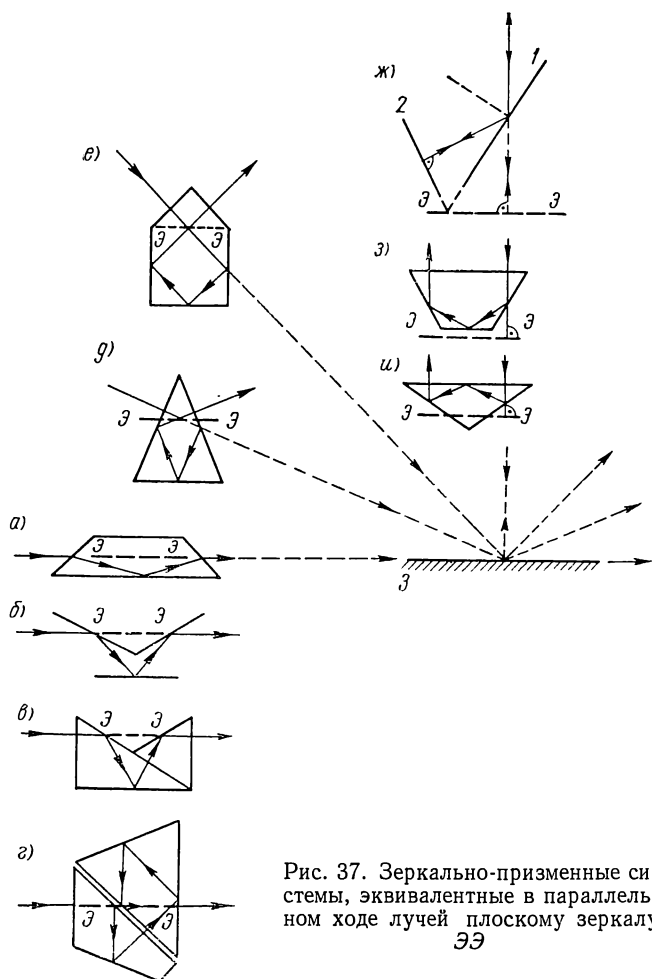


Рис. 37. Зеркально-призменные системы, эквивалентные в параллельном ходе лучей плоскому зеркалу  $\text{З}$

призму следует поворачивать через  $90^\circ$ . После окончания юстировки призмы и регулировки столика коллиматора изображение его сетки  $C_k$  будет вращаться вокруг своего центра.

Аналогично юстируют не только призму Дове, но и многие другие зеркальные системы и отражательные призмы в параллельном ходе лучей, которые действуют как одно плоское зеркало. На рис. 37 приведен ряд таких примеров: призма Аббе с тремя отражениями (рис. 37, в), система трех зеркал (рис. 37, б) и призма

Пехана с пятью отражениями (рис. 37, *з*). Эти три системы используются для тех же целей, что и призма Дове (рис. 37, *а*), но в отличие от последней они могут устанавливаться в любом ходе лучей — параллельном или сходящемся. Все перечисленные системы в параллельном ходе лучей эквивалентны плоскому зеркалу ЭЭ, параллельному лучу, который проходит эти системы, не меняя направления.

Система двух зеркал с автоколлимационным ходом лучей (рис. 37, *ж*) также представляет собой трехзеркальную систему, в которой первое и третье зеркала как бы совмещены в одно; она тоже эквивалентна одному плоскому зеркалу ЭЭ, перпендикулярному лучу, выходящему из системы в строго противоположном себе направлении. На рис. 37, *д* показана призма типа Шмидта, а на рис. 37, *е, з, и* — призмы с тремя отражениями, тоже эквивалентные плоскому зеркалу ЭЭ.

## 11. Угловое зеркало в параллельном ходе лучей

Угловые зеркала или отражательные призмы с двумя отражениями также широко применяются в оптических приборах.

Применяя дважды формулу (III.9), получим следующее выражение для орта  $\bar{A}''$  направления луча, отраженного угловым зеркалом:

$$\begin{aligned}\bar{A}'' &= \bar{A}' - 2\bar{N}_2 (\bar{A}'\bar{N}_2) = \\ &= \bar{A} - 2\bar{N}_1 (\bar{A}\bar{N}_1) - 2\bar{N}_2 (\bar{A}\bar{N}_2) + \\ &+ 4\bar{N}_2 (\bar{N}_1\bar{N}_2) (\bar{A}\bar{N}_1). \quad (\text{III.29})\end{aligned}$$

Записав последнее выражение в собственной основной системе координатных осей  $x_0y_0z_0$  углового зеркала, ось  $z_0$  которой параллельна ребру, образованному пересечением обоих зеркал, после преобразования можно было бы найти выражение для матрицы  $P''$  этой системы в каноническом виде. Однако матрицу  $P''$  легче получить, построив ход проекции орта падающего луча в главном сечении углового зеркала. На рис. 38 показаны следы зеркал 1 и 2 с углом  $\sigma$  между ними. Угол  $\sigma$  отсчитывается от первого по ходу луча зеркала ко второму против движения часовой стрелки.

Построим изображение точки предмета  $T$  в зеркале 1, т. е. точку  $T'$ , и изображение этой последней точки в зеркале 2 — точку  $T''$ . Видно, что все три точки лежат на дуге одной окружности, центр которой совпадает с ребром между зеркалами, т. е. с вершиной  $P$  угла  $\sigma$ .

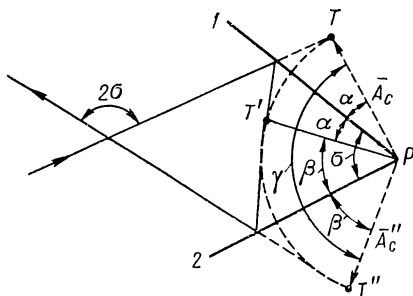


Рис. 38. Отражение от углового зеркала

Примем отрезок  $\overrightarrow{PT}$  за величину вектора  $\overline{A}_c$  падающего луча в главном сечении системы зеркал 1 и 2. Тогда отрезок  $\overline{PT}''$  будет вектором  $\overline{A}_c''$  луча, отраженного от двойного зеркала. Угол  $\gamma$  между векторами  $\overline{A}_c$  и  $\overline{A}_c''$  равен

$$\gamma = 2(\alpha + \beta) = 2\sigma = \text{const}, \quad (\text{III.30})$$

т. е. двойному углу между зеркалами.

Следовательно, при отражении от двойного зеркала луч, падающий в его главном сечении (вектор  $\overline{A}_c$ ), поворачивается вокруг ребра  $P$  между зеркалами, как вокруг оси, на удвоенный угол между зеркалами  $2\sigma$  в ту же сторону, куда отсчитывается угол  $\sigma$ , т. е. от первого по ходу луча зеркала ко второму. Поэтому положение углового зеркала в пространстве вполне определяется положением его ребра.

Легко понять, что луч, падающий вдоль ребра (обозначим вектор его направления  $\overline{A}_p$ ), после отражения от обоих зеркал системы сохраняет свое направление без изменений. Это непосредственно следует и из формулы (III.29), если ее применить к вектору, перпендикулярному обоим нормальям  $\overline{N}_1$  и  $\overline{N}_2$  зеркал 1 и 2. Оба скалярных произведения  $\overline{A}_p \overline{N}_1$  и  $\overline{A}_p \overline{N}_2$  равны нулю, и сразу получится

$$\overline{A}_p'' = \overline{A}_p. \quad (\text{III.31})$$

Луч произвольного направления, падающий на угловое зеркало, можно разложить на упомянутые две проекции  $\overline{A}_p$  и  $\overline{A}_c$ . Проекция  $\overline{A}_p$ , параллельная ребру углового зеркала, после отражения сохраняет свое направление неизменным ( $\overline{A}_p'' = \overline{A}_p$ ). Проекция  $\overline{A}_c$ , параллельная главному сечению зеркал, при отражении от них повернется на угол  $2\sigma$  вокруг ребра. На основании этих результатов можно сразу написать выражение для канонической матрицы  $P''$  углового зеркала в следующем виде:

$$P'' = \begin{pmatrix} \cos 2\sigma & -\sin 2\sigma & 0 \\ \sin 2\sigma & \cos 2\sigma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{III.32})$$

Эта матрица как раз и выражает то положение, что проекции орта  $\overline{A}$  направления падающего луча на первую  $x_0$  и вторую  $y_0$  оси основной координатной системы углового зеркала после отражения от него поворачиваются на удвоенный угол  $2\sigma$  между зеркалами, а проекция того же орта на третью ось  $z_0$  остается без изменения.

Для орта  $\overline{A}_0''$  направления отраженного луча в основных осях получится простое выражение

$$\overline{A}_0'' = P'' \overline{A}_0. \quad (\text{III.33})$$

Однако при решении большинства юстировочных задач необходимо иметь матрицу двойного зеркала в общем виде, которую обозначим  $M''$ , в неподвижной координатной системе осей  $x y z$ . Тогда для орта направления отраженного луча в этой же системе осей с учетом формулы (III.33) напишем

$$\bar{A}'' = S^{-1}\bar{A}_0'' = S^{-1}P''\bar{A}_0 = S^{-1}P''S\bar{A} = M''\bar{A}, \quad (\text{III.34})$$

где  $\bar{A}_0$  и  $\bar{A}$  — орты направления падающего луча соответственно в основной системе осей  $x_0 y_0 z_0$  углового зеркала и в неподвижных осях  $x y z$ ;

$S$  — матрица преобразования (двух поворотов) для перехода от неподвижной координатной системы  $x y z$  к основной системе осей  $x_0 y_0 z_0$  углового зеркала;

$P''$  — матрица углового зеркала канонического вида по формуле (III.32);

$S^{-1}$  — матрица обратного преобразования координат для перехода от основной системы осей  $x_0 y_0 z_0$  углового зеркала к неподвижной системе осей  $x y z$ .

Матрица  $S^{-1}$  обратного преобразования получается из матрицы  $S$  прямого преобразования координат транспонированием, т. е. заменой строк на столбцы.

Произведение исходной квадратной матрицы  $S$  на транспонированную матрицу  $S^{-1}$  равно единице, так как прямое и обратное преобразование координат равносильно отсутствию всякого преобразования.

Для матрицы  $S$  преобразования координат путем двух последовательных поворотов — первого вокруг оси  $z$ , а второго вокруг оси  $x_1$  промежуточной системы координат  $x_1 y_1 z_1$  — из рис. 39 через проекции орта  $\bar{p}$  направления ребра углового зеркала получим

$$S = \begin{pmatrix} -p_y/\sqrt{1-p_z^2} & p_x/\sqrt{1-p_z^2} & 0 \\ -p_x p_z/\sqrt{1-p_z^2} & -p_y p_z/\sqrt{1-p_z^2} & \sqrt{1-p_z^2} \\ p_x & p_y & p_z \end{pmatrix}, \quad (\text{III.35})$$

где  $p_x, p_y, p_z$  — проекции орта  $\bar{p}$  направления ребра углового зеркала в неподвижной системе осей  $x y z$ .

Для матрицы  $S^{-1}$  обратного преобразования транспонированием из матрицы  $S$  получим

$$S^{-1} = \begin{pmatrix} -p_y/\sqrt{1-p_z^2} & -p_x p_z/\sqrt{1-p_z^2} & p_x \\ p_x/\sqrt{1-p_z^2} & -p_y p_z/\sqrt{1-p_z^2} & p_y \\ 0 & \sqrt{1-p_z^2} & p_z \end{pmatrix}. \quad (\text{III.35a})$$

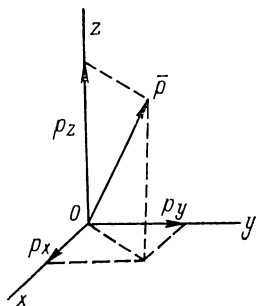


Рис. 39. Угловое зеркало в неподвижной системе координат



Перемножая выражения для матриц  $S$  и  $S^{-1}$  из формул (III.35) и (III.35a), а также для матрицы  $P''$  из формулы (III.32), в соответствии с формулой (III.34) получим матрицу  $M''$  углового зеркала в самом общем виде

$$M'' = \begin{pmatrix} [\cos 2\sigma + 2p_x^2 \sin^2 \sigma] [-p_z \sin 2\sigma + 2p_x p_y \sin^2 \sigma] \\ [p_y \sin 2\sigma + 2p_x p_z \sin^2 \sigma] \\ [p_z \sin 2\sigma + 2p_x p_y \sin^2 \sigma] [\cos 2\sigma + 2p_y^2 \sin^2 \sigma] \\ [-p_x \sin 2\sigma + 2p_y p_z \sin^2 \sigma] \\ [-p_y \sin 2\sigma + 2p_x p_z \sin^2 \sigma] [p_x \sin 2\sigma + 2p_y p_z \sin^2 \sigma] \\ [\cos 2\sigma + 2p_z^2 \sin^2 \sigma] \end{pmatrix} \quad (\text{III.36})$$

Это общее выражение для некоторых частных типов двойного зеркала упрощается. Рассмотрим эти случаи.

У прямоугольного диэдра или крыши, которая наносится на гранях отражательных призм, угол  $\sigma = 90^\circ$  и матрица  $M''$  преобразуется к виду

$$M''_{\sigma=90^\circ} = - \begin{pmatrix} 1 - 2p_x^2 & -2p_x p_y & -2p_x p_z \\ -2p_x p_y & 1 - 2p_y^2 & -2p_y p_z \\ -2p_x p_z & -2p_y p_z & 1 - 2p_z^2 \end{pmatrix}. \quad (\text{III.37})$$

Сравнение с формулой (III.20) показывает, что матрица прямоугольного зеркала полностью совпадает с матрицей  $\bar{M}'$  плоского зеркала (отличаясь лишь обратным знаком), если орт ребра  $\bar{p}$  уподобить орту нормали  $\bar{N}$ , зеркала. Таким образом, прямоугольное зеркало или крыша в параллельном ходе лучей эквивалентны плоскому зеркалу, нормаль  $\bar{N}$ , которого направлена вдоль ребра прямоугольного зеркала. Перемену знака можно произвести или перед матрицей, или перед ортом падающего луча. Заменяя прямоугольное зеркало или крышу эквивалентным плоским зеркалом, можно упростить решение многих задач, что будет показано ниже на ряде примеров.

Зеркальный ромб, т. е. пара обращенных друг к другу параллельных зеркал, и ромбпризма также нередко применяются в оптических системах. У обеих систем угол  $\sigma = 0$ , и каноническая матрица  $P''_{\sigma=0}$ , а вместе с ней и матрица  $M''_{\sigma=0}$  общего вида в этом случае становятся единичными (обозначены через  $E$ ):

$$M''_{\sigma=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = P''_{\sigma=0} = E. \quad (\text{III.38})$$

Это означает, что никакие повороты зеркального ромба или ромбпризмы не влияют на ход лучей: выходящие из них лучи всегда остаются параллельными падающим лучам.

Повороты углового зеркала общего типа (с углом  $\sigma$ , отличающимся от нуля или  $180^\circ$ ) вокруг его ребра, как было показано, не влияют на направление выходящих лучей. Можно показать, что имеется еще пара взаимоперпендикулярных осей, параллельных главному сечению углового зеркала, повороты вокруг которых системы зеркал на малые углы вызывают или только отклонение осевого луча в плоскости, параллельной ребру углового зеркала в его исходном положении, или только наклон изображения. В любом случае боковое отклонение выходящего осевого луча (в плоскости, перпендикулярной ребру углового зеркала) является величиной второго порядка малости.

На рис. 40 угловое зеркало с углом  $\sigma$  между отражающими плоскостями в исходном положении условно показано в системе неподвижных координатных осей  $xuz$  ортом направления ребра, когда этот орт  $\vec{p}_0$  направлен вдоль оси  $z$ .

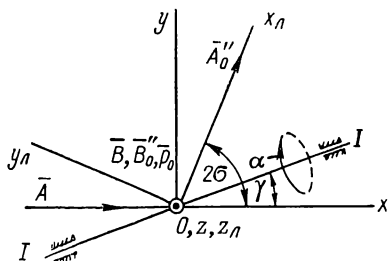


Рис. 40. Влияние наклона углового зеркала на отклонение выходящего луча и на поворот изображения

Осевой луч, падающий на угловое зеркало, направлен вдоль оси  $x$  и задан ортом  $\vec{A} = \vec{i}$ . Вертикаль плоскости предметов направлена вдоль оси  $z$  и задана ортом  $\vec{B} = \vec{k}$ . В исходном положении углового зеркала осевой луч отражается по орту  $\vec{A}_0''$ , который составляет угол  $2\sigma$  с ортом  $\vec{A}$  направления падающего луча, а орт  $\vec{B}_0''$  изображения вертикали остается параллельным орту  $\vec{B}$ .

Опрокинем угловое зеркало из указанного исходного положения на малый угол  $\alpha$  вокруг оси  $I—I$ , перпендикулярной его ребру и составляющей произвольный угол  $\gamma$  с осью  $x$  неподвижной координатной системы  $xuz$ . Рассмотрим, как зависят отклонение выходящего осевого луча  $\vec{A}''$  и поворот изображения вертикали  $\vec{B}''$  от ориентировки оси  $I—I$ , т. е. от угла  $\gamma$ .

Решим задачу в системе осей  $x_\lambda y_\lambda z_\lambda$ , повернутой вокруг оси  $z$  неподвижной системы  $xuz$  против часовой стрелки на угол  $2\sigma$  так, что ось  $x_\lambda$  совпадает с ортом  $\vec{A}_0''$  направления выходящего осевого луча.

Для ортов  $\vec{A}_\lambda''$  и  $\vec{B}_\lambda''$  в той же системе осей  $x_\lambda y_\lambda z_\lambda$  напомним следующие общие выражения:

$$\vec{A}_\lambda'' = M_\lambda'' \vec{A}_\lambda = M_\lambda'' \begin{pmatrix} \cos 2\sigma \\ -\sin 2\sigma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} \cos 2\sigma - m_{12} \sin 2\sigma \\ m_{21} \cos 2\sigma - m_{22} \sin 2\sigma \\ m_{31} \cos 2\sigma - m_{32} \sin 2\sigma \end{pmatrix}; \quad (\text{III.39})$$

$$\bar{B}_\lambda'' = M_\lambda'' \bar{B}_\lambda = M_\lambda'' \bar{B} = M_\lambda'' \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{pmatrix}. \quad (\text{III.39})$$

Для орта  $\bar{p}_\lambda$  направления ребра углового зеркала, опрокинутого вокруг оси  $I—I$  на угол  $\alpha$ , из рис. 40 в той же системе осей  $x_\lambda y_\lambda z_\lambda$  найдем

$$\bar{p}_\lambda = \sin \alpha \sin (2\sigma - \gamma) \bar{i}_\lambda + \sin \alpha \cos (2\sigma - \gamma) \bar{j}_\lambda + \cos \alpha \bar{k}_\lambda. \quad (\text{III.40})$$

Элементы матрицы  $M_\lambda''$  углового зеркала даются формулой (III.25). Подстановкой в них проекций орта  $\bar{p}_\lambda$  и после преобразований с учетом малости угла  $\alpha$  получим до величин второго порядка:

для орта  $\bar{A}_\lambda''$  направления выходящего осевого луча

$$\bar{A}_\lambda'' \approx \begin{pmatrix} 1 - 2\alpha^2 \left[ \frac{1}{4} \sin^2 2\sigma + \sin^2 \sigma \sin (2\sigma - \gamma) \sin \gamma \right] \\ -\alpha^2 \left[ \frac{1}{4} \sin 4\sigma + 2 \sin^2 \sigma \cos (2\sigma - \gamma) \sin \gamma \right] \\ -2\alpha \sin \sigma \cos (\sigma - \gamma) \end{pmatrix}; \quad (\text{III.41})$$

для орта  $\bar{B}_\lambda''$  направления изображения вертикали

$$\bar{B}_\lambda'' \approx \begin{pmatrix} 2\alpha \sin \sigma & \cos (\sigma - \gamma) \\ -2\alpha \sin \sigma & \sin (\sigma - \gamma) \\ 1 - 2\alpha^2 & \sin^2 \sigma \end{pmatrix}. \quad (\text{III.42})$$

Из полученных выражений следует, что выходящий луч  $\bar{A}_\lambda''$  при принятом направлении угла поворота  $\alpha$  отклоняется вниз, за плоскость рис. 40, на угол

$$\beta_\lambda'' = A_{\lambda z}'' \approx -2\alpha \sin \sigma \cos (\sigma - \gamma), \quad (\text{III.43})$$

а также влево на весьма малый угол

$$\gamma_\lambda'' = A_{\lambda y}'' \approx -\alpha^2 \left[ \frac{1}{4} \sin 4\sigma + 2 \sin^2 \sigma \cos (2\sigma - \gamma) \sin \gamma \right]. \quad (\text{III.44})$$

Угол наклона изображения  $\bar{B}_\lambda''$  вертикали почти целиком определяется величиной проекции этого орта на вторую ось, т. е.

$$\alpha_\lambda'' \approx B_{\lambda y}'' \approx -2\alpha \sin \sigma \sin (\sigma - \gamma). \quad (\text{III.45})$$

Из формул (III.43) и (III.45) видно, что угол отклонения осевого луча по высоте — угол  $\beta_\lambda''$  достигает наибольшей величины  $(\beta_\lambda'')_{\max} = -2\alpha \sin \sigma$ , когда угол  $\gamma = \sigma$ , т. е. когда угловое зеркало опрокидывается вокруг оси  $I—I$ , параллельной биссектрисе угла между падающим и отраженным лучами — между ортами  $\bar{A}$  и  $\bar{A}_0''$ . При

этом угол поворота изображения  $\alpha''_n \approx 0$ . Когда же зеркало опрокидывается вокруг оси  $I—I$ , перпендикулярной биссектрисе угла  $\widehat{A\bar{A}''}$ , угол  $\gamma = 90^\circ + \sigma$ , вследствие чего угол  $\beta''_n \approx 0$ , а угол поворота изображения достигает максимума  $(\alpha''_n)_{\max} \approx 2\alpha \sin \sigma$ .

Среди зеркально-призменных систем имеется множество конструктивных вариантов угловых зеркал: прямоугольная призма с двумя отражениями, пентапризма, полупентапризма и др. В частности, все оборачивающие зеркально-призменные системы в параллельном ходе лучей также приводятся к одному прямоугольному зеркалу (см. п. 15).

## 12. Зеркально-призменные системы с тремя и бóльшим числом отражений в параллельном ходе лучей

В оптических приборах довольно широко применяются зеркально-призменные системы с числом отражений три и более. Конструктивно они оформляются либо как совокупность плоских зеркал, закрепленных в общей оправе, либо как отражательные стеклянные призмы — составные, склеенные или цельные.

Три отражения имеют призмы Аббе, Шмидта, трипель и все призмы с крышей, полученные из призм с двумя отражающими плоскостями; таковы, например, пентапризма с крышей, полупентапризма с крышей, башмачная призма и др.

Четыре отражения имеют многие оборачивающие зеркально-призменные системы, например системы Малафеева 1 и 2-го рода, прямоугольная призма в сочетании с башмачной призмой или с пентапризмой с крышей, а также призмы Шмидта и Аббе с крышей.

Пять отражений имеет призма Пехана, шесть отражений — та же призма, но с крышей, а также оборачивающая система, составленная из трипельпризмы и равнобедренной призмы с тремя отражениями [47].

В современных приборах все чаще используются также зеркально-призменные системы с многократными отражениями. Примером простейшей системы с многократными отражениями является система двух плоских зеркал с автоколлимационным ходом лучей и двумя отражениями от первого зеркала: одно отражение происходит при прямом, а другое — при обратном ходе лучей (рис. 37, ж).

Многократные отражения позволяют увеличить масштаб рабочих угловых поворотов подвижного зеркала чувствительного элемента измерительных приборов и уменьшить габариты проекционных и других отсчетных систем. Угол отклонения лучей, отраженных  $k$  раз от подвижного зеркала, возрастает в  $2k$  раз. Например, в двухзеркальной системе чувствительного узла ультраоптиметра ИКП-1 число отражений пучка лучей от поворотного зеркала

достигает пяти, что повышает масштаб перемещений измерительного щупа в 10 раз. В оптических профилографах число отражений от поворотного зеркала может достигать нескольких десятков раз.

Направление выходящих лучей, отраженных любое число раз от зеркальных плоскостей, можно найти с помощью векторной формулы (III.3), если ее последовательно применять к каждому отражению. Однако с увеличением числа отражений количество членов векторной суммы будет быстро расти — в геометрической прогрессии со знаменателем два. При двух отражениях будет четыре члена векторной суммы, при трех — восемь, при четырех — шестнадцать, а при пяти отражениях — уже тридцать два члена. Анализ таких выражений и вычисления по ним соответственно усложняются.

Гораздо более удобным и наглядным при анализе сложных зеркально-призменных систем является метод приведения сложных систем плоских зеркал к простейшим системам аналогичного действия. Ранее, в п. 9, было показано, что, например, некоторые зеркальные системы и призмы с тремя и пятью отражениями в параллельном ходе лучей с математической точки зрения эквивалентны одному плоскому зеркалу. Таковы системы зеркал с компланарными т. е. параллельными одной общей плоскости, нормальными. Пространственная система трех зеркал общего типа эквивалентна угловому зеркалу с матрицей отрицательного знака. В частном случае, когда трехзеркальная система получена из призмы с двумя отражающими гранями, на одной из которых нанесена прямоугольная крыша с ребром, параллельным главному сечению исходной призмы, эта система эквивалентна угловому зеркалу. Ребро последнего параллельно ребру исходной призмы, а угол его равен  $\sigma_3 = \sigma_u - 90^\circ$ , где  $\sigma_u$  — угол между первой и второй по ходу луча отражающими гранями исходной призмы.

Зеркально-призменные системы с четырьмя отражениями, как показал А. И. Тудоровский, в параллельном ходе лучей могут быть приведены к одному эквивалентному угловому зеркалу с углом  $\sigma_3$ , который вычисляется по формуле [58].

$$\cos \sigma_3 = \cos \sigma_{12} \cos \sigma_{34} - \sin \sigma_{12} \sin \sigma_{34} \cos \varphi. \quad (\text{III.46})$$

Орт  $\bar{p}_3$  направления ребра эквивалентного углового зеркала определится из выражения

$$\begin{aligned} \bar{p}_3 \sin \sigma_3 = & \bar{p}_{12} \sin \sigma_{12} \cos \sigma_{34} + \\ & + \bar{p}_{34} \cos \sigma_{12} \sin \sigma_{34} + [\bar{p}_{34} \bar{p}_{12}] \sin \sigma_{12} \sin \sigma_{34}. \end{aligned} \quad (\text{III.47})$$

Здесь  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_{34}$  — углы между 1 и 2-м и между 3 и 4-м зеркалами;

$\bar{p}_{12}$  и  $\bar{p}_{34}$  — орты направлений ребер первой и второй пары зеркал;

$\varphi$  — угол между ребрами первой и второй пары зеркал.

Систему зеркал с шестью отражениями можно последовательно привести к эквивалентной системе четырех зеркал и т. д.

Такой подход не только облегчает аналитическое решение юстировочных задач, но и, что особенно ценно, позволяет получить более наглядное представление об оптическом действии сложных зеркально-призмных систем.

Задачи с многократными отражениями проще всего решаются с помощью метода оптических разверток зеркальных систем, тем более что системы с многократными отражениями чаще всего работают с автоколлимационным или возвратным ходом лучей. В первом случае в качестве возвратно-отражающего элемента используется плоское зеркало, а во втором — прямоугольный диэдр или крыша.

При построении развертки ход лучей внутри зеркальной системы straighten и система зеркал, независимо от числа отражений, приводится к одному возвратно-отражающему элементу. Иначе говоря, эквивалентом системы с многократными отражениями является изображение возвратно отражающего элемента через впереди стоящую систему в обратном ходе лучей.

Решим несколько практических задач.

**Задача 1.** Найти, как расположены в пентапризме с крышей особые направления, отличающиеся тем свойством, что при наклонах призмы на малый угол вокруг одного из них появляется только отклонение выходящего осевого луча, а при наклонах призмы вокруг другого — только поворот изображения.

На рис. 41 показана пентапризма с крышей и с углом  $\sigma_u$  между отражающими плоскостями исходной призмы с двумя отражениями. Заменив крышу эквивалентным плоским зеркалом  $\mathcal{E}\mathcal{E}$ , перпендикулярным ее ребру, и изменив одновременно направление падающего луча  $\vec{A}$  на обратное  $-\vec{A}$  (луч обратного направления на рисунке показан штриховой линией), приведем пентапризму с крышей к эквивалентному угловому зеркалу с углом  $\sigma_s = \sigma_u - 90^\circ$ . Биссектриса  $B_s B_s$  угла между падающим ( $-\vec{A}$ ) и выходящим ( $\vec{A}'$ ) лучами перпендикулярна биссектрисе  $B_u B_u$  угла между действительным падающим на исходную призму лучом и выходящим лучом. Биссектриса  $B_s B_s$  для пентапризмы с крышей в данном случае отличается теми же свойствами, какие имела биссектриса  $B_u B_u$  в исходной пентапризме: при повороте пентапризмы с крышей на малый угол  $\alpha$  вокруг оси, параллельной  $B_s B_s$  и плоскости главного сечения призмы, возникает отклонение выходящего луча по

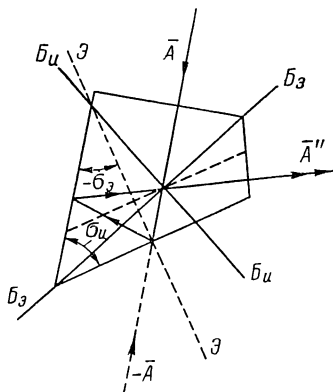


Рис. 41. Влияние наклона пентапризмы с крышей

высоте на угол  $2\alpha \sin \sigma_3$ . При опрокидывании пентапризмы с крышей на тот же малый угол  $\alpha$  вокруг оси, перпендикулярной предыдущему направлению и параллельной главному сечению призмы, возникает поворот изображения той же величины  $-2\alpha \sin \sigma_3$ .

Таким образом, у пентапризмы с крышей искомые особые направления расположены так же, как и у пентапризмы без крыши, но эти особые направления как бы поменялись ролями (см. стр. 106).

**Задача 2.** Для контроля прямолинейности направляющих<sup>1</sup> по ним перемещают суппорт  $C$ , который имеет пять точек опоры (1—5) — три на горизонтальной плоскости  $\Pi_1$  и две на вертикальной плоскости  $\Pi_2$  (рис. 42, а). На суппорт  $C$  устанавливают ванночку с ртутью и призму, неподвижно скрепленную с ванночкой. Используется или прямоугольная равнобедренная призма (рис. 42, б), или пентапризма (рис. 42, в). Входная грань каждой из призм полупосеребрена.

Передвигая суппорт каждый раз на расстояние  $l$ , равное расстоянию между точками опоры, в неподвижную автоколлимационную трубу (на рисунке не показана), наблюдают автоколлимационные изображения сетки от входной грани призмы и через призму — от поверхности ртутного горизонта.

Требуется найти, как смещаются указанные изображения, если призмы из исходного положения повернутся на малые углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  соответственно вокруг осей  $xuz$  неподвижной координатной системы.

Предположим, что в исходном положении контрольного устройства визирная ось неподвижной трубы параллельна оси  $y$  (на рис. 42, б, в) визирная ось показана неподвижным ортом  $\bar{A} = \bar{j}$ ; орт  $\bar{N}_3$  нормали ртутного зеркала всегда параллелен оси  $z$ ; входная грань каждой призмы перпендикулярна оси  $y$ ; гипотенузная грань прямоугольной призмы и ребро пентапризмы параллельны оси  $x$ . Предполагается также, что призмы не имеют ошибок изготовления.

Первая часть задачи решается очень просто: автоколлимационное изображение от входных граней обеих призм смещается одинаково — на удвоенный угол в сторону поворота призм вокруг осей  $x$  и  $z$ , а поворот призм вокруг оси  $y$  не действителен, так как входная грань при этом не наклоняется.

Несколько сложнее найти отклонение изображения от поверхности ртутного зеркала, поэтому вторую часть задачи решим аналитически.

Направление пучка лучей, отраженного от ртутного зеркала и прошедшего через впереди стоящую призму в обратную сторону, т. е. орт  $\bar{A}'_3$ , легко найти, определив направление нормали  $\bar{N}'_3$  изоб-

---

<sup>1</sup> По методу инж. Э. И. Розенберга и др.

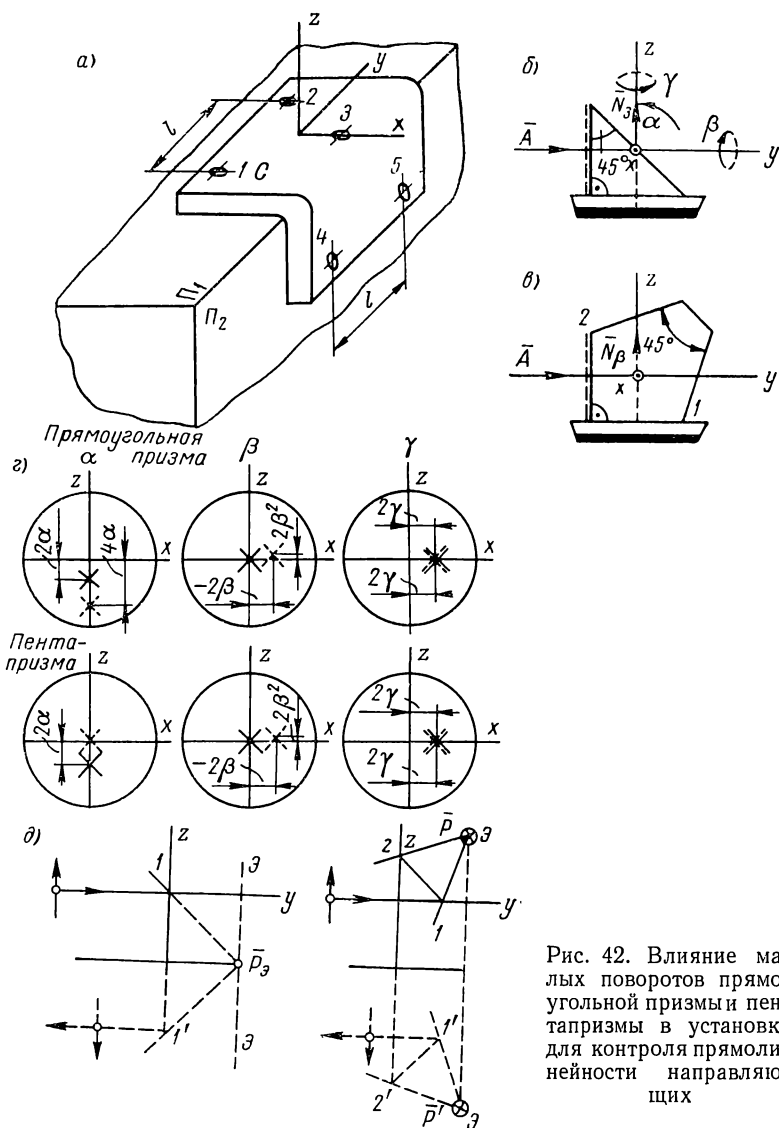


Рис. 42. Влияние малых поворотов прямоугольной призмы и пентапризмы в установке для контроля прямолинейности направляющих



ражения этого зеркала через ту же призму при обратном ходе лучей. Обозначив матрицу изображения ртутного зеркала через  $M'_3$  и используя условия задачи, для орта  $\bar{A}'_3$  в общем виде запишем

$$\bar{A}'_3 = M'_3 \bar{A} = M'_3 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2N'_{3x}N'_{3y} \\ 1 - 2(N'_{3y})^2 \\ -2N'_{3y}N'_{3z} \end{pmatrix}. \quad (\text{III.48})$$

Элементы матрицы получены в соответствии с формулой (III.20).

Проекции орта нормали  $\bar{N}'_3$  через впередистоящие прямоугольную призму или пентапризму найдем из выражения

$$\bar{N}'_3 = M_n \bar{N}_3 = M_n \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N'_{3x} \\ N'_{3y} \\ N'_{3z} \end{pmatrix}, \quad (\text{III.49})$$

где  $m_{13}$ ,  $m_{23}$ ,  $m_{33}$  — элементы матрицы соответствующей призмы при обратном ходе лучей.

Для схемы с прямоугольной призмой по формуле (III.20) получим

$$m_{13} = -2N_x N_z; \quad m_{23} = -2N_y N_z; \quad m_{33} = 1 - 2N_z^2. \quad (\text{III.50a})$$

Для схемы с пентапризмой с углом  $\sigma = -45^\circ$  (обратный ход лучей) по формуле (III.36) найдем

$$m_{13} = -p_y + p_x p_z; \quad m_{23} = p_x + p_y p_z; \quad m_{33} = p_z^2. \quad (\text{III.50б})$$

Подставляя выражения для элементов матриц в формулу (III.48), для каждой из схем в общем виде напишем:

с прямоугольной призмой

$$\bar{A}'_3 = \begin{pmatrix} -8N_x N_y N_z^2 \\ 1 - 8N_y^2 N_z^2 \\ 4N_y N_z (1 - 2N_z^2) \end{pmatrix}; \quad (\text{III.51a})$$

с пентапризмой

$$\bar{A}'_3 = \begin{pmatrix} 2(p_y - p_x p_z)(p_x + p_y p_z) \\ 1 - 2(p_x + p_y p_z)^2 \\ -2p_z^2(p_x + p_y p_z) \end{pmatrix}. \quad (\text{III.51б})$$

Здесь  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  — проекции орта  $\bar{N}$  направления нормали гипотенузой отражающей грани прямоугольной призмы на соответствующие оси неподвижной координатной системы  $x y z$ ;

$p_x, p_y, p_z$  — проекции орта  $\bar{p}$  направления ребра пентапризмы на те же оси  $x y z$ . На рис. 42, в в исходном положении пентапризмы принято, что орт ребра направлен вдоль оси  $x$  в отрицательную сторону.

Результаты дальнейших выкладок сведены в табл. 6 и 7. В табл. 6 даны проекции ортов нормали  $\bar{N}$  гипотенузной грани прямоугольной призмы и ребра  $\bar{p}$  пентапризмы в соответствии с их углами поворотов  $\alpha, \beta$ , и  $\gamma$ . В табл. 7 приведены точные и приближенные значения проекций ортов лучей, отраженных от ртутного горизонта и выходящих из прямоугольной призмы (орт  $\bar{A}'_3$ ) и пентапризмы (орт  $\bar{A}''_3$ ). Значения проекций найдены по формулам (III.51a) и (III.51б).

Т а б л и ц а 6

Проекции ортов направлений нормали  $\bar{N}$  гипотенузной грани  
прямоугольной призмы и ребра  $\bar{p}$  пентапризмы

Углы поворота	Проекции ортов					
	$N_x$	$N_y$	$N_z$	$p_x$	$p_y$	$p_z$
$\alpha$	0	$-\cos(45^\circ + \alpha)$	$-\sin(45^\circ + \alpha)$	-1	0	0
$\beta$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \beta$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \beta$	$-\cos \beta$	0	$-\sin \beta$
$\gamma$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \gamma$	$-\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \gamma$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\cos \gamma$	$-\sin \gamma$	0

Т а б л и ц а 7

Орты направлений выходящих осевых лучей

Углы поворота	Проекции ортов	
	$\bar{A}'_3$	$\bar{A}''_3$
$\alpha$	$\bar{A}'_{3\alpha} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos 4\alpha \\ -\sin 4\alpha \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ -4\alpha \end{pmatrix}$	$\bar{A}''_{3\alpha} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$
$\beta$	$\bar{A}'_{3\beta} = \begin{pmatrix} \sin 2\beta \cos \beta \\ -\cos 2\beta \\ \sin 2\beta \sin \beta \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2\beta \\ -1 \\ 2\beta^2 \end{pmatrix}$	$\bar{A}''_{3\beta} = \begin{pmatrix} \sin 2\beta \cos \beta \\ -\cos 2\beta \\ \sin 2\beta \sin \beta \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2\beta \\ -1 \\ 2\beta^2 \end{pmatrix}$
$\gamma$	$\bar{A}'_{3\gamma} = \begin{pmatrix} \sin 2\gamma \\ -\cos 2\gamma \\ 0 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2\gamma \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\bar{A}''_{3\gamma} = \begin{pmatrix} \sin 2\gamma \\ -\cos 2\gamma \\ 0 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2\gamma \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$

На рис. 42, *з* в соответствии с данными табл. 7 показан вид поля зрения автоколлимационной трубы при наклонах прямоугольной призмы и пентапризмы на углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Видно, что повороты обеих призм на углы  $\beta$  и  $\gamma$  дают одинаковый результат: при повороте на угол  $\beta$  (вращение призмы в плоскости входной грани) автоколлимационное изображение сетки от входной грани (отмечено крестом) не смещается, а ее изображение от ртутного горизонта (отмечено штриховым крестом) смещается на удвоенный угол  $2\beta$  в сторону поворота призмы и на величину второго порядка малости  $2\beta^2$  — по высоте; при повороте на угол  $\gamma$  оба изображения смещаются совместно на одинаковую величину  $2\gamma$  в сторону вращения призмы.

При повороте призм на угол  $\alpha$  вокруг оси  $x$  получаются различные результаты, а именно:

прямоугольная призма смещает оба изображения сетки в одну и ту же сторону, но с различной скоростью: изображение от ртутного зеркала смещается вдвое быстрее (на угол  $4\alpha$ ), чем от входной грани призмы (на угол  $2\alpha$ );

пентапризма совершенно не смещает изображения сетки от ртутного горизонта.

Последние выводы для прямоугольной призмы можно было бы получить также графически (рис. 42, *д*), а неподвижность изображения от ртутного зеркала при повороте пентапризмы на угол  $\alpha$  можно было предвидеть, так как ее поворот вокруг оси, параллельной ребру, не действителен.

Нетрудно объяснить и результаты, получившиеся при повороте обеих призм на угол  $\gamma$ . На рис. 42, *д* показано, что обе системы, состоящие из прямоугольной призмы и ртутного зеркала или пентапризмы и ртутного зеркала, в параллельном ходе лучей при исходном положении ( $\alpha = \beta = \gamma = 0$ ) вполне эквивалентны одному плоскому зеркалу  $\mathcal{E}\mathcal{E}$ , перпендикулярному падающему лучу или оси  $y$ . Из рис. 42, *д* видно, что эквивалентное зеркало  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  прямоугольной призмы вместе с ртутным горизонтом параллельно ребру  $\bar{p}_z$ , образованному пересечением гипотенузной грани  $1$  призмы с ее изображением  $1'$  в ртутном зеркале, а эквивалентное зеркало  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  пентапризмы совместно с горизонтом параллельно ее ребру  $\bar{p}$  между отражающими гранями  $1$  и  $2$ . После поворота прямоугольной призмы или пентапризмы на угол  $\gamma$  на тот же угол развернутся вокруг оси  $z$  эквивалентное ребро  $\bar{p}_z$  и ребро  $\bar{p}$  пентапризмы, а также параллельные этим ребрам эквивалентные зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$ . Иначе говоря, автоколлимационные изображения от входных граней призм и ртутного горизонта будут смещаться совместно.

При практических измерениях все три поворота на углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  наблюдаются в совокупности. Разделение суммарного смещения изображения сетки на отдельные составляющие по углам поворотов выполняются просто, так как сдвиг изображений сетки по

вертикали пропорционален только одному углу поворота  $\alpha$ , боковой сдвиг креста на рис. 42,  $z$  — только углу  $\gamma$ , а боковой сдвиг штрихового креста — только углу  $\beta$ .

### 13. Преломляющий клин в параллельном ходе лучей

Преломляющие клинья часто используются как самостоятельные детали и узлы в оптических системах многих измерительных приборов: в различных оптических микрометрах, в устройствах для выверки приборов и т. д. Плоскопараллельные пластинки, применяемые, например, в качестве защитных стекол, разделительных пластинок, поворотных пластинок в оптических микрометрах, в действительности также являются клиньями с малыми преломляющими углами. Отражательные призмы и зеркала с внутренним отражением в развертке всегда дают клиновидную пластинку с малым преломляющим углом, которая влияет на работу и на юстировку призмменно-зеркальных систем. Вследствие этого необходимо рассмотреть основные свойства и вопросы юстировки преломляющих клиновидных пластинок.

Расчет хода лучей через клиновидную пластинку можно выполнить, например, с помощью векторной формулы (III.10a). Рассмотрим это на примере хода луча через клин вне его главного сечения.

На рис. 43 в системе прямоугольных осей  $xuz$  и в сферических координатах изображен ход луча через клин с преломляющим углом  $\sigma$ . Ребро клина совпадает с осью  $z$ , входная грань параллельна плоскости  $yz$ , а нормаль  $\bar{N}_1$  направлена по оси  $x$ , так что

$$\bar{N}_1 = \bar{i}. \quad (\text{III.52})$$

Нормаль  $\bar{N}_2$  выходной грани лежит в плоскости  $xu$  и с первой нормалью  $\bar{N}_1$  составляет угол  $\sigma$ , поэтому

$$\bar{N}_2 = \cos \sigma \bar{i} - \sin \sigma \bar{j}. \quad (\text{III.53})$$

Направление падающего луча задано ортом  $\bar{A}$ , который образует угол  $i_p$  с главным сечением клина, а его проекция на это сечение составляет угол  $i_c$  с нормалью  $\bar{N}_1$  входной грани, вследствие чего

$$\bar{A} = -\cos i_p \cos i_c \bar{i} + \cos i_p \sin i_c \bar{j} - \sin i_p \bar{k}. \quad (\text{III.54})$$

Применяя формулу (III.10a) к преломлению на входной грани, граничащей с воздухом, для орта  $\bar{A}'$  направления выходящего луча получим ( $n_1 = 1$ ;  $n'_1 = n$ )

$$\bar{A}' = \frac{1}{n} \bar{A} + \bar{N}_1 \left( \frac{1}{n} \cos i - \cos i' \right), \quad (\text{III.55})$$

где  $n$  — показатель преломления клина;  
 $i$  и  $i'$  — угол падения и соответствующий ему угол преломления луча на входной грани клина.

В нашем случае нормаль  $\bar{N}_1$  направлена навстречу вектору падающего луча  $\bar{A}$ , поэтому косинус угла падения  $i$  равен скалярному произведению этих векторов с обратным знаком

$$\cos i = -\bar{A}\bar{N}_1 = \cos i_p \cos i_c. \quad (\text{III.56})$$

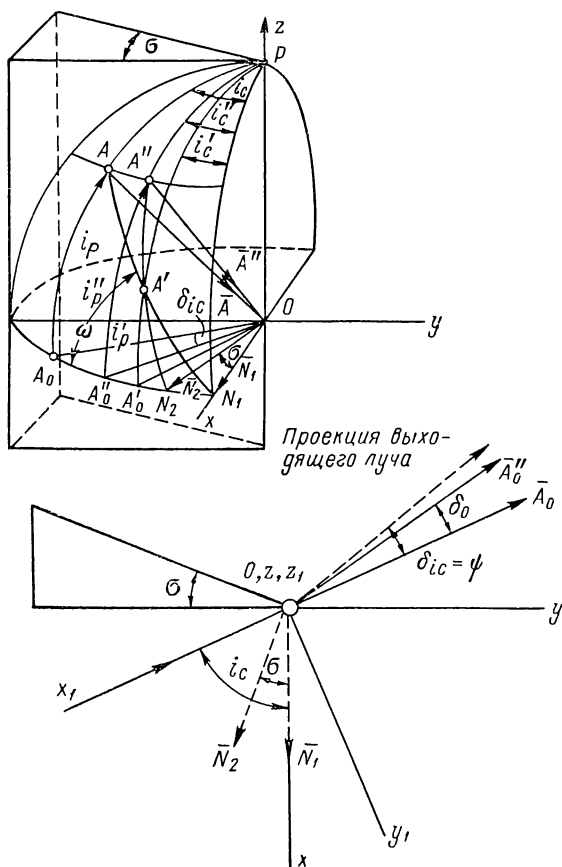


Рис. 43. Преломление луча через клин (общий случай)

По закону преломления для угла  $i'$  напомним

$$\cos i' = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - \sin^2 i}. \quad (\text{III.57})$$

Пользуясь формулой (III.56), найдем

$$\cos i' = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 i_p \cos^2 i_c}. \quad (\text{III.58})$$

По формуле (III.55) для направления луча, преломленного на входной грани, после преобразований получим

$$\bar{A}' = \frac{1}{n} [-(\sqrt{n^2 - \sin^2 i}) \bar{i} + \cos i_p \sin i_c \bar{j} - \sin i_p \bar{k}]. \quad (\text{III.59})$$

Применительно ко второй грани клина по той же формуле (III.10a) для орта  $\bar{A}''$  направления выходящего луча напомним ( $n_2 = n$ ;  $n'_2 = 1$ )

$$\bar{A}'' = n\bar{A}' + \bar{N}_2 (n \cos i_2 - \cos i'_2), \quad (\text{III.60})$$

где  $i_2$  и  $i'_2$  — соответственно угол падения и угол преломления луча на выходной грани клина.

Далее аналогично предыдущему, выражая углы  $i_2$  и  $i'_2$  через заданные углы  $i$ ,  $i_c$ ,  $i_p$  и  $\sigma$ , для орта  $\bar{A}''$  направления выходящего луча окончательно найдем

$$\begin{aligned} \bar{A}'' = & \left\{ -\sin^2 \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \cos \sigma \left[ \sin \sigma \cos i_p \sin i_c - \right. \right. \\ & \left. \left. - \sqrt{1 - n^2 + (\cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \sin \sigma \cos i_p \sin i_c)^2} \right] \right\} \bar{i} + \\ & + \left\{ \cos^2 \sigma \cos i_p \sin i_c + \sin \sigma \left[ \cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \sqrt{1 - n^2 + (\cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \sin \sigma \cos i_p \sin i_c)^2} \right] \right\} \bar{j} - \\ & - \sin i_p \bar{k}. \end{aligned} \quad (\text{III.61})$$

Из выражения (III.61) можно лишь заметить, что при преломлении вне главного сечения клина угол наклона луча к его ребру не изменяется, так как сохраняется неизменной его проекция на третью ось, что видно из сравнения с формулой (III.54).

Преобразуем формулу (III.61) к другой, более удобной системе координатных осей  $x_1 y_1 z_1$ , переход к которой осуществляется поворотом по часовой стрелке вокруг вертикальной оси  $z$  на угол  $i_c$ . Ось  $x_1$  будет направлена навстречу падающему лучу  $\bar{A}$ . Формулы перехода имеют вид

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x \cos i_c - y \sin i_c; \\ y_1 &= x \sin i_c - y \cos i_c; \\ z_1 &= z. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.62})$$

Для орта  $\bar{A}_1''$  направления выходящего луча в системе осей  $x_1 y_1 z_1$  найдем

$$\begin{aligned} \bar{A}_1'' = & \{ \sin (i_c - \sigma) (R \sin \sigma - \cos \sigma \cos i_p \sin i_c) - Q \cos (i_c - \sigma) \} \bar{i}_1 + \\ & + \{ -\cos (i_c - \sigma) (R \sin \sigma - \cos \sigma \cos i_p \sin i_c) - Q \sin (i_c - \sigma) \} \bar{j}_1 - \\ & - \sin i_p \bar{k}_1. \end{aligned} \quad (\text{III.63})$$

Здесь и в дальнейшем обозначено:

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{n^2 - \sin^2 i}; \\ Q &= \sqrt{1 - n^2 + (R \cos \sigma + \sin \sigma \cos i_p \sin i_c)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.64})$$

Для угла отклонения проекции луча на главное сечение клина напишем

$$\sin \delta_{ic} = - \frac{A''_{1y}}{\sqrt{1 - (A''_{1z})^2}} = - \frac{A''_{1y}}{\sqrt{1 - A_z^2}} = - \frac{A''_{1y}}{\cos i_p}. \quad (\text{III.65})$$

Подставляя значение проекции  $A''_{1y}$  из формулы (III.63), получим

$$\begin{aligned} \sin \delta_{ic} &= \frac{1}{\cos i_p} \times \\ &\times [\cos(i_c - \sigma) (R \sin \sigma - \cos \sigma \cos i_p \sin i_c) + Q \sin(i_c - \sigma)]. \end{aligned} \quad (\text{III.66})$$

Заметим, что действие клина можно полностью оценить одним этим углом  $\delta_{ic}$ , на который выходящий луч поворачивается по отношению к падающему лучу вокруг ребра клина как вокруг оси вращения.

При преломлении луча в главном сечении клина ( $i_p = 0$ ) (формула (III.66)) упростится к виду

$$\begin{aligned} \sin \delta_0 &= \cos(i - \sigma) (\sin \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos \sigma \sin i) + \\ &+ \sin(i - \sigma) \sqrt{1 - n^2 + (\cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \sin \sigma \sin i)^2}. \end{aligned} \quad (\text{III.67})$$

Общие точные выражения для угла отклонения луча, выходящего из клина, практически неудобны ввиду их громоздкости. При расчетах допусков для клиновидности разверток отражательных призм можно пользоваться приближенными формулами, так как клиновидность разверток мала.

Для угла  $\delta_{ic}$  отклонения проекции преломленного луча на плоскость главного сечения клина при малом преломляющем угле  $\sigma$  по формуле Маклорена можно написать

$$\sin \delta_{ic} = F(\sigma) = F(0) + F'(0)\sigma + F''(0)\frac{\sigma^2}{2} + \dots$$

Ограничиваясь первыми двумя членами разложения в ряд, из формулы (III.66) найдем  $F(0) = 0$ , что очевидно.

Для первой производной  $F'_0(0)$  получится

$$F'(0) = \frac{1}{\cos i_p} \left\{ \sin(i_c - \sigma) (R \sin \sigma - \cos \sigma \cos i_p \sin i_c) + \right. \\ \left. + \cos(i_c - \sigma) (R \cos \sigma + \sin \sigma \cos i_p \sin i_c) - Q \cos(i_c - \sigma) + \right. \\ \left. + Q^{-1} \sin(i_c - \sigma) \left[ R \cos 2\sigma \cos i_c \sin i_c - \frac{R^2}{2} \sin 2\sigma + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2} \sin 2\sigma \cos^2 i_p \sin^2 i_c \right] \right\}.$$

Здесь  $R$  и  $Q$  даются формулами (III.64). После подстановки угла  $\sigma = 0$  найдем

$$F'_0(0) = \frac{R}{\cos i_p \cos i_c} - 1.$$

Для угла отклонения  $\delta_{ic}$  получим окончательно

$$\delta_{ic} \approx \sigma \left( \sqrt{1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 i_p \cos^2 i_c}} - 1 \right). \quad (\text{III.68})$$

Выражение (III.17) совпадает с формулой (47.13) из книги А. И. Тудоровского [57].

Для точных расчетов хода лучей через преломляющие призмы и клинья, по-видимому, удобнее формулы, которые получаются с помощью сферической тригонометрии. Точкой  $A$  на сфере рис. 43 отмечен след падающего луча, точкой  $N_1$  — след нормали  $\bar{N}_1$  входной грани клина. Дугой  $\widehat{N_1 A}$  большого круга показана плоскость преломления, причем длина этой дуги равна величине угла падения  $i$ , т. е.  $\widehat{N_1 A} = i$ . Точкой  $A'$  этой дуги отмечен след преломленного луча, а  $\widehat{N_1 A'} = i'$ , где  $i'$  — угол преломления на первой грани клина.

Преломление на второй грани клина происходит в плоскости, которая проходит через точку  $A'$  и точку  $N_2$  — след нормали  $\bar{N}_2$  второй грани клина на сфере. Угол падения на вторую грань  $i_2$  изображается дугой  $\widehat{N_2 A'}$ , а угол преломления  $i'_2$  на той же грани — дугой  $\widehat{N_2 A''}$ . Из предыдущего ясно, что след  $A''$  выходящего луча лежит на одном широтном круге со следом  $A$  падающего луча, если клин находится в воздухе.

Точками  $A_0$  и  $A'_0$  на сфере отметим следы проекций падающего и преломленного на входной грани лучей на плоскость главного сечения клина, а точкой  $\bar{A}_0$  — след проекции выходящего луча.



Из прямоугольных сферических треугольников  $AN_1A_0$  и  $A'N_1A_0$  с общим углом  $\omega$  по формуле синусов напишем

$$\frac{\sin i_p}{\sin i'_p} = \frac{\sin i}{\sin i'},$$

где  $i_p$  и  $i'_p$  — углы наклона соответственно падающего и преломленного лучей к плоскости главного сечения клина.

Приняв во внимание закон преломления, окончательно получим

$$n \sin i_p = n' \sin i'_p, \quad (\text{III.69})$$

где  $n$  и  $n'$  — показатели преломления окружающей среды и материала клина.

Следовательно, для угла наклона луча к главному сечению клина справедлива обычная формула закона преломления.

Для проекции преломленного луча на главное сечение клина из сферических треугольников  $PAN_1$  и  $PA'N_1$  с общим углом  $(90^\circ - \omega)$  получится

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{\cos i_p}{\cos i'_p} \cdot \frac{\sin i_c}{\sin i'_c}.$$

С учетом закона преломления найдем

$$n \cos i_p \sin i_c = n' \cos i'_p \sin i'_c \quad (\text{III.70})$$

или

$$n_c \sin i_c = n'_c \sin i'_c, \quad (\text{III.70a})$$

где  $n_c$  и  $n'_c$  — приведенные показатели преломления окружающей среды и материала клина.

Следовательно, проекции лучей на плоскость главного сечения клина можно просчитывать по формуле, сходной по виду с формулой закона преломления, если вместо показателей преломления  $n$  и  $n'$  сред пользоваться их приведенными показателями преломления  $n_c$  и  $n'_c$ .

Для приведенного показателя преломления  $n_c$  среды, граничащей с воздухом, напишем

$$n_c = \frac{n \cos i'_p}{\cos i_p} = \frac{n}{\cos i_p} \sqrt{1 - \left(\frac{\sin i_p}{n}\right)^2} = \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 i_p}. \quad (\text{III.71})$$

Применим выражение (III.70a) к расчету хода луча через клин в воздухе (рис. 43). Для угла преломления  $i'_c$  на первой грани получим

$$\sin i'_c = \frac{\sin i_c}{n_c},$$

где  $i_c$  — угол падения проекции луча на плоскость главного сечения;

$n_c$  — приведенный показатель преломления по формуле (III.70a).

Угол падения проекции луча на вторую грань равен  $(i_c - \sigma)$ , поэтому для угла выхода луча  $i_c''$

$$\sin i_c'' = n_c \sin (i_c - \sigma) = n_c (\sin i_c \cos \sigma - \cos i_c \sin \sigma).$$

Подставляя выражение для  $n_c$  из формулы (III.71), найдем окончательно

$$\sin i_c'' = \cos \sigma \sin i_c - \sin \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i_c + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 i_p}. \quad (\text{III.72})$$

При ходе луча в главном сечении ( $i_p = 0$ ;  $i_c = i$ ) выражение (III.72) упрощается к виду

$$\sin i'' = \cos \sigma \sin i - \sin \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i}. \quad (\text{III.72a})$$

Для угла поворота  $\delta_{ic}$  выходящего луча вокруг ребра клина из рис. 43 получится

$$\delta_{ic} = i_c - \sigma - i_c''. \quad (\text{III.73})$$

Перейдем к определению влияния клиновидности разверток отражательных призм на ход выходящего луча. Из формул (III.63) и (III.66) следует, что клин отклоняет лучи подобно угловому зеркалу — поворачивает их вокруг своего ребра, как вокруг оси, на угол  $\psi$ .

Матрица канонического вида клина внешне будет вполне совпадать с матрицей углового зеркала по формуле (III.36). Принципиальное отличие состоит в том, что у клина угол поворота лучей  $\psi$  переменной величины, т. е. зависит от угла падения  $i$  луча на входную грань клина и от ориентировки плоскости падения по отношению к его главному сечению. Поэтому положение клина в пространстве следует определять двумя взаимно перпендикулярными ортами — ортом  $\bar{p}_{кл}$  направления ребра клина и ортом  $\bar{N}_1$  нормали его входной грани.

Для клина с произвольным преломляющим углом  $\sigma$  угол вращения луча  $\psi$  дается формулой (III.66), и с учетом формул (III.64) он равен

$$\begin{aligned} \psi = -\delta_{ic} = -\arcsin \left\{ \frac{1}{\cos i_p} \left[ \cos (i_c - \sigma) \times \right. \right. \\ \times (\sin \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos \sigma \cos i_p \sin i_c) + \\ \left. \left. + \sin (i_c - \sigma) \sqrt{1 - n^2 + (\cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \sin \sigma \cos i_p \sin i_c)^2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (\text{III.74})$$

Для клина с малым преломляющим углом  $\sigma$  из формулы (III.68) получится приближенное выражение

$$\psi \approx \sigma \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 i_p \cos^2 i_c}} \right). \quad (\text{III.68a})$$

Из обеих последних формул следует, что для данного клина угол поворота  $\psi$  выходящего луча вокруг ребра зависит как от угла наклона  $i_c$  падающего луча к нормали входной грани в плоскости главного сечения клина, так и от угла наклона  $i_p$  луча к ребру клина.

На основании формулы (III.56) можно переписать формулу (III.68a) к виду

$$\psi \approx \sigma \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 i}} \right) = \sigma \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{n^2 - 1}{(\bar{A}N)^2}} \right). \quad (\text{III.74a})$$

Из последних формул можно также получить известное приближенное выражение

$$\psi \approx \sigma (1 - \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 i}), \quad (\text{III.74б})$$

которое при не очень больших углах падения  $i$  (до  $i \leq 45^\circ$ ) преобразуется к более удобному для расчетов виду

$$\psi \approx \sigma (1 - n) \left( 1 + \frac{n + 1}{2n} \operatorname{tg}^2 i \right). \quad (\text{III.74в})$$

Последняя группа формул (III.74a)—(III.74в) только по внешнему виду совпадает с известными приближенными формулами для угла отклонения луча клином с малым углом  $\sigma$  при преломлении луча в плоскости главного сечения. Здесь эти формулы выражают то важное обстоятельство, что в первом приближении, до малых величин второго порядка, угол  $\psi$  поворота луча вокруг ребра клина с малым преломляющим углом  $\sigma$  зависит лишь от угла  $i$  падения луча на входную грань и не зависит от ориентировки плоскости падения к главному сечению клина. Этот вывод подтверждается и результатами расчета хода луча по точным формулам (III.73) и (III.72) и по приближенной формуле (III.74б). В табл. 8 приведены найденные относительные разности (в %) углов поворота луча для двух клиньев с углами  $\sigma_1 = 0,001 \text{ рад}$  и  $\sigma_2 = 1^\circ$  в зависимости от угла падения  $i$  и от угла разворота  $\varphi$  плоскости падения по отношению к главному сечению клина. Относительная разность определялась по формуле

$$\frac{\Delta\psi}{\psi} 100\% = \frac{\psi - \psi'}{\psi} 100\%,$$

где  $\psi$  — точное значение угла поворота луча вокруг ребра клина;  
 $\psi'$  — приближенное значение того же угла по формуле (III.74б).

Относительная ошибка вычисления (%) величины угла поворота  $\psi$  преломленных клином лучей по приближенной формуле (III.74б) в зависимости от значения угла падения  $i$  и от величины угла  $\varphi$  между плоскостью падения и главным сечением клина

<i>i</i> в град	$\sigma_1 = 0,001 \text{ рад}$				$\sigma_2 = 1^\circ$			
	Величина угла $\varphi$ в град							
	0	30	60	90	0	30	60	90
75	6,08	6,26	6,70	7,25	—8,8	—7,0	—1,6	7,0
60	2,62	2,69	2,83	2,96	—2,12	—1,45	0,43	2,98
45	1,26	1,26	1,26	1,38	—1,23	—0,89	0,33	1,23
30	0,46	0,47	0,47	0,63	—0,75	—0,57	—0,07	0,56
—30	0,63	0,63	0,63	0,63	1,96	1,76	1,25	0,61
—45	1,49	1,49	1,49	1,38	3,96	3,58	2,57	1,33
—60	3,31	3,24	3,11	2,96	9,15	8,26	5,92	3,18
—75	8,50	8,32	7,88	7,31	40,8	33,8	19,9	7,8

Из табл. 8 видно, что при малом преломляющем угле клина ( $\sigma = 0,001 \text{ рад}$ ) разность углов поворота выходящего луча вокруг его ребра заметно возрастает с увеличением угла падения  $i$  на входную грань клина и незначительно зависит от ориентировки плоскости падения относительно главного сечения. Отклонение величин углов  $\psi'$ , вычисленных по приближенной формуле (III.74б), невелико: при углах падения до  $\pm 60^\circ$  оно составляет не более 3,3%, при углах до  $\pm 45^\circ$  — не более 1,5%.

При возрастании преломляющего угла клина до  $\sigma = 1^\circ$  увеличение угла падения  $i$  и изменение угла разворота  $\varphi$  плоскости преломления влияют значительно на угол поворота луча  $\psi$ . Однако и в этом случае относительная ошибка приближенной формулы (III.74б) не превосходит 9,2% при углах падения до  $\pm 60^\circ$ , а при углах до  $\pm 45^\circ$  составляет менее 4%. Для расчетов, которые обычно встречаются при решении юстировочных задач, всегда допустимо пользоваться приближенными формулами группы (III.74а)—(III.74в), так как можно считать, что при малой клиновидности  $\sigma$  величина угла поворота  $\psi$  преломленного луча вокруг ребра зависит в первом приближении только от величины угла падения  $i$  луча на входную грань и не зависит от ориентировки плоскости падения к его сечению.

Продолжая аналогию клина с угловым зеркалом, учитывая лишь что знак угла  $\psi$  отклонения луча клином противоположен знаку угла клина  $\sigma$ , для матрицы  $M''_{\kappa\lambda}$  клиновидной пластинки в соответствии с формулой (III.36) напомним

$$M''_{\kappa\lambda} = \begin{pmatrix} \left[ \cos \psi + 2p_x^2 \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \left[ p_z \sin \psi + 2p_x p_y \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \\ & \left[ -p_y \sin \psi + 2p_x p_z \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \\ \left[ -p_z \sin \psi + 2p_x p_y \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \left[ \cos \psi + 2p_y^2 \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \\ & \left[ p_x \sin \psi + 2p_y p_z \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \\ \left[ p_y \sin \psi + 2p_x p_z \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \left[ -p_x \sin \psi + 2p_y p_z \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \\ & \left[ \cos \psi + 2p_z^2 \sin^2 \frac{\psi}{2} \right] & \end{pmatrix}. \quad (\text{III.75})$$

где  $p_x, p_y, p_z$  — проекции орта  $\bar{p}_{\kappa\lambda}$  направления ребра клина;  $\psi$  — угол поворота луча клином в соответствии с формулами (III.74) или (III.74a)—(III.74в).

Применим полученные формулы к решению практических задач.

**Задача 1.** Найти влияние пирамидальности  $\pi$  призмы Дове на отклонение выходящего пучка лучей, который падает параллельно оси вращения призмы (рис. 44), при условии, что коллимационная ошибка призмы отсутствует, т. е. плоское зеркало, эквивалентное призме Дове, установлено параллельно ее оси вращения.

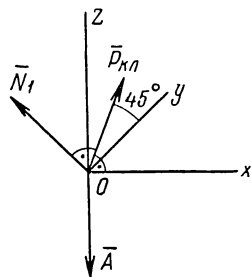


Рис. 44. Влияние пирамидальности призмы Дове

Условия задачи запишем так:  $\bar{A} = -\bar{k}$ ;  $\bar{N}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(-\bar{j} + \bar{k})$ , откуда  $\bar{A}\bar{N}_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}}$ ;  $\bar{p}_{\kappa\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{j} + \bar{k})$ .

Для орта  $\bar{A}''$  направления выходящего луча найдем

$$\bar{A}'' = M''_{\kappa\lambda} \bar{A} = M''_{\kappa\lambda} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -m_{13} \\ -m_{23} \\ -m_{33} \end{pmatrix}. \quad (\text{III.76})$$

Взяв элементы матрицы  $M''_{\kappa\lambda}$  из формулы (III.75) и используя условия задачи, получим

$$A'' = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi \\ -\sin^2 \frac{\psi}{2} \\ -\cos^2 \frac{\psi}{2} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \frac{\psi}{\sqrt{2}} \\ -\frac{\psi^2}{4} \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (\text{III.77})$$

Таким образом, луч из призмы Дове выходит в направлении оси вращения, отклоняясь в плоскости главного сечения на весьма малый угол  $\alpha = -\frac{\psi^2}{4}$  и в перпендикулярном направлении — на угол  $\beta = \frac{\psi}{\sqrt{2}}$ .

Для угла поворота луча  $\psi$  по формуле (III.74б) при  $n = 1,5$  найдем

$$\psi = \theta_\pi (1 - \sqrt{2n^2 - 1}) \approx \approx -0,87\theta_\pi. \quad (\text{III.78})$$

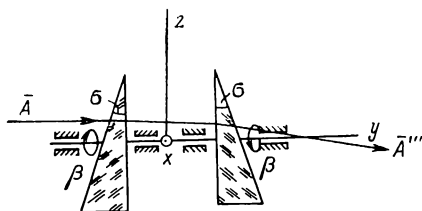


Рис. 45. Двухклиновой компенсатор

В призме Дове углы при гипотенузе равны  $45^\circ$ , поэтому  $\theta_\pi = \sqrt{2}\pi$  и по формуле (III.78) получим

$$\psi = \sqrt{2} \cdot 0,87\pi. \quad (\text{III.78a})$$

Для углов отклонения луча  $\alpha$  и  $\beta$  получим

$$\alpha = -0,3\pi^2; \quad \beta \approx 0,87\pi.$$

Как известно, боковое отклонение луча на угол  $\beta = 0,87\pi$  юстировкой призмы Дове не устраняется и должно быть ограничено соответствующим технологическим допуском на пирамидальность призмы при ее изготовлении.

**Задача 2.** Найти величину поперечной составляющей отклонения пучка лучей, выходящего из двухклинового компенсатора, который используется для точного измерения малых углов отклонения луча в заданном направлении. Схематически такой компенсатор изображен на рис. 45. Два одинаковых клина отсечно вращаются в противоположные стороны на равные углы  $\beta$  вокруг оси  $y$ , перпендикулярной к обращенным друг к другу плоскостям клиньев. Направление падающего пучка параллельных лучей (орт  $\bar{A}$ ) совпадает с направлением этой оси.

Для клиньев с малым преломляющим углом  $\sigma$  в исходном положении, когда главные сечения обоих клиньев совпадают друг

с другим, суммарный угол отклонения пучка лучей равен сумме их углов отклонения, т. е.

$$\delta_0 = 2\delta = 2\sigma(n - 1). \quad (\text{III.79})$$

При взаимном развороте клиньев суммарный угол отклонения будет уменьшаться в соответствии с косинусом угла  $\beta$ , так как

$$\delta_\beta = 2\delta \cos \beta. \quad (\text{III.79a})$$

При вращении клиньев должно сохраняться с достаточной точностью неизменным и направление главного сечения пары клиньев, которое в нашем случае должно совпадать с плоскостью  $yz$  (рис. 45). Однако теоретически [67] и на практике установлено, что в действительности указанные выше положения — постоянно направленные главного сечения пары клиньев и косинусная зависимость суммарного угла отклонения компенсатора по формуле (III.79a) — выполняются лишь приблизительно.

Эрфле способом сферической тригонометрии исследовал работу двухклинового компенсатора, изображенного на рис. 45, и получил формулу для боковой составляющей отклонения луча, которая оказалась равной [67]

$$A_x'' \approx 2\sigma^3(n - 1)^2 \sin \beta \cos^2 \beta, \quad (\text{III.80})$$

т. е. является величиной третьего порядка малости по отношению к углу отклонения луча клином.

Выведем для клинового компенсатора общие точные формулы, пользуясь векторным способом. Поскольку падающий луч совпадает с осью вращения клина, то выходящий из первого клина луч будет вращаться синхронно с ним, описывая поверхность конуса с углом раствора  $2\delta$ . Согласно формуле (III.72a) в данном случае ( $i = -\sigma$ ;  $i'' = \delta$ )

$$\sin \delta = \sin \sigma (\sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma} - \cos \sigma). \quad (\text{III.81})$$

После поворота первого клина на угол  $\beta$  по часовой стрелке (смотря с конца оси  $y$ ) для вектора  $\bar{A}''$  выходящего луча получим

$$\bar{A}'' = \sin \delta \sin \beta \bar{i} + \cos \delta \bar{j} - \sin \delta \cos \beta \bar{k}. \quad (\text{III.82})$$

Поскольку нормаль  $\bar{N}_3$  входной грани второго клина направлена по оси вращения, то  $\bar{N}_3 = -\bar{j}$ , и в соответствии с векторной формулой (III.10a) для направления преломленного луча найдем

$$\bar{A}'' = \frac{1}{n} [\sin \delta \sin \beta \bar{i} + (\sqrt{n^2 - \sin^2 \delta}) \bar{j} - \sin \delta \cos \beta \bar{k}]. \quad (\text{III.83})$$

Повернув второй клин вокруг нормали  $\bar{N}_3$  входной грани против часовой стрелки на угол  $\beta$ , для орта нормали  $\bar{N}_4$  выходной грани напишем

$$\bar{N}_4 = -\sin \sigma \sin \beta \bar{i} - \cos \sigma \bar{j} - \sin \sigma \cos \beta \bar{k}. \quad (\text{III.84})$$

Косинус угла падения луча на выходную грань будет равен скалярному произведению векторов  $\bar{A}''$  и  $\bar{N}_4$  с обратным знаком, т. е.

$$\cos i_4 = -\bar{A}''\bar{N}_4 = \frac{1}{n} (\cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 \delta} - \sin \sigma \sin \delta \cos 2\beta). \quad (\text{III.85})$$

По формуле (III.10a) после преобразований для орта  $\bar{A}''$  выходящего луча окончательно получим

$$\begin{aligned} \bar{A}'' = \sin \beta [\sin \delta - E \sin \sigma] \bar{i} + [\sqrt{n^2 - \sin^2 \delta} - E \cos \sigma] \bar{j} - \\ - \cos \beta [\sin \delta + E \sin \sigma] \bar{k}. \end{aligned} \quad (\text{III.86})$$

Здесь обозначено

$$\begin{aligned} E = \cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 \delta} - \sin \sigma \sin \delta \cos 2\beta - \\ - \sqrt{1 - n^2 + (\cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 \delta} - \sin \sigma \sin \delta \cos 2\beta)^2}. \end{aligned} \quad (\text{III.87})$$

Боковая составляющая отклонения луча равна проекции орта  $\bar{A}''$  на первую ось, т. е. в развернутом виде

$$\begin{aligned} A_x'' = \sin \beta \left\{ \sin \delta - \sin \sigma \left[ \cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 \delta} - \sin \sigma \sin \delta \cos 2\beta - \right. \right. \\ \left. \left. - \sqrt{1 - n^2 + (\cos \sigma \sqrt{n^2 - \sin^2 \delta} - \sin \sigma \sin \delta \cos 2\beta)^2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (\text{III.88})$$

Результаты вычислений по точной формуле (III.88), выполненные для пары клиньев с преломляющими углами  $\sigma = 10^\circ$ , совпали с результатами расчетов по приближенной формуле (III.80) с точностью до 2%.

Такие сравнительные расчеты по точной и приближенной формулам позволяют оценить величину возможной методической ошибки.

#### 14. Системы плоских зеркал и отражательные призмы в сходящемся ходе лучей

Вначале рассмотрим влияние параллельных смещений плоского и углового зеркал.

На рис. 46 жирной штриховой линией показано плоское зеркало  $Z_0$ , совпадающее в исходном положении с плоскостью  $xu$ ; точка падения луча  $\bar{A}$  совпадает с началом  $O$  координат, а нормаль  $\bar{N}$  зеркала — с осью  $z$ . Предположим, что луч, падающий на зеркало под углом  $i$ , является главным лучом светового пучка, который дает изображение точки предмета  $T$  в плоскости  $I$ , перпендикулярной главному лучу.

Построив отраженный луч  $A_0'$  (показан штриховой линией), найдем изображение  $T_0'$  точки в плоскости  $I'$ , которая совпадает с плоскостью экрана  $\mathcal{E}$ .



Плоское зеркало имеет только одно действительное смещение — вдоль своей нормали  $\bar{N}$ , так как сдвиги вдоль отражающей плоскости не влияют на ход отраженного луча. Отрезком сплошной прямой на рис. 46 показано зеркало  $\bar{3}$  после его смещения из исходного положения вдоль нормали  $\bar{N}$  на величину  $\Delta z$ . Построив ход отраженного луча  $\bar{A}'$ , получим смещенное изображение  $T'$  точки предмета, которое лежит на одной нормали с изображением

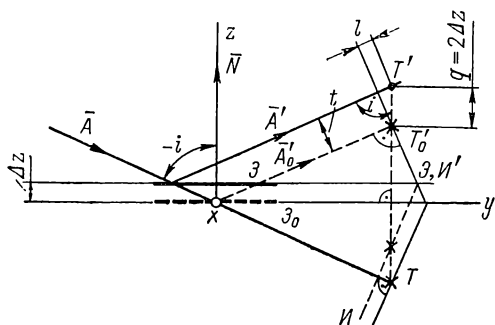


Рис. 46. Влияние сдвига плоского зеркала на расфокусировку и сдвиг изображения

нормали к плоскости экрана — расфокусировка изображения на величину  $l$ . Величина сдвига изображения

$$t = 2 \Delta z \sin i. \quad (\text{III.90})$$

Соответствующая величина расфокусировки изображения

$$l = 2 \Delta z \cos i. \quad (\text{III.91})$$

Таким образом, влияние смещения плоского зеркала зависит от угла падения  $i$  главного луча: с увеличением угла  $i$  возрастает величина поперечного сдвига изображения  $t$  в плоскости экрана  $\mathcal{E}$  и уменьшается величина расфокусировки  $l$ .

Допуски на обе эти величины рассчитываются из конструктивных данных оптической системы и из требований к прибору.

На рис. 47 показано влияние сдвигов углового зеркала, расположенного в сходящемся ходе лучей. Известно, что поворот углового зеркала вокруг его ребра не влияет на положение выходящего луча, так как ребро является осью системы двух зеркал (см. п. 11). Пользуясь этим свойством углового зеркала, можно упростить вывод основных формул, связывающих сдвиги зеркала со смещением изображения точки предмета. При любом параллельном сдвиге системы плоских зеркал все точки пространства изображений смещаются так, что взаимоположение точек остается неизменным, иначе говоря, все пространство изображений смещается как единое целое. Это положение непосредственно вытекает из того, что увеличение любой системы плоских зеркал по

абсолютной величине равно единице. Поэтому величина смещения угловым зеркалом любой одной точки пространства изображений характеризует смещение всех точек этого пространства.

При выводе интересующих нас формул положим, что точка предмета  $T$  при исходном положении углового зеркала совпадает с его вершиной  $P_0$  (рис. 47). Тогда изображение  $T''_0$  этой точки в угловом зеркале совпадает с самой точкой предмета  $T$ . Предположим далее, что падающий луч  $\bar{A}$  направлен по оси  $x$  в отрицательную сторону, а ребро углового зеркала перпендикулярно плоскости  $xu$  и проходит через начало  $O$  системы координатных

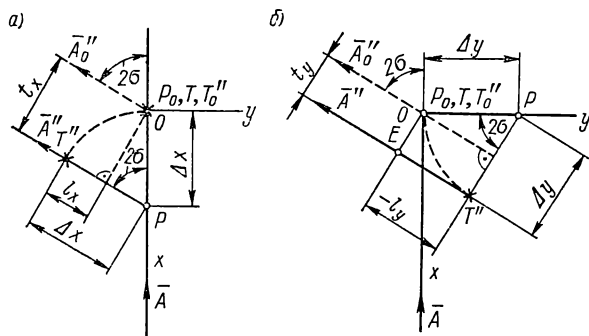


Рис. 47. Влияние сдвигов углового зеркала на расфокусировку и сдвиг изображения

осей. Тогда выходящий луч  $\bar{A}_0''$  (показан штриховой прямой) отклонится под углом  $2\sigma$  по отношению к падающему, пересекаясь с последним в вершине  $P_0$ . На рис. 47 угол  $\sigma$  принят положительным.

Рассмотрим влияние сдвигов углового зеркала в плоскости его главного сечения вдоль падающего луча  $\bar{A}$  (вдоль оси  $x$  на рис. 47, а) и в поперечном направлении (вдоль оси  $y$  на рис. 47, б).

После сдвига углового зеркала из исходного положения на величину  $\Delta x$  его вершина сместится в точку  $P$  (рис. 47, а). Изображение точки предмета  $T$  окажется в точке  $T''$ , которая лежит на дуге окружности, проведенной из точки  $P$  радиусом  $\overline{PT}$ , под углом  $2\sigma$  к падающему лучу. При новом положении углового зеркала выходящий луч  $\bar{A}''$  (показан сплошной прямой), на котором лежат точки  $P$  и  $T''$ , сдвинется параллельно выходящему лучу  $\bar{A}_0''$  при исходном положении зеркала на величину  $t_x$ , что вызовет такой же величины сдвиг изображения  $T''$ . Изображение точки  $T''$  сместится также вдоль выходящего луча на величину  $l_x$ , что вызовет такую же по величине расфокусировку изображения. Смещение  $l$  отсчитывается от перпендикуляра опущенного

из изображения  $T_0$  точки при исходном положении вершины зеркала на направление выходящего луча  $\overline{PT''}$ .

Для величины поперечного сдвига  $t_x$  и для величины расфокусировки изображения  $l_x$  из рис. 47, а получим

$$t_x = \Delta x \sin 2\sigma. \quad (\text{III.92})$$

и

$$l_x = 2 \Delta x \sin^2 \sigma. \quad (\text{III.93})$$

Совершенно аналогично из рис. 47, б можно найти влияние сдвига углового зеркала поперек падающего луча, т. е. вдоль оси  $y$  на величину  $\Delta y$ . Здесь также найдено положение изображения точки  $T''$ , а затем и его сдвиг поперек выходящего луча  $\overline{AT''}$  на величину  $t_y$  и смещение вдоль луча на величину  $-l_y$ . Знак минус показывает, что в данном случае получается расфокусировка обратного направления — от наблюдателя.

Для величины сдвига изображения получим

$$t_y = 2 \Delta y \sin^2 \sigma. \quad (\text{III.94})$$

Аналогично для величины расфокусировки изображения  $l_y$  найдем

$$l_y = -\Delta y \sin 2\sigma. \quad (\text{III.95})$$

В общем случае угловое зеркало может быть сдвинуто как вдоль, так и поперек падающего луча; тогда суммарная величина поперечного сдвига изображения  $t$  будет равна

$$t = t_x + t_y = 2 \sin \sigma (\Delta x \cos \sigma + \Delta y \sin \sigma). \quad (\text{III.96})$$

Суммарная величина расфокусировки изображения  $l$  составит

$$l = l_x + l_y = 2 \sin \sigma (\Delta x \sin \sigma - \Delta y \cos \sigma). \quad (\text{III.97})$$

Формулы (III.96) и (III.97) позволяют найти особые плоскости, проходящие через ребро углового зеркала и обладающие тем свойством, что при смещении вершины зеркала вдоль одной из них не возникает поперечного сдвига выходящего луча ( $t = 0$ ), а при смещении вдоль другой — расфокусировки изображения ( $l = 0$ ). При первом условии ( $t = 0$ ), приравнявая нулю выражение (III.96), для тангенса угла  $\gamma_{t=0}$  наклона следа первой особой плоскости получим

$$\operatorname{tg} \gamma_{t=0} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = -\operatorname{tg} \sigma. \quad (\text{III.98})$$

След этой плоскости на рис. 48 показан штриховой прямой  $t = 0$ , которая с осью  $y$  составляет угол  $\sigma$ .

При втором условии ( $l = 0$ ), приравнявая нулю выражение (III.97), для тангенса угла  $\gamma_{l=0}$  наклона следа второй особой плоскости найдем

$$\operatorname{tg} \gamma_{l=0} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \operatorname{ctg} \sigma. \quad (\text{III.99})$$



на малый угол  $\alpha$  не вызывают соответственно расфокусировки изображения и отклонения выходящего луча по высоте, т. е.  $l = 0$  и  $\beta''_{\alpha} = 0$ . Вторая плоскость, перпендикулярная первой, отличается тем, что сдвиг ребра вдоль нее и его наклон на малый угол  $\alpha$  не вызывают поперечного сдвига изображения и наклона изображения, т. е.  $t = 0$  и  $\alpha''_{\alpha} = 0$ .

Выводы о влиянии наклонов ребра справедливы для случая, когда падающий луч в исходном положении углового зеркала перпендикулярен его ребру. В обоих случаях угол бокового откло-

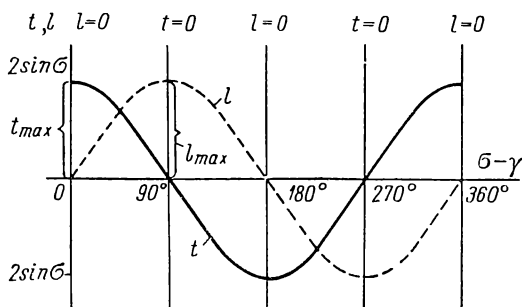


Рис. 49. График величины расфокусировки и величины сдвига изображения в зависимости от направления смещений углового зеркала

нения выходящего луча равен  $\gamma''_{\alpha} = \frac{\alpha^2}{2} \sin 2\sigma$ , т. е. является малой величиной второго порядка.

Рассмотрим в общем виде зависимость величины поперечного сдвига  $t$  и продольного смещения  $l$  изображения точки  $T''$  от направления сдвига вершины углового зеркала.

При сдвиге вершины зеркала на единицу длины вдоль прямой, повернутой относительно падающего луча и оси  $x$  на угол  $\gamma$ , для проекций величины сдвига на оси  $x$  и  $y$  напомним

$$\Delta x = \cos \gamma; \quad \Delta y = \sin \gamma. \quad (\text{III.100})$$

Подстановкой этих величин в формулы (III.96) и (III.97) для величины поперечного сдвига выходящего луча получим

$$t = 2 \sin \sigma \cos(\sigma - \gamma), \quad (\text{III.101})$$

и аналогично для величины расфокусировки изображения найдем

$$l = 2 \sin \sigma \sin(\sigma - \gamma). \quad (\text{III.102})$$

На графике рис. 49 найденные зависимости изображаются синусоидами, взаимно сдвинутыми на  $90^\circ$ . Синусоиды отмечены буквами  $t$  и  $l$  в соответствии с тем, что они выражают: поперечный сдвиг или расфокусировку изображения. Вертикальные прямые

$l = 0$  и  $t = 0$  пересекают ось абсцисс при значениях угла  $\gamma$ , соответствующих найденным особым плоскостям углового зеркала с теми же обозначениями. Из формул (III.101) и (III.102), а также из графика рис. 49 следует, что при смещении вершины угла двойного зеркала вдоль оси  $l = 0$  отсутствует расфокусировка изображения, но получается наибольшей величины поперечный сдвиг выходящего луча  $t_{\max}$ , при смещении же вдоль оси  $t = 0$  не наблюдается поперечного сдвига, но возникает наибольшей величиной расфокусировка изображения  $l_{\max}$ . По абсолютной величине эти наибольшие сдвиг и смещение изображения равны друг другу, причем

$$|t_{\max}| = |l_{\max}| = 2 \sin \sigma. \quad (\text{III.103})$$

Таким образом, влияние сдвигов и смещений углового зеркала на сдвиги и смещения изображения зависит только от величины угла  $\sigma$  между зеркалами: чем меньше угол  $\sigma$ , тем слабее влияние перемещений углового зеркала. Передаточный коэффициент может иметь величину от нуля (при  $\sigma = 0$  или  $\sigma = 180^\circ$ ) до двух (при  $\sigma = 90^\circ$ ).

Перейдем к определению положения луча, отраженного от системы плоских зеркал, которая вращается в сходящемся ходе лучей вокруг оси, произвольно расположенной в пространстве (рис. 50, а).

Радиус-вектор изображения точки  $T^{(k)}$  относительно неподвижного полюса  $O$ , с которым совпадает точка предмета  $T$ , обозначим  $\bar{\rho}^{(k)}$ ; тогда для радиуса-вектора  $\bar{r}^{(k)}$  текущей точки отраженного луча  $\bar{A}^{(k)}$  можно написать следующее векторное уравнение [6]:

$$\bar{r}^{(k)} = \bar{\rho}^{(k)} + \lambda \bar{A}^{(k)}, \quad (\text{III.104})$$

где  $\lambda$  — переменный по величине скалярный множитель;  
 $k$  — число отражений точки в зеркальной системе.

Для вращающегося плоского зеркала из общей формулы (III.104) получится (рис. 50, б)

$$\bar{r}' = \bar{\rho}' + \lambda \bar{A}', \quad (\text{III.105})$$

где  $\bar{\rho}'$  — радиус-вектор изображения  $T'$  точки, отраженной от плоского зеркала, относительно точки предмета  $T$ ;

$\bar{A}'$  — орт направления выходящего луча, отраженного от плоского зеркала и сопряженного с падающим лучом — ортом  $\bar{A}$ .

Совершенно аналогично можно написать векторное уравнение текущей точки луча, отраженного от углового зеркала (рис. 50, в):

$$\bar{r}'' = \bar{\rho}'' + \lambda \bar{A}'', \quad (\text{III.106})$$

где  $\vec{\rho}''$  — радиус-вектор изображения  $T''$  от точки предмета  $T$ , через которую проходит падающий луч;

$\vec{A}''$  — орт направления выходящего луча.

Для практических расчетов во многих случаях более удобны развернутые выражения, в которых используются ранее полученные матрицы действия зеркал. На рис. 50, б выполнены необхо-

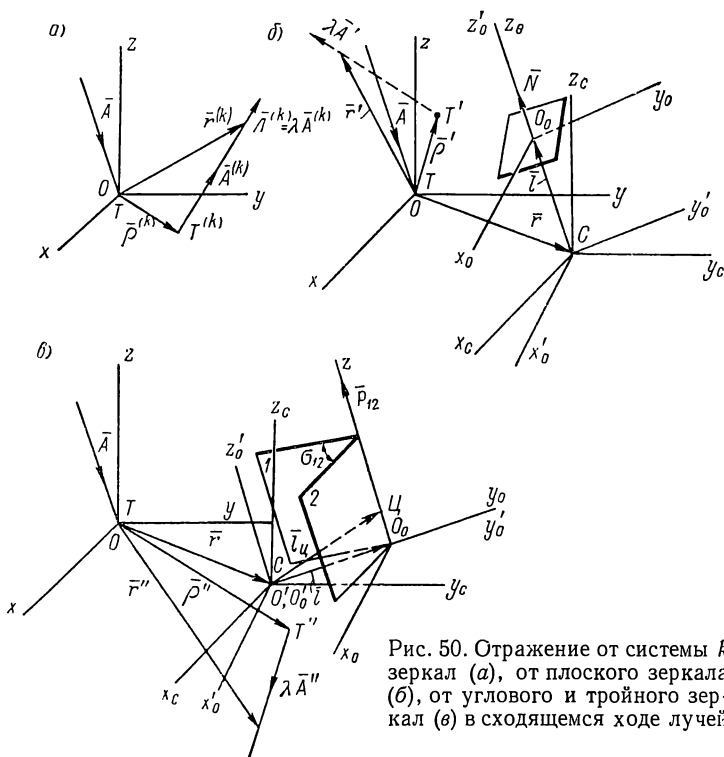


Рис. 50. Отражение от системы  $k$  зеркал (а), от плоского зеркала (б), от углового и тройного зеркал (в) в сходящемся ходе лучей

димые построения для случая отражения точки предмета от плоского зеркала, произвольно расположенного в пространстве. Через неподвижную точку предмета  $T$  проходит падающий луч  $\vec{A}$ . С точкой  $T$  совмещено начало  $O$  неподвижных координатных осей  $xuz$ .

Плоское зеркало вращается вокруг неподвижной точки  $C$ , удаленной от точки  $T$  на расстояние  $r$ , а от отражающей плоскости зеркала (точка  $O_0$ ) — на расстояние  $l$ . В точке  $C$  построена система неподвижных координатных осей  $x_c y_c z_c$ , параллельных исходным неподвижным осям  $xuz$ , а также система осей  $x'_0 y'_0 z'_0$ , параллельных основным осям  $x_0 y_0 z_0$  плоского зеркала и смещенных вдоль оси  $z_0$ , т. е. вдоль орта  $\vec{N}$  нормали зеркала, на расстояние  $l$ . Нормаль  $\vec{N}$

зеркала повернута вокруг оси  $z_c$  и наклонена вокруг оси  $x'_0$  (ср. с рис. 39) согласно матрице  $S_0$  преобразования (поворотов) координат. Матрица  $S_0$  получается из матрицы  $S$  по формуле (III.35), если в последнюю вместо проекции орта  $\bar{p}$  направления ребра углового зеркала подставить проекции орта нормали  $\bar{N}$  на одноименные оси  $x_c y_c z_c$ .

Для нахождения развернутого выражения для радиуса-вектора  $\bar{\rho}'$  изображения точки  $T'$  необходимо выполнить следующие операции.

1. Найти положение точки предмета  $T$  в системе осей  $x_c y_c z_c$ , определяемое радиусом-вектором  $-\bar{r}$ .

2. Найти положение той же точки  $T$  в системе осей  $x'_0 y'_0 z'_0$ , повернутой к координатным осям  $x_c y_c z_c$  согласно упомянутой матрице  $S_0$ .

3. Найти положение точки  $T$  в системе собственных основных осей зеркала  $x_0 y_0 z_0$ , в результате чего получится радиус-вектор  $\bar{r}_0$  (на рис. 50, б не показан) точки  $T$  в этой же системе координат:

$$\bar{r}_0 = -(\bar{l} + S_0 \bar{r}) = -(l \bar{N}_0 + S_0 \bar{r}),$$

где  $l$  — расстояние от точки  $C$  до отражающей плоскости зеркала;

$\bar{N}_0$  — орт нормали плоского зеркала в основной системе осей  $x_0 y_0 z_0$ , причем  $\bar{N}_0 = \bar{k}_0$ .

4. Умножением радиуса-вектора  $\bar{r}_0$  на матрицу канонического вида  $P'$  для плоского зеркала по формуле (III.21) найти радиус-вектор  $\bar{r}'_0$  (на рис. 50, б тоже не показан) изображения точки  $T'$  в основных осях  $x_0 y_0 z_0$ :

$$\bar{r}'_0 = P' \bar{r}_0 = -P' (l \bar{N}_0 + S_0 \bar{r}).$$

5. Выполнить обратные преобразования координат и найти радиус-вектор  $\bar{\rho}'$  изображения точки  $T'$  в исходных осях  $x y z$ . В результате указанных действий получим

$$\bar{\rho}' = \bar{r} + S_0^{-1} \{ l \bar{N}_0 - P' (l \bar{N}_0 + S_0 \bar{r}) \}. \quad (\text{III.107})$$

Преобразуя последнее выражение, напомним

$$\bar{\rho}' = (1 - S_0^{-1} P' S_0) \bar{r} + S_0^{-1} (1 - P') l \bar{N}_0. \quad (\text{III.107a})$$

Аналогично формуле (III.34) в данном случае можно написать

$$S_0^{-1} P' S_0 = M',$$

где  $M'$  — матрица плоского зеркала в системе осей  $x_c y_c z_c$  или в системе параллельных им осей  $x y z$ .



Подставляя, кроме того, матрицу  $P'$  плоского зеркала из формулы (III.21) и учтя, что  $\bar{N}_0 = \bar{k}_0$ , после преобразований найдем

$$S_0^{-1}(1 - P')l\bar{N}_0 = 2l\bar{N},$$

где  $\bar{N}$  — орт направления нормали плоского зеркала в неподвижной системе  $xyz$ .

Для радиуса-вектора  $\bar{r}'$  точки выходящего луча в соответствии с формулой (III.104) можно написать следующее развернутое выражение:

$$\bar{r}' = (1 - M')\bar{r} + 2l\bar{N} + \lambda M'\bar{A}, \quad (\text{III.108})$$

где  $\bar{r}$  — радиус-вектор точки вращения зеркала  $C$  относительно неподвижной точки  $T$  пространства предметов;

$l$  — расстояние от точки  $C$  до отражающей плоскости зеркала;

$\bar{N}$  — орт нормали плоского зеркала;

$\bar{A}$  — орт направления падающего луча;

$\lambda$  — переменный скалярный множитель;

$M'$  — матрица действия плоского зеркала на направление отраженных лучей в соответствии с формулой (III.20).

Совершенно аналогично можно получить развернутое выражение для луча, отраженного от углового зеркала, которое составлено зеркалами 1 и 2. Выполняя преобразования координат в соответствии с рис. 50, в, сначала следует найти положение точки  $T$  пространства предметов в основной системе координатных осей  $x_0y_0z_0$  углового зеркала, ребро которого отстоит от точки вращения  $C$  на расстояние  $l$ , т. е. получить радиус-вектор  $\bar{r}_0$  точки  $T$ . Затем с помощью матрицы канонического вида  $P''$  из формулы (III.32) необходимо найти радиус-вектор  $\bar{r}_0''$  изображения точки  $T''$ . Для перехода к исходной системе  $xyz$  следует выполнить обратные преобразования координат. В результате для радиуса-вектора  $\bar{\rho}''$  изображения точки  $T''$  получится выражение, совпадающее по виду с формулой (III.107а), а именно:

$$\bar{\rho}'' = (1 - S_0^{-1}P''S_0)\bar{r} + S_0^{-1}(1 - P'')\bar{l}_0. \quad (\text{III.109})$$

После подстановки матрицы  $M''$  из формулы (III.36) и преобразования вектора  $\bar{l}_0$  из основной системы осей углового зеркала  $x_0y_0z_0$  в неподвижную координатную систему  $xyz$  напомним

$$\bar{\rho}'' = (1 - M'')(\bar{r} + \bar{l}), \quad (\text{III.109a})$$

где  $\bar{l}$  — вектор  $\bar{l}_0$ , записанный в системе осей  $xyz$ .

Для радиуса-вектора  $\vec{r}''$  текущей точки выходящего луча по формуле (III.106) в системе осей  $xyz$  получим

$$\vec{r}'' = (1 - M'')(\vec{r} + \vec{l}) + \lambda M'' \vec{A}, \quad (\text{III.110})$$

где  $\vec{r}$  — радиус-вектор точки вращения зеркала  $C$  от неподвижной точки  $T$  пространства предметов;

$\vec{l}$  — радиус-вектор точки ребра углового зеркала, лежащей на перпендикуляре, опущенном из точки  $C$  относительно самой точки  $C$ ;

$\lambda$  — переменный скалярный множитель;

$\vec{A}$  — орт направления падающего луча;

$M''$  — матрица действия углового зеркала с углом  $\sigma_{12}$  и ребром  $\vec{p}_{12}$  по формуле (III.36).

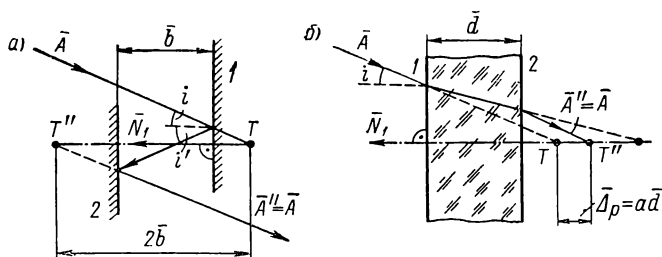


Рис. 51. Изображение точки через зеркальный ромб (а) и через плоскопараллельную пластинку (б)

Для зеркального ромба и плоскопараллельной пластинки получатся более простые формулы. Оптическое действие обеих этих систем по существу одинаково: изображение  $T''$  точки предмета они смещают на некоторую величину по отношению к самой точке предмета  $T$  вдоль перпендикуляра, опущенного из точки  $T$  на обе плоскости 1 и 2.

Если расстояние между зеркалами 1 и 2 ромба равно  $b$ , а  $\vec{N}_1$  — орт направления нормали первого зеркала, то, как видно из рис. 51, а, величина смещения изображения

$$\vec{T}\vec{T}'' = 2\vec{b} = 2b\vec{N}_1. \quad (\text{III.111})$$

В силу безабберационности плоских зеркал величина смещения  $2b$  не зависит от угла падения лучей на зеркальный ромб.

Плоскопараллельная пластинка обладает абберациями, так как ход преломленных лучей зависит от их угла падения. На рис. 51, б показан ход одного из наклонных лучей от точки предмета  $T$ . Изображением  $T''$  этой точки будем считать точку пересечения продолженного выходящего преломленного луча

с перпендикуляром, опущенным на входную грань пластинки из точки  $T$ . Величина смещения изображения

$$\begin{aligned}\overline{\Delta}_p &= \overline{T}\overline{T}'' = \left(1 - \frac{\cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}\right) \overline{d} = a\overline{d} = \\ &= -a d \overline{N}_1 \approx -\frac{1-n}{n \cos i} d \overline{N}_1,\end{aligned}\quad (\text{III.112})$$

где  $d$  — толщина пластинки;

$\overline{N}_1$  — орт нормали преломляющей поверхности 1.

Изображение точки  $T''$  здесь тоже смещено в направлении от входной грани 1 пластинки к выходной грани 2. Величина же смещения изображения возрастает с увеличением угла падения  $i$ . Если показатель преломления  $n = 1,5$ , получим, что при  $i = 0$  величина в скобках в формуле (III.112)  $a = \frac{n-1}{n} = \frac{1}{3}$ ; при  $i = 45^\circ$  она увеличится до  $a \approx 0,466$  (по приближенной формуле  $a \approx 0,471$ ), а при  $i = 90^\circ$  она уже будет равна единице. Приближенная формула для угла  $i = 90^\circ$  непригодна, а для углов падения не более  $45^\circ$  приближенная формула дает ошибку меньше 1,3%.

Для радиуса-вектора  $\overline{r}_{\sigma=0}''$  текущей точки луча, выходящего из зеркального ромба толщины  $b$ , получим простое выражение

$$\overline{r}_{\sigma=0}'' = 2b\overline{N}_1 + \lambda\overline{A}, \quad (\text{III.113})$$

где  $\overline{N}_1$  — орт направления нормали отражающей грани 1 зеркального ромба;

$b$  — расстояние между зеркалами 1 и 2 ромба;

$\lambda$  — скалярный множитель переменной величины;

$\overline{A}$  — орт направления падающего луча.

Выражение (III.113) применимо и к плоскопараллельной пластинке, если постоянный коэффициент 2 перед  $b$  заменить переменным коэффициентом  $a$ , входящим в формулу (III.112); тогда

$$\overline{r}_{n,a}'' = \left( \frac{\cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} - 1 \right) d \overline{N}_1 + \lambda \overline{A}. \quad (\text{III.114})$$

Косинус угла падения  $i$  равен

$$\cos i = -\overline{A}\overline{N}_1. \quad (\text{III.115})$$

Из формул (III.113) и (III.114) видно, что параллельные смещения ромба и плоскопараллельной пластинки не влияют на положение изображения точки. Положение зеркального ромба или плоскопараллельной пластинки вполне определяется направлением одной лишь нормали  $\overline{N}_1$  поверхности 1.

Перейдем к выводу выражения для радиуса-вектора текущей точки луча, отраженного от системы трех плоских зеркал, которая

не эквивалентна плоскому зеркалу. Для системы трех зеркал, эквивалентных одному плоскому зеркалу, пригодна формула (III.108), выведенная для плоского зеркала.

Из пространственных систем трех плоских зеркал наибольшее применение на практике находят такие, в которых угол между двумя смежными зеркалами прямой. Таковы призмы с двумя отражениями и с прямоугольной крышей на одной из отражающих граней (рис. 52). Крышу 1, 2 можно заменить эквивалентным плоским зеркалом  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  с отрицательной матрицей и привести призму с крышей к эквивалентному угловому зеркалу с углом  $\sigma_z = \sigma - 90^\circ$ . Ребро эквивалентного зеркала параллельно ребру исходной отражательной призмы с двумя отражениями. Матрица  $P''$  исходной призмы с углом  $\sigma$  и матрица  $P'_z$  эквивалентного зеркала с углом  $\sigma_z$  будут отличаться друг от друга знаком. Но обе системы обладают одинаковым действием: отраженный луч в обоих случаях будет иметь одно и то же направление, так как синусы и косинусы углов поворота луча вокруг ребра одинаковы. В самом деле, для синуса и косинуса двойного угла  $2\sigma_z$ , входящих в матрицу  $P'_z$  эквивалентного углового зеркала, можно написать

$$\sin 2\sigma_z = \sin 2(\sigma - 90^\circ) = -\sin 2\sigma$$

и

$$\cos 2\sigma_z = \cos 2(\sigma - 90^\circ) = -\cos 2\sigma.$$

Меняя знак у ортов падающих лучей, в обоих случаях получим одинаковый результат, как это показано на рис. 52 сплошными линиями для призмы двойного отражения с крышей и штриховыми линиями — для эквивалентной системы двух зеркал  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  и  $\mathcal{Z}$ .

В сходящемся ходе лучей такая призма с крышей имеет не ось, а центр, который находится в точке пересечения ребра углового зеркала, эквивалентного исходной призме двойного отражения, с плоскостью, проходящей через ребро крыши и перпендикулярной указанному ребру. Местоположение ребра эквивалентного зеркала находится по способу, указанному на стр. 146. На рис. 50, в этот центр отмечен точкой  $\mathcal{C}$ , а его положение относительно начала системы осей  $x'_0 y'_0 z'_0$  определено вектором  $\bar{l}_u$ . Вывод формулы для радиуса-вектора  $\bar{r}'''$  текущей точки луча, отраженного от трехзеркальной системы общего вида, выполняется аналогично тому, как это делалось в случае плоского и углового зеркал. Трехзеркальную систему при этом можно рассматривать как совокупность углового зеркала, образованного двумя первыми

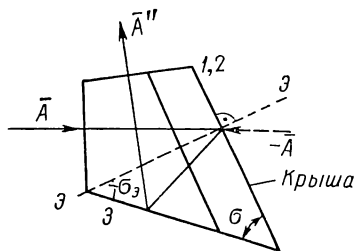


Рис. 52. Отражение луча в пентапризме с крышей

по ходу луча зеркалами 1 и 2, и третьего плоского зеркала. В общей точке пересечения всех трех зеркал и находится центр системы  $\bar{C}$ . В результате для радиуса-вектора  $\bar{\rho}''$  изображения  $T''$  точки предмета в исходной системе неподвижных осей  $xuz$  получим

$$\bar{\rho}'' = (1 - M'')(\bar{r} + \bar{l}_u). \quad (\text{III.116})$$

Для радиуса-вектора  $\bar{r}''$  текущей точки выходящего луча согласно формуле (III.106) найдем

$$\bar{r}'' = (1 - M'')(\bar{r} + \bar{l}_u) + \lambda M'' \bar{A}, \quad (\text{III.117})$$

где  $\bar{r}$  — радиус-вектор неподвижной точки  $C$ , вокруг которой вращается зеркальная система относительно неподвижной точки  $T$  пространства предметов;

$\bar{l}_u$  — радиус-вектор центра  $\bar{C}$  системы относительно точки  $C$ ;

$\bar{A}$  — орт направления падающего луча;

$\lambda$  — переменный скалярный множитель;

$M''$  — матрица трехзеркальной системы, равная произведению матрицы  $M''_{12}$  углового зеркала, составленного из двух первых по ходу луча зеркал 1 и 2, на матрицу  $M'_3$  третьего зеркала. Эти матрицы даются соответственно формулами (III.36) и (III.20).

Систему трех плоских зеркал с компланарными нормальными в сходящемся ходе световых лучей можно привести или к одному эквивалентному плоскому зеркалу, или же к плоскому зеркалу в сочетании с зеркальным ромбом, перпендикулярным к этому зеркалу. На рис. 53 схематически показана такая система зеркал 1, 2 и 3, перпендикулярных плоскости рисунка. Ломаной линией с одной стрелкой показан ход произвольного луча, который на зеркала 1, 2 и 3 падает под углами  $i_1, i_2, i_3$  соответственно. После отражения от системы двух зеркал 1 и 2 с углом  $\sigma_{12}$  между ними этот луч составит с лучом, падающим на зеркало 1, угол  $2\sigma_{12}$ . Оба угла отсчитываются против часовой стрелки.

Ломаной линией с двумя стрелками показан ход второго луча, который параллелен лучу с одной стрелкой и падает в вершину  $P_{12}$  угла между зеркалами 1 и 2, а затем отражается под тем же углом  $2\sigma_{12}$ . После отражения от зеркала 3 этот второй луч как бы исходит из изображения вершины  $P'_{12}$  в зеркале 3 и выходит из системы зеркал параллельно лучу с одной стрелкой.

Теперь перенесем зеркало 3 параллельно себе до его пересечения с вершиной  $P_{12}$ ; величину смещения обозначим  $l$ , а зеркало 3 в новом положении отметим  $3'$ . При этом новом положении зеркала 3 вершина  $P_{12}$  изобразится в нем сама в себя.

Далее построим ход луча с двумя стрелками при отражении от системы зеркал 1, 2 и  $3'$ . После отражения в вершине  $P_{12}$  этот луч образует угол  $\alpha$  с зеркалом  $3'$ , а после отражения от зер-

кала  $3'$  — такой же величины угол  $\alpha$ , но обратного знака. Все углы отсчитываются также против часовой стрелки.

В результате трех отражений от зеркал  $1$ ,  $2$  и  $3'$  выходящий луч по отношению к падающему лучу просто повернется вокруг вершины  $P_{12}$  в плоскости рисунка на угол  $\alpha_{\lambda}$ . Разделив угол  $\alpha_{\lambda}$  пополам, найдем направление нормали  $\bar{N}_3$  эквивалентного зеркала  $\mathcal{Z}_0\mathcal{Z}_0$ . Угол падения луча на это зеркало отмечен  $i_3$ .

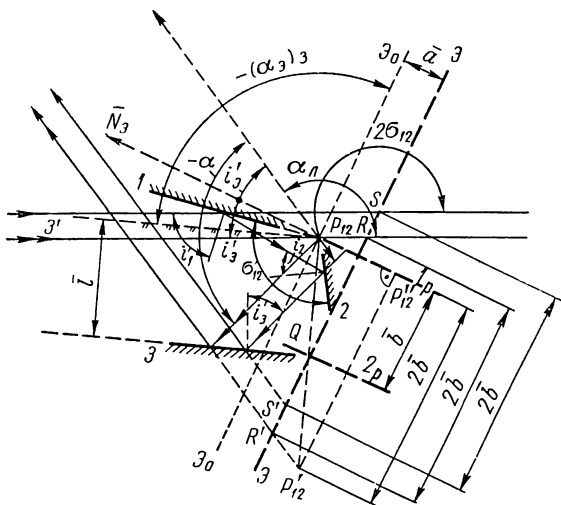


Рис. 53. Приведение системы трех плоских зеркал к эквивалентному зеркалу в сочетании с перпендикулярным ему зеркальным ромбом

Направление эквивалентного зеркала  $\mathcal{Z}_0\mathcal{Z}_0$  определяется углом  $(\alpha_3)_3$ , который оно составляет с зеркалом  $3$  системы. Из рис. 53 найдем

$$(\alpha_3)_3 = -\sigma_{12}, \quad (\text{III.118})$$

т. е. плоскость эквивалентного зеркала  $\mathcal{Z}_0\mathcal{Z}_0$  образует с плоскостью зеркала  $3$  угол, равный по величине и противоположный по знаку углу  $\sigma_{12}$  между зеркалами  $1$  и  $2$ .

Следовательно, действительно система трех плоских зеркал  $1$ ,  $2$  и  $3'$ , пересекающихся в общей точке  $P_{12}$ , может быть заменена одним эквивалентным плоским зеркалом  $\mathcal{Z}_0\mathcal{Z}_0$ , которое проходит через ту же точку  $P_{12}$ . Такова, например, система двух плоских зеркал с автоколлимационным ходом отраженных лучей: эквивалентное зеркало проходит через вершину угла между зеркалами (см. рис. 37, ж).

Вернемся к действительной системе зеркал  $1$ ,  $2$  и  $3$ , сместив зеркало  $3'$  параллельно себе на расстояние  $l$  в прежнее положение. Теперь вершина  $P_{12}$  зеркал  $1$  и  $2$  в зеркале  $3$  изобразится

в точке  $P'_{12}$ , отстоящей на расстоянии  $2l$  от точки  $P_{12}$ . Направление эквивалентного зеркала и для этой системы останется прежним, так как углы между зеркалами 1, 2 и 3 не изменились. Однако положение эквивалентного зеркала изменится.

Для его нахождения заметим, что изображение точки  $P'_{12}$  можно получить, если сначала найти изображение промежуточной точки  $P''_{12}$ , лежащей в точке пересечения продолженной нормали  $N_3$  с перпендикуляром, опущенным из точки  $P'_{12}$ .

Эквивалентное зеркало  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  проходит перпендикулярно отрезку  $\overline{P''_{12}P'_{12}}$ , деля его пополам. Из рис. 53 видно, что это зеркало проходит также и через точку  $Q$ , делящую пополам отрезок перпендикуляра  $\overline{P_{12}P'_{12}}$ , опущенного из вершины  $P_{12}$  на зеркало 3. Расстояние между точками  $P''_{12}$  и  $P'_{12}$  обозначим через  $2b$ , причем  $2b = \overline{P''_{12}P'_{12}}$ . На это расстояние смещается изображение точки  $P_{12}$  в эквивалентном зеркале  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  (т. е. точка  $P''_{12}$ ) вдоль его плоскости.

Такое смещение изображения точки  $P'_{12}$  на расстояние  $2b$  можно рассматривать как отражение точки  $P'_{12}$  в зеркальном ромбе, зеркала которого  $1_p$  и  $2_p$  перпендикулярны плоскости эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  и разделены друг от друга расстоянием  $b$ . Величина смещения вдоль зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  для всех отраженных лучей постоянна и равна  $2b$ .

На рис. 53 падающие лучи с одной и двумя стрелками продолжены до пересечения с плоскостью эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$ . В первом случае получена точка пересечения  $S$ , во втором случае — точка  $R$ . Их изображения — точки  $S'$  и  $R'$  — смещены в плоскости  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  на то же расстояние  $2b$ . Через точки  $S'$  и  $R'$  проходят точки пересечения с плоскостью  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  продолженных выходящих лучей с одной и с двумя стрелками.

Следовательно, можно заключить, что система трех плоских зеркал 1, 2 и 3 с компланарными нормальными в сходящемся ходе лучей действительно эквивалентна одному плоскому зеркалу  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  в сочетании с зеркальным ромбом, перпендикулярным этому зеркалу.

Нормали эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  и зеркал  $1_p$  и  $2_p$  ромба компланарны нормальным зеркал 1, 2 и 3 исходной системы. Нормаль  $N_3$  эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  делит пополам угол между лучом, падающим на зеркало 1 системы, и лучом, выходящим из системы после отражения от зеркала 3.

Плоскость эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  проходит через точку  $Q$  зеркала 3, в которой последнее пересекается с перпендикуляром, опущенным из вершины  $P_{12}$  зеркал 1 и 2. Расстояние  $b$  между зеркалами ромба равно проекции отрезка между точками  $P_{12}$  и  $Q$  на плоскость эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$ , т. е.  $b = (\overline{P_{12}Q})_{\mathcal{E}\mathcal{E}}$ .

Из рис. 53 найдем

$$b = l \sin [180^\circ + (\alpha_3)_3] = -l \sin (\alpha_3)_3 = l \sin \sigma_{12}. \quad (\text{III.119})$$

Расстояние  $a$  от вершины  $P_{12}$  до эквивалентного зеркала ЭЭ равно

$$a = l \cos [180^\circ + (\alpha_3)_3] = -l \cos (\alpha_3)_3 = -l \cos \sigma_{12}. \quad (\text{III.120})$$

Отрезки  $a$  и  $b$  являются проекциями отрезка  $l$ : первый — на перпендикуляр к эквивалентному зеркалу ЭЭ, второй — на плоскость самого эквивалентного зеркала.

Применяя изложенный подход, любую систему плоских зеркал с компланарными нормальными и с нечетным числом отражений больше трех также можно привести или к плоскому зеркалу в сочетании с зеркальным ромбом или, в частном случае, к одному эквивалентному плоскому зеркалу. Последнее имеет место тогда, когда продолженные плоскости всех зеркал проходят через ребро, образованное пересечением первых двух зеркал.

Полученные общие выводы и формулы для углового зеркала в сходящемся ходе лучей позволяют просто и быстро решать разнообразные практические задачи, связанные с работой и юстировкой таких систем. Покажем это на одном примере.

В статье [34] рассматривается влияние поворота двойного зеркала в схеме оптического отвеса теодолита МГТ-30 на положение визирного луча. На рис. 54 построено отражение осевого луча  $\bar{A}$ , направленного в обратную сторону оси  $x$ , от зеркал 1 и 2 с углом между ними  $\sigma = -45^\circ$ . В исходном положении зеркала показаны сплошными линиями, их вершина отмечена точкой  $P_0$ ; после поворота на угол  $\gamma$  зеркала показаны штриховыми линиями, их вершина отмечена точкой  $P$ . Соответственно показан и ход луча: в первом случае — сплошной ломаной линией, а во втором — штриховой. Поворот системы зеркал вокруг точки  $O$  биссектрисы двугранного угла  $\sigma$  между зеркалами на угол  $\gamma$  вызывает параллельный сдвиг выходящего луча  $\bar{A}''$  на величину  $t$ , которую и необходимо найти. Расстояние  $R$  по осевому лучу от точки поворота  $O$  до зеркал известно. При повороте системы зеркал на угол  $\gamma$  координаты вершины  $P$  получают приращение

$$\Delta x = r [\sin 45^\circ - \sin (45^\circ - \gamma)];$$

$$\Delta y = r [\cos 45^\circ - \cos (45^\circ - \gamma)].$$

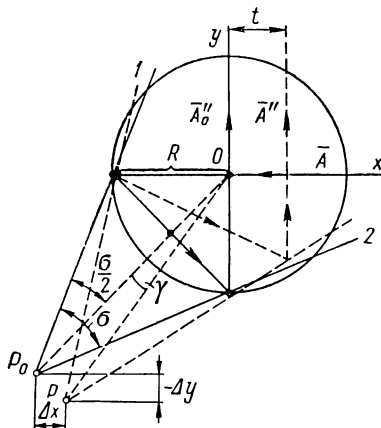


Рис. 54. Сдвиг выходящего луча вследствие поворота углового зеркала



По формуле (III.96) после преобразований для величины сдвига луча  $t$  получим точное выражение

$$t = 2r \sin 45^\circ \sin \gamma.$$

Расстояние  $r$  от ребра зеркал  $P_0$  до оси вращения  $O$  равно  $r = \overline{P_0 O} = R (1 + \operatorname{ctg} 22,5^\circ) \sin 45^\circ \approx 3,41R \sin 45^\circ$ .

После подстановки получим окончательно

$$t \approx 3,41R \sin \alpha \approx 3,41R\alpha.$$

В указанной статье [34] приближенным способом найдено  $t \approx \approx 4R\alpha$ , что отличается от полученной нами более точной величины.

Рассмотрим отражательные призмы с разверткой в виде плоскопараллельной пластинки. Такая равнобедренная призма  $ABC$  с одним отражением и ее развертка  $AC'BC$  показана на рис. 55, а. Равные углы при основании обозначены  $\alpha$ , толщина развертки —  $d$ , угол падения луча на первую грань —  $i$ . Отражательную призму можно представить как совокупность плоского зеркала  $\mathcal{Z}$  и плоскопараллельной развертки, неизменно связанных друг с другом (рис. 55, б). Развертка смещает изображение вдоль нормали к выходной грани по ходу луча на величину  $\Delta_p$  (рис. 55, а), причем по формуле (III.112)

$$\Delta_p = \left(1 - \frac{\cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}\right) \times \\ \times d \approx \frac{n-1}{n \cos i} d. \quad (\text{III.121})$$

Рис. 55. Приведение равнобедренной призмы с одним отражением к эквивалентной системе

Это смещение изображения можно представить как результат отражения от эквивалентного плоского зеркала  $\mathcal{Z}\mathcal{Z}$ , которое параллельно отражающей грани призмы  $AB$  и смещено вдоль нормали на расстояние  $a$ , и дополнительного отражения в зеркальном ромбе, зеркала которого  $1_p$  и  $2_p$  перпендикулярны эквивалентному зеркалу  $\mathcal{Z}\mathcal{Z}$  и главному сечению призмы и раздвинуты на величину  $b$ . Из рис. 55, а легко найти, что

$$a = \frac{\Delta_p}{2} \cos \alpha; \quad b = \frac{\Delta_p}{2} \sin \alpha, \quad (\text{III.122})$$

где  $\Delta_p$  — величина смещения изображения разверткой по формуле (III.121);

$\alpha$  — угол при основании равнобедренной призмы.

Таким образом, отражательная призма по рис. 55, а эквивалентна плоскому зеркалу ЭЭ в сочетании с перпендикулярным ему зеркальным ромбом  $1_p$  и  $2_p$ . Ранее было показано, что такой же эквивалент имеет трехзеркальная система с компланарными нормальными. Но в отличие от зеркальной системы в отражательной

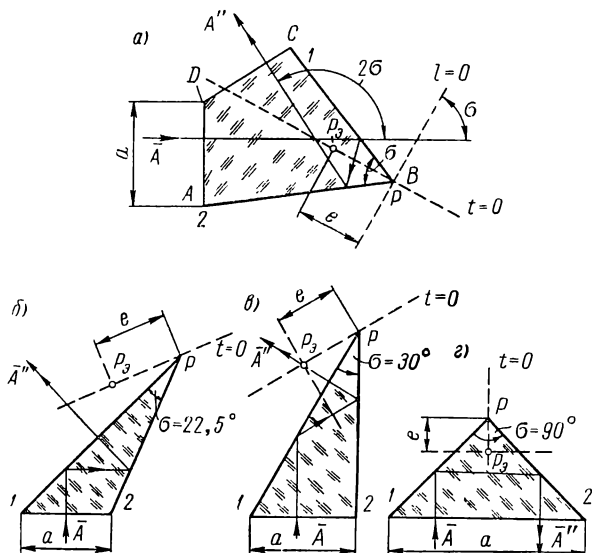


Рис. 56. Приведение призмы с двумя отражениями к эквивалентному угловому зеркалу

призме отрезки  $a$  и  $b$  зависят от угла падения  $i$  луча на призму, так как величина смещения  $\Delta_p$  с увеличением угла  $i$  возрастает. Кроме того, зеркала эквивалентного ромба  $1_p$  и  $2_p$  в отражательной призме расположены по ходу луча, а в трехзеркальной системе — в обратной последовательности, что видно из сравнения рис. 53 и 55, а.

Перейдем к рассмотрению призмы двойного отражения. Одна из таких призм  $ABCD$  с плоскопараллельной разверткой изображена на рис. 56, а. Угол между отражающими гранями  $AB$  и  $CB$  равен  $\sigma$ , толщина развертки  $d$ .

Развертка призмы смещает изображение по ходу луча вдоль нормали к выходной грани на величину  $\Delta_p$  согласно формуле (III.121). Угловое зеркало, образованное отражающими гранями  $1$  и  $2$  призмы, также смещает изображение точки, не лежащей на его ребре  $P$ , — вращает его по дуге окружности с центром на ребре, которое проходит через вершину угла  $B$  перпендикулярно

главному сечению призмы. Ставится задача об отыскании такой точки в призме, для которой оба смещения — за счет толщины развертки и за счет действия углового зеркала — компенсировались бы взаимно.

Эту же задачу можно сформулировать иначе: надо найти такое положение оси (параллельной действительному ребру между отражающими гранями 1 и 2 призмы  $ABCD$ ), чтобы поворот призмы вокруг нее на малый угол не вызывал сдвига выходящего луча.

Поворот призмы в плоскости главного сечения на малый угол  $i$  против часовой стрелки приводит к тому, что выходящий луч (на рис. 56,  $a$  — луч с двумя стрелками) сдвигается параллельно себе влево на величину

$$t_p = \frac{n-1}{n} di. \quad (\text{III.123})$$

Если призму при этом поворачивать вокруг оси, перпендикулярной главному сечению и проходящей через точку  $P_s$ , которая лежит на особой прямой  $t = 0$  (см. рис. 48), то вершина  $B$  угла между отражающими гранями будет перемещаться по дуге, касательной к особой прямой  $l = 0$ . При малом угле поворота углового зеркала возникает в основном только поперечный сдвиг  $t_s$  выходящего луча вправо на величину

$$t_s = (2e \sin \sigma) i, \quad (\text{III.124})$$

где  $e$  — расстояние от вершины  $B$  двугранного угла  $\sigma$  до ребра эквивалентного углового зеркала  $P_s$ .

Приравнивая друг другу оба сдвига  $t_p$  и  $t_s$ , найдем

$$e = \frac{(n-1)d}{2n \sin \sigma}, \quad (\text{III.125})$$

где  $n$  — показатель преломления призмы;

$d$  — толщина ее развертки;

$\sigma$  — угол между отражающими гранями.

Для обычной пентапризмы [ $\sigma = 45^\circ$ ;  $d = 2a(1 - 2 \cos \sigma) \sin \sigma$ , где  $a$  — ширина входной грани] получим

$$e = a \frac{n-1}{n} (1 + \sqrt{2}).$$

При  $n = 1,5$  будет  $e \approx 0,8a$ , причем точка  $P_s$  лежит на биссектрисе углов  $B$  и  $D$ .

Формула (III.125) применима к любым призмам с двумя отражениями, у которых преломляющие грани параллельны ребру между отражающими гранями. В прямоугольной призме с двумя отражениями (рис. 56,  $z$ ) точка  $P_s$  тоже лежит на биссектрисе угла  $\sigma = 90^\circ$  в пределах контура ее сечения на расстоянии  $e \approx \frac{a}{6}$  от ребра. В полупентапризме (рис. 56,  $b$ ) и в 30-градусной

призме (рис. 56, в) расстояния соответственно равны  $e = \frac{a}{\sqrt{3}}$  и  $e = \frac{a}{6} (1 + \sqrt{2})^{\frac{3}{2}}$ , но точки  $P_3$  в этих призмах расположены вне контура сечения призм.

## 15. Классификация зеркально-призменных систем

Научная классификация зеркально-призменных систем имеет большое теоретическое и практическое значение, в частности, для анализа и для юстировки этих систем.

В основу классификации отражательных призм и призменных систем, принятой на оптико-механических заводах, положены два признака — число отражающих поверхностей и угол отклонения осевого луча [27, стр. 227—241].

Призмы с одной отражающей гранью относятся к типу А, с двумя отражающими гранями — к типу Б, с тремя отражающими гранями — к типу В. Крыша условно считается за одну грань, и ее наличие отмечается буквой «к» вслед за буквой, обозначающей тип исходной призмы.

В обозначение многих призм входит еще одна буква, учитывающая различные другие признаки призм, например форму их главного сечения (равнобедренные призмы отмечаются буквой Р, пентапризмы — буквой П), или действие призмы на падающие лучи (призмы с двумя отражающими гранями, отклоняющие лучи в главном сечении под постоянным углом, отмечаются буквой У; ромбпризмы, сдвигающие лучи параллельно себе, — буквой С), или назначение призмы (призмы, используемые в центральных мостиках дальномеров, отмечаются буквой М), или, наконец, общепринятое ее название (например, призма Лемана отмечается буквой Л).

В особые типы выделены составные призмы, которые обозначаются также одной буквой, например, куб-призма — К, башмачная — Б, призма Аббе — А, призма Пехана — П.

После буквенного обозначения типа призмы указывается угол отклонения осевого луча в градусах. При пространственном ходе луча в призме с его изломом под прямым углом после второго отражения указываются оба угла отклонения осевого луча — угол отклонения после первого отражения и угол  $90^\circ$ .

Как видно из таблицы типовых призм, помещенной в справочнике [27], в основу принятой классификации положено не оптическое действие призменной системы, а конструктивно-технологические признаки. Вследствие этого призмы, совершенно одинаковые по оптическому действию, оказались в разных типовых группах, как, например, пентапризма БП- $90^\circ$  и башмачная призма Б- $90^\circ$ . С другой стороны, в одну и ту же типовую группу внесены призмы совершенно различного оптического действия,

каковы, например, ромбпризма БС-0 и пентапризма БП-90° или прямоугольная призма БР-180°, которые все отнесены к призмам типа Б.

Классификатор призм далеко не охватывает даже все общепотребительные системы, такие, как оборачивающие призмные системы Малафеева 1 и 2-го рода, разделительные призмные системы и др. Классификатор совершенно не включает систем плоских зеркал, которые применяются так же широко, как и призмные системы.

И. В. Лебедев в основу своей классификации зеркально-призмных систем положил их оптическое действие, а именно следующие их основные характеристики [28]:

четность или нечетность числа отражений луча в системе;

величину и знак угла поворота изображения  $\psi$  вокруг так называемого основного неизменного направления системы, т. е. такого направления в системе, при падении лучей вдоль которого они отражаются или параллельно себе, или в прямо противоположном направлении;

величину и направление вектора постоянного смещения изображения.

В соответствии с наличием или отсутствием в системе так называемых неизменных точек <sup>1</sup> все зеркально-призмные системы разделены И. В. Лебедевым на три типа и на восемь классов. Эта классификация имеет большое значение для анализа зеркальных систем.

Для решения юстировочных вопросов более удобна такая классификация, в основу которой положено наличие у зеркально-призмных систем особых осей или направлений, вращение вокруг которых или смещение вдоль которых инвариантны.

Ось ю зеркально-призмной системы будем называть прямой, которая неизменно связана с ней и отличается тем свойством, что ни повороты системы вокруг этой прямой, ни смещения системы вдоль нее не влияют ни на положение, ни на ориентировку изображения, т. е. не вызывают в поле зрения оптической системы ни поворота изображения, ни поперечного сдвига, ни расфокусировки. Иначе говоря, ось зеркально-призмной системы обладает инвариантностью как в отношении смещений системы вдоль нее, так и в отношении вращений системы вокруг нее.

Если же прямая, неизменно связанная с зеркально-призмной системой, обладает инвариантностью только в отношении поворотов или только в отношении смещений, то такую прямую будем называть соответственно осью вращения или осью смещения.

---

<sup>1</sup> Неизменной точкой называется такая, которая в данной системе изображается сама в себя.

Оси зеркально-призмённых систем являются их основными юстировочными базами, которые определяют положение этих систем по отношению к другим функционально связанным с ними схемным оптическим деталям. Знание положения этих баз позволяет также выявить действенные подвижки зеркально-призмённых систем, а затем найти и передаточные коэффициенты каждой юстировочной подвижки на изображение.

Для выявления осей найдем, как влияет каждая из возможных подвижек зеркально-призмённых систем разных типов на положение и поворот изображения оптической системы. При строгом подходе следовало бы рассмотреть отдельно подвижки систем плоских зеркал и подвижки зеркально-призмённых систем. Как известно, плоские зеркала не имеют аберраций в любом ходе лучей, поэтому свойства зеркальных систем не зависят от величины углов поворота вокруг их осей. Эти углы поворота ограничиваются лишь габаритами элементов систем.

Развертка призмённых систем в виде толстой плоскопараллельной преломляющей пластинки в сходящемся ходе лучей имеет аберрации, в результате которых пластинка смещает изображение точки на величину, зависящую от угла падения осевого луча и определяемую формулой (III.112). Однако, если ограничиться малыми углами поворота зеркально-призмённых систем, что как раз и характерно для юстировки, то в большинстве случаев можно не принимать в расчет аберрации развертки, так как они вызывают дополнительное смещение изображения точки в сходящемся ходе лучей лишь на величину второго порядка малости. С учетом этого зеркально-призмённые системы будем рассматривать вместе с зеркальными системами.

Все зеркально-призмённые системы классифицируем на три типа или на семь классов (табл. 9). Типы систем обозначим по числу отражений так же, как в упомянутом классификаторе, т. е. системы с одним отражением — буквой А, системы с двумя отражениями — буквой Б и системы с тремя отражениями — буквой В.

Из систем с двумя отражениями выделим зеркальный ромб, который обозначим Б-0 в знак того, что угол отклонения выходящих из ромба лучей равен нулю.

Из систем с тремя отражениями особыми свойствами обладает прямоугóльный триэдр, который обозначим В-180°, так как все выходящие лучи он отклоняет на 180°, т. е. отражает их в строго противоположном направлении.

Поскольку система трех зеркал с компланарными нормальными в общем виде приводится к плоскому зеркалу в сочетании с перпендикулярным ему зеркальным ромбом, то получим систему  $A + B-0$ .

Система четырех зеркал в общем случае приводится к системе двух зеркал, т. е. к угловому зеркалу класса Б. Однако, когда первая или последняя пара зеркал исходной системы составляет

# Типы и классы зеркально-призмных систем (ЗПС) с пло

Номер класса ЗПС	Обозна- чение типов и клас- сов ЗПС	Наименование ЗПС или эквива- лентных им ЗПС	Действенные подвижки в сходящемся ходе лучей						Действен- ные пово- роты в парал- лельном ходе лучей вокруг осей			Матрица канонического вида ЗПС
			Смещения вдоль осей			Повороты вокруг осей						
			<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	
1	2	3	4						5			6
1	А	Плоское зер- кало	—	—	+	+	+	—	+	+	—	$P' = \begin{pmatrix} 100 \\ 010 \\ 00-1 \end{pmatrix}$
2	Б	Угловое зер- кало	+	+	—	+	+	—	+	+	—	$P'' =$ $= \begin{pmatrix} \cos 2\sigma - \sin 2\sigma 0 \\ \sin 2\sigma \cos 2\sigma 0 \\ 0 \quad 0 \quad 1 \end{pmatrix}$ При $\sigma = 90^\circ$ $P''_{\sigma=90^\circ} = -P'_z$
3	Б-0	Ромб зер- кальный	—	—	—	+	+	—	—	—	—	$P''_{\sigma=0} = +E$
4	В	Тройное зер- кало	+	+	+	+	+	—	+	+	—	$P''' = -P'_z$ При $\sigma_z = 90^\circ$ $(P_z)''_{\sigma_z=90^\circ} =$ $= -P'_z$
5	В-180°	Триэдр пря- моугольный	+	+	+	—	—	—	—	—	—	$P''' = -E$
6	А+Б-0	Плоское зер- кало с перпен- дикулярным ему зеркальным ромбом	—	—	+	+	+	+	+	+	—	$P''' = P'_z$

## скими отражающими и преломляющими поверхностями

Недейственные смещения и повороты ЗПС в сходящемся ходе лучей	Примеры ЗПС, относящихся к данному классу	Призмы отражательные [27, табл. 8, стр. 227]
7	8	9
<p>Смещения плоского зеркала вдоль отражающей плоскости и поворот его вокруг оси, перпендикулярной отражающей плоскости</p> <p>Поворот углового зеркала вокруг ребра и смещение вдоль ребра</p> <p>Смещения зеркального ромба в любом направлении и поворот его вокруг оси, перпендикулярной зеркалам</p> <p>Поворот тройного зеркала вокруг оси, проходящей через его центр и параллельной лучу, который в системе зеркал отражается в противоположном себе направлении</p> <p>Повороты прямоугольного триэдра вокруг его центра</p> <p>Смещения зеркальной системы вдоль отражающей плоскости ее эквивалентного зеркала</p>	<p>Плоское зеркало с наружным и внутренним отражением. Система трех зеркал, пересекающихся по одной общей прямой, или система двух зеркал с тремя отражениями</p> <p>Угловое зеркало с углом <math>\sigma</math>, заключенным в пределах <math>180^\circ &gt;  \sigma  &gt; 0</math>. Призмы с двумя отражениями, у которых входная и выходная преломляющие грани параллельны ребру между отражающими гранями</p> <p>Ромб зеркальный. Плоскопараллельная преломляющая пластинка. Ромб-призма</p> <p>Система трех зеркал общего вида. Призмы с двумя отражающими плоскостями, вместо одной из которых нанесена крыша</p> <p>Зеркальный прямоугольный триэдр. Трипельпризма</p> <p>Система трех зеркал с компланарными нормальями, не пересекающихся по одной общей прямой. Равнобедренные призмы с одним отражением. Призмы Шмидта, Аббе, Пехана</p>	<p>А-0 (Аббе) при определенной величине показателя преломления материала призмы</p> <p>БР-180° БУ-40°, БУ-45°, БУ-60° БП-80°, БП-90° (пента) Б-90°</p> <p>БС-0 (ромб)</p> <p>БкУ-45°, БкП-90°, БкУ-60° БкМ-100-90° Бк-90° (башмачная)</p> <p>БкР-180°</p> <p>АР-0 (Дове) АР-45°, АР-60°, АР-90°, АР-105° ВЛ-0 (Лемана) ВР-45° (Шмидта), ВР-180° А-0 (Аббе) К-0, П-0, ВП-0</p>



Номер класса ЗПС	Обозначение типов и классов ЗПС	Наименование ЗПС или эквивалентных им ЗПС	Действенные подвижки в сходящемся ходе лучей						Действенные повороты в параллельном ходе лучей вокруг осей			Матрица канонического вида ЗПС
			Смещения вдоль осей			Повороты вокруг осей						
			$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	
1	2	3	4						5			6
7	Б+Б-0	Угловое зеркало с перпендикулярным ребру зеркальным ромбом	+	+	—	+	+	—	+	+	—	$P''' = P''_z$ При $\sigma_z = 90^\circ$ $(P''_z)_{\sigma_z = 90^\circ} = -P'_z$

ромб, не параллельный ребру другой пары зеркал, то эквивалентная система будет представлять собой угловое зеркало в сочетании с ромбом, перпендикулярным его ребру. В этом случае получим систему Б + Б-0.

Этим исчерпываются все возможные типы и классы простейших зеркально-призменных систем (2-я графа).

Любую сложную зеркально-призменную систему можно привести к одной из семи указанных зеркальных систем следующих трех типов:

к плоскому зеркалу (А) или к плоскому зеркалу с ромбом (А + Б-0);

к угловому зеркалу (Б), или к зеркальному ромбу (Б-0), или, наконец, к угловому зеркалу с ромбом (Б + Б-0);

к тройному зеркалу (В) или к прямоугольному триэдру (В-180°).

Далее указана действенность возможных подвижек зеркально-призменных систем: шести подвижек (три смещения и три поворота) в сходящемся ходе лучей (4-я графа) и трех поворотов в параллельном ходе лучей (5-я графа). Смещения и повороты рассмотрены в прямоугольной системе осей  $x, y, z$ , которые жестко связаны с прибором и ориентированы так, что ось  $z$  параллельна основному неизменному направлению зеркально-призменной системы в ее исходном положении. В соответствии с этим ось  $z$  будет, например, перпендикулярна отражающей плоскости зеркала, или будет совпадать с ребром углового зеркала, или пройдет через центр тройного зеркала параллельно его основному неиз-

Недейственные смещения и повороты ЗПС в сходящемся ходе лучей	Примеры ЗПС, относящихся к данному классу	Призмы отражательные [27, табл. 8, стр. 227]
7	8	9
Поворот зеркальной системы вокруг ребра эквивалентного углового зеркала и смещение вдоль ребра	Система четырех зеркал общего вида. Равнобедренные призмы с крышей. Призмы Шмидта и Аббе с крышей. Зеркально-призменные оборачивающие системы	АкР-45°, АкР-60°, АкР-80°, АкР-90°, БМ-60-90°, БМ-80-90°, БМ-90-90°, БМ-100-90°, БМ-120-90°, ВкЛ-0, ВкР-45°, ВкР-180°, Ак-0 (Аббе), Пк-0

менному направлению, или, наконец, будет перпендикулярна зеркалам ромба. У прямоугольного триэдра любые направления являются основными неизменными и любая прямая, проходящая через его вершину, является осью; поэтому достаточно положить, что вершина триэдра — его центр — в исходном положении совпадает с началом координатных осей  $O$ . Знаком «плюс» в табл. 9 отмечены действенные подвижки, а прочерком — недейственные. В 6-й графе приведены матрицы канонического вида для всех классов зеркально-призменных систем и для их простейших эквивалентов.

Наименьшее число действенных подвижек зеркально-призменные системы имеют в параллельном ходе лучей — их число не превышает двух. Это согласуется с тем, что по И. В. Лебедеву любая зеркально-призменная система имеет хотя бы одно основное неизменное направление, поворот вокруг которого инвариантен [28; 29].

У зеркального ромба Б-0 и прямоугольного триэдра В-180° все направления являются основными неизменными, поэтому их повороты вокруг всех трех координатных осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  инвариантны, вследствие чего обе эти системы в параллельном ходе лучей не имеют ни одной действенной подвижки, а их матрицы равны соответственно плюс и минус единице.

В сходящемся ходе лучей число действенных подвижек у всех зеркально-призменных систем будет больше, чем в параллельных пучках (4-я графа).

У плоского зеркала класса А их станет три: к двум поворотам вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в плоскости зеркала, добавляется действительное смещение вдоль его нормали. У плоского зеркала с ромбом класса  $A + B-0$  действительных подвижек уже четыре, так как к прежним двум поворотам вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в его плоскости, и к смещению вдоль нормали к зеркалу добавляется действительный поворот вокруг его нормали за счет действия ромба толщины  $b$ ; это связано с тем, что у системы класса  $A + B-0$  плоское зеркало и зеркальный ромб взаимно перпендикулярны. При такой ориентировке эквивалентных зеркала и ромба их основные неизменные направления также будут взаимно перпендикулярны. Вследствие этого поворот системы  $A + B-0$  вокруг оси  $z$ , перпендикулярной плоскости эквивалентного зеркала, для зеркального ромба окажется действительным, так как он вызывает параллельный сдвиг выходящего луча. Угловое зеркало класса В и угловое зеркало с ромбом класса  $B + B-0$  также имеют по четыре действительных подвижки — два сдвига поперек оси (ребра) системы и два поворота вокруг двух осей, перпендикулярных этой оси (ребру).

У зеркального ромба класса  $B-0$  и в сходящемся ходе лучей все три сдвига недействительны, но станут действительными два поворота вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, параллельных зеркалам ромба.

У тройного зеркала общего вида — класса В — недействителен лишь один поворот вокруг оси, проходящей через его центр параллельно основному неизменному направлению; остальные пять подвижек — все три сдвига и два поворота вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, проходящих через центр тройного зеркала перпендикулярно основному неизменному направлению, — станут действительными.

У прямоугольного триэдра класса  $B-180^\circ$  повороты вокруг всех трех взаимно перпендикулярных осей, проходящих через его центр, т. е. любые повороты вокруг этого центра, недействительны, но останутся действительными все три сдвига, т. е. смещения его центра вдоль трех осей  $x, y, z$ .

Следует заметить, что при повороте систем класса  $A + B-0$  и класса  $B + B-0$  в сходящемся ходе лучей сдвиг изображения по полю зрения возникнет не только за счет поворотов эквивалентных зеркал (в первом случае плоского, а во втором случае углового), но также и за счет поворотов связанных с ними ромбов. Если оба сдвига сложатся, то передаточный коэффициент действительных поворотов возрастет. Возможны и такие случаи, когда сдвиги за счет поворота эквивалентных плоского или углового зеркал и за счет поворота ромбов направлены в противоположные стороны. Тогда передаточный коэффициент действительных поворотов у таких систем будет уменьшаться вплоть до нуля.

Из табл. 9 видно, что только три системы типа Б (классов Б, Б-0 и Б + Б-0) имеют оси, остальные системы — типа А и типа В — имеют лишь оси вращения или оси смещения. В соответствии с этим в 7-й графе указаны недейственные смещения и повороты зеркально-призмённых систем в сходящемся ходе лучей.

В 8-й графе приведены некоторые примеры систем, относящихся к данному классу, а в 9-й графе все призмы каталога распределены по соответствующим классам.

В заключение рассмотрим примеры приведения некоторых сложных зеркально-призмённых систем к простейшим эквивалентным системам одного из указанных семи классов. Такое приведение сложных систем к простым облегчает понимание их работы и юстировки.

Приведение чисто зеркальных систем проще, чем призмённых систем. Ранее было показано, что система трех плоских зеркал с компланарными нормальми в общем случае приводится к эквивалентной системе класса А + Б-0. В частном случае, например, система двух зеркал с тремя отражениями с автоколлимационным ходом лучей или любая система

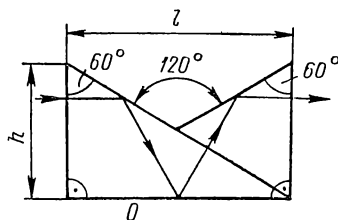


Рис. 57. Призма Аббе

трех зеркал, пересекающихся по одной общей прямой, приводится к эквивалентному плоскому зеркалу, т. е. к системе класса А.

Система четырех плоских зеркал по А. И. Тудоровскому приводится к угловому зеркалу типа Б одного из трех классов: Б, Б-0 или Б + Б-0. Систему зеркал с пятью и бóльшим нечетным числом отражений в общем случае можно привести к тройному зеркалу типа В, а систему зеркал с шестью и бóльшим четным числом отражений — к угловому зеркалу типа Б, или к ромбу Б-0, или же к сложной системе класса Б + Б-0.

При приведении призмённых систем необходимо еще учитывать влияние толщи стекла развертки на положение эквивалентной отражающей плоскости в призмах с одним отражением, или на положение эквивалентного ребра в призмах с двумя отражениями, или на положение эквивалентного центра в призмах с тремя отражениями. Для этого можно воспользоваться материалами предыдущего параграфа.

К плоскому зеркалу класса А приводится, например, призма Аббе (по классификатору — призма А-0) при соблюдении определенных конструктивных соотношений, а именно, когда отношение длины призмы  $l$  к ее высоте  $h$  (рис. 57) составляет величину <sup>1</sup>

$$\frac{l}{h} = \frac{0,866}{n-1}.$$

<sup>1</sup> Е. Б. С е р а ф и м о в. К теории отражательных призм. — ОМП, 1964, № 8, с. 45.

Плоскость эквивалентного зеркала параллельна основанию  $O$  призмы и проходит через луч, который по выходе из призмы остается своим продолжением.

Из рис. 57 видно, что  $\frac{l}{h} = \operatorname{tg} 60^\circ = \sqrt{3}$ ; для показателя преломления призмы из приведенного выше соотношения найдем  $n = 1,5$ .

Такой же результат получится, если призму Аббе представить как зеркально-призменную систему, которая состоит из трех элементов:

1) эквивалентного плоского зеркала, параллельного основанию  $O$  призмы;

2) зеркального ромба, перпендикулярного основанию  $O$ , с расстоянием между зеркалами  $b = \frac{h}{2} \sin 60^\circ$ ;

3) развертки в виде плоскопараллельной пластинки толщиной  $d = 3h \sin 60^\circ$ .

Ромб укорачивает ход луча по оси на величину  $2b = h \sin 60^\circ$ , а развертка удлиняет ход луча на  $\Delta_p = \frac{n-1}{n} d = \frac{n-1}{n} 3h \sin 60^\circ$ .

При включении призмы Аббе длина хода по оси не изменится, если выдержать соотношение  $2b = \Delta_p = \frac{n-1}{n} d$ , откуда сразу найдем  $n = 1,5$ .

Призма Аббе, в которой не выдерживается указанное соотношение  $l/h$ , любая равнобедренная призма с одним отражением, а также призма Пехана эквивалентны плоскому зеркалу с ромбом, т. е. системе класса  $A + B-0$ .

Все оборачивающие призменные системы приводятся к прямоугольному угловому зеркалу в сочетании с ромбом, перпендикулярным его ребру. На рис. 58 дано несколько примеров такого приведения, которое сводится к нахождению местоположения ребра эквивалентного прямоугольного зеркала и к определению величины смещения изображения вдоль ребра за счет суммарного действия эквивалентного зеркального ромба и развертки призмы.

На рис. 58, *а* показано, что в призменной системе Малафеева 1-го рода ребро эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  проходит через точку пересечения проекций ребер обеих призм на плоскость, компланарную этим ребрам, и направлено перпендикулярно этой плоскости.

В призменной системе Малафеева 2-го рода ребро эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  параллельно ребру призмы 2 и проходит через точку пересечения прямой  $OO$ , образуемой пересечением продолженных отражающих плоскостей призм 1 и 3, с биссектрисной плоскостью прямого угла призмы (рис. 58, *б*).

На рис. 58, *в* показана оборачивающая система, состоящая из трипельпризмы 1 и призмы тройного отражения 2. Последняя призма сдвигает выходящий луч вдоль своего главного сечения

на величину  $t$ . Ребро эквивалентного углового зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  у данной системы проходит через точку, которая относительно вершины  $B$  призмы 1 сдвинута вдоль главного сечения призмы 2 на величину  $t/2$ , и это ребро перпендикулярно длинной (входной) грани призмы 2.

Если рассмотренные оборачивающие призмные системы применяются, например, в биноклях с шарнирным соединением труб, то при юстировке параллельности их осей нужно добиваться того,

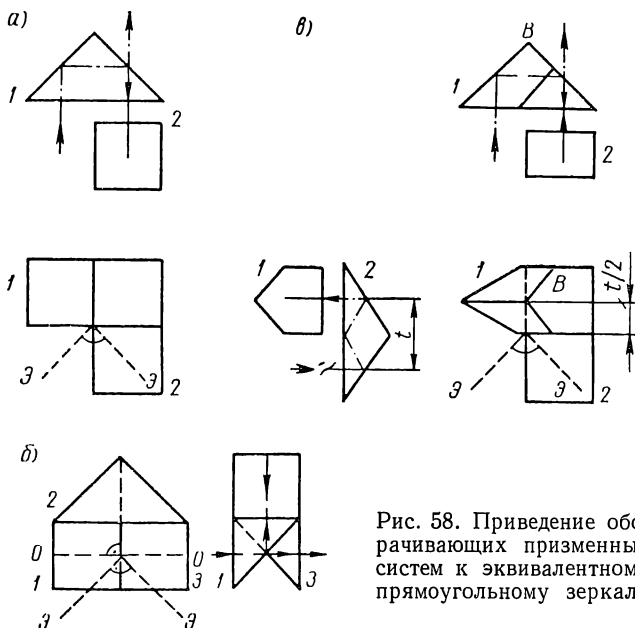


Рис. 58. Приведение оборачивающих призмных систем к эквивалентному прямоугольному зеркалу

чтобы ребро эквивалентного зеркала было параллельно оси шарнира и проходило через точку, которая делит пополам прямую, соединяющую проекции центров объектива и окуляра на плоскость, перпендикулярную оси шарнира.

Рассмотрим также два конструктивных варианта систем, приводящихся к зеркальному ромбу. На рис. 59 показаны ромб, составленный из двух прямоугольных призм, и ромб из двух пентапризм. Каждая система эквивалентна зеркальному ромбу  $\mathcal{E}_1\mathcal{E}_2$ , следы зеркал которого отмечены штриховыми линиями. Для нахождения положения этих зеркал предположим, что на рис. 59,  $a$  точка предмета  $T$  совпадает с точкой падения осевого луча на первую призму;  $T''_3$  — изображение точки  $T$  в некотором зеркальном ромбе (на рисунке не показан), имеющем такой же ход осевого луча, какой существует перед, между и за реальными призмами. Второе зеркало этого ромба должно было бы проходить перпендикулярно отрезку  $\overline{TT''_3}$  через среднюю его точку  $C_3$ .

Действительное изображение  $T''_n$  точки предмета  $T$  через систему призм лежит на продолжении выходящего осевого луча и смещено по его ходу относительно точки  $T''_3$  на величину  $\Delta_p$  за счет действия развертки призм суммарной толщины  $d$ , где  $\Delta_p = \frac{n-1}{n} d$ . Второе зеркало  $\mathcal{Z}_2$  эквивалентного ромба проходит через среднюю точку  $C_n$  перпендикулярно отрезку  $\overline{TT''_n}$ . Штриховой прямой показан приведенный ход осевого луча между зер-

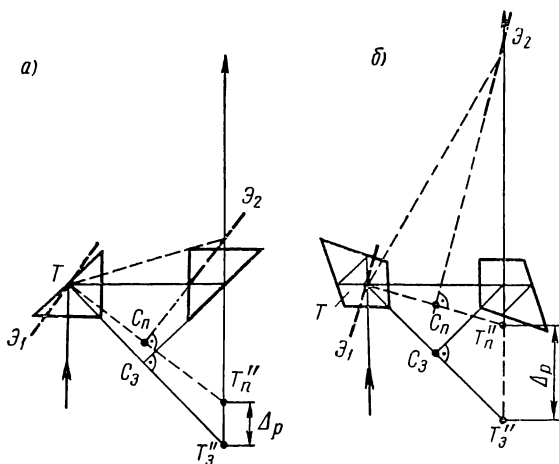


Рис. 59. Приведение призмных систем к зеркальному ромбу

калами  $\mathcal{Z}_1$  и  $\mathcal{Z}_2$  эквивалентного ромба. Аналогично выполнено приведение к зеркальному ромбу  $\mathcal{Z}_1\mathcal{Z}_2$  системы из двух пентапризм (рис. 59, б). Точка предмета  $T$  здесь совпадает с точкой взаимопересечения осевых лучей, падающего и выходящего из первой призмы.

Приведение некоторых зеркально-призмных систем к простейшему эквиваленту не так очевидно. Рассмотрим два таких примера.

**Пример 1.** Пусть три одинаковые прямоугольные призмы 1, 2, 3 образуют пространственный блок (рис. 60, а). Нормали отражающих граней призм направлены по следующим ортам (рис. 60, б):

$$\bar{N}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(-\bar{j} - \bar{k}); \quad \bar{N}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(-\bar{i} + \bar{k}); \quad \bar{N}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{i} + \bar{j}).$$

Для углов между соседними ортами нормалей найдем

$$\cos(\widehat{\bar{N}_1\bar{N}_2}) = \cos(\widehat{\bar{N}_2\bar{N}_3}) = \cos(\widehat{\bar{N}_1\bar{N}_3}) = -\frac{1}{2},$$

откуда

$$\widehat{N_1 N_2} = \widehat{N_2 N_3} = \widehat{N_1 N_3} = 120^\circ.$$

Значит, отражающие грани призм составляют систему плоских зеркал с компланарными нормальными: при своем пересечении друг с другом они образуют правильную трехгранную призму.

Направление ребер этой призмы найдем с помощью формулы (41.3) из книги [57], которая дает

$$\vec{p} = \frac{1}{\sin \sigma} [\vec{N_2} \vec{N_1}] = \frac{1}{\sqrt{3}} (\vec{i} - \vec{j} + \vec{k}).$$

В параллельном ходе лучей блок призм 1, 2 и 3 эквивалентен одному плоскому зеркалу, параллельному отражающей грани

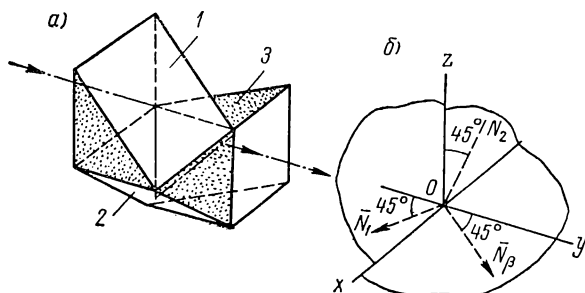


Рис. 60. Приведение системы трех призм к эквивалентному зеркалу

призмы 2. В сходящемся ходе лучей блок призм эквивалентен одному плоскому зеркалу, параллельному отражающей грани призмы 2, в сочетании с перпендикулярным ему зеркальным ромбом.

**Пример 2.** Рассмотрим оптическую систему визирной трубы, в которой для перефокусировки на различные расстояния предполагается использовать продольное смещение пентапризмы  $\Pi$  вдоль оси  $x$  (рис. 61, а).

Изображение светящейся марки  $C$ , отраженной через пентапризму  $\Pi$  (обычную или с крышей) от неподвижного плоского зеркала  $З$ , получается в точке  $C^V$  и служит в качестве перекрестия визирной трубы.

Следует рассмотреть влияние погрешностей направляющих для передвижения пентапризмы на нестабильность положения визирной оси трубы и решить, какую призму выгоднее использовать — обычную или с крышей.

Для решения задачи выясним, как влияют смещения каждой из призм вдоль осей неподвижной координатной системы  $xuz$  и повороты призм вокруг тех же осей. Прежде всего найдем



эквивалент зеркально-призменной системы, состоящей из пентапризмы  $\Pi$  и плоского зеркала  $\mathcal{Z}$  (рис. 61, б). Начальным будем считать такое взаимоположение призмы и зеркала, когда эквивалентное ребро  $P_0$  призмы  $\Pi_0$  совмещено с плоскостью зеркала  $\mathcal{Z}$ . В этом случае система осей  $xuz$  становится для пентапризмы основной. Системой, эквивалентной пентапризме  $\Pi_0$  с зеркалом  $\mathcal{Z}$ , будет плоское зеркало  $\mathcal{E}_0\mathcal{E}_0$ , совпадающее с ребром  $P_0$  и перпендикулярное зеркалу  $\mathcal{Z}$ . Изображение сетки  $C$  получится в точке  $C_0^V$ , симметричной эквивалентному зеркалу  $\mathcal{E}_0\mathcal{E}_0$ . Последовательность пяти отражений сетки  $C$  и вспомогательной точки  $T$  показана на рис. 61, б.

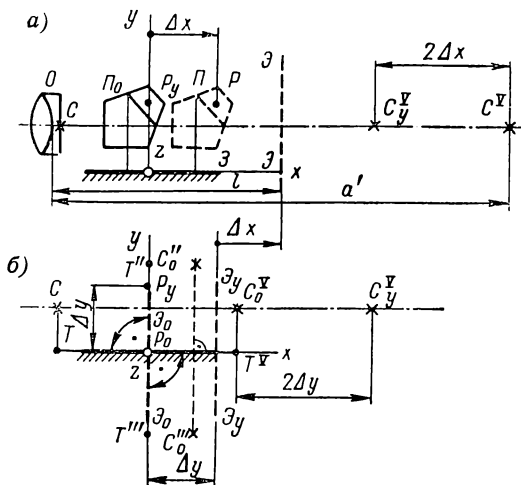


Рис. 61. Определение влияний действенных подвижек пентапризмы, применяемой в визирной трубе для фокусировки

Если сместить пентапризму вдоль оси  $y$  на величину  $\Delta y$  в положение  $P_y$ , то на столько же, но вдоль оси  $x$  сместится плоскость эквивалентного зеркала в положение  $\mathcal{E}_y\mathcal{E}_y$ , а изображение  $C_0^V$  сместится параллельно оси  $x$  на удвоенную величину  $2\Delta y$  в положение  $C_y^V$ . Это вызовет такой же величины расфокусировку трубы.

Смещение ребра  $P$  пентапризмы вдоль оси  $x$  на величину  $\Delta x$ , как видно из рис. 61, а, дает тот же эффект — изображение  $C^V$  сетки смещается вдоль оси  $x$  на величину  $2\Delta x$ . Эквивалентное зеркало  $\mathcal{E}\mathcal{E}$  окажется смещенным от зеркала  $\mathcal{E}_y\mathcal{E}_y$  вправо еще на величину  $\Delta x$  вдоль оси  $x$ .

Таким образом, смещения ребра  $P$  пентапризмы вдоль осей  $x$  и  $y$  дают одинаковый результат — расфокусировку сетки трубы.

Подвижки пентапризмы  $\Pi$  без крыши вдоль оси  $z$  всегда недействительны. В данной схеме оказываются недействительными такие же подвижки и пентапризмы с крышей, так, как, например, сдвиг изображения сетки  $C_0''$  на величину  $2\Delta z$ , вызываемый сдвигом ребра крыши вдоль оси  $z$  на величину  $\Delta z$ , компенсируется обратным сдвигом изображения сетки  $C_0^V$  на ту же величину  $2\Delta z$  при возвратном ходе лучей от крыши. Вследствие этого изображение сетки останется на месте — в точке  $C_0^V$  оси  $x$ .

Теперь рассмотрим повороты обеих пентапризм вокруг каждой из осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Поворот обычной пентапризмы и пентапризмы с крышей вокруг оси  $z$  основной координатной системы, т. е. вокруг приведенного ребра, недействен: изображение зеркала  $\mathcal{Z}$  в обратном ходе лучей через пентапризмы остается параллельным себе, т. е. эквивалентное зеркало  $\mathcal{E}\mathcal{Z}$  не наклоняется. Повороты же обычной пентапризмы вокруг осей  $x$  и  $y$  на углы  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно вызывают наклон плоскости эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{Z}$  в обоих случаях в одну и ту же сторону вокруг оси  $y$  на те же самые углы  $\alpha$  и  $\beta$ . Изображение сетки  $C^V$  сдвинется при этом в боковом направлении на величину  $\Delta z = 2l\alpha$  или  $\Delta z = 2l\beta$ , где  $l$  — расстояние от сетки  $C$  до эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{Z}$ . Наклон изображения при этом не возникнет, так как схема работает в автоколлимационном ходе лучей.

Повороты пентапризмы с крышей на углы  $\alpha$  и  $\beta$  вызывают отклонения эквивалентного зеркала на те же углы, но в разные стороны. Это легко найти с помощью матрицы  $M''$  по формуле (III.36).

Если бы ось вращения обычной призмы была перпендикулярна биссектрисе угла между осями  $x$  и  $y$ , а ось вращения призмы с крышей — параллельна этой биссектрисе, то малые повороты этих пентапризм вокруг указанных осей не вызывали бы боковых сдвигов сетки  $C$ , как это следует из п. 11.

Окончательные выводы по рассмотренной схеме трубы с фокусировкой сводятся к следующему.

1. Параллельные смещения обычной пентапризмы или пентапризмы с крышей не влияют на направление визирной оси трубы, а изменяют лишь ее фокусировку, так как эквивалентное зеркало  $\mathcal{E}\mathcal{Z}$  при этом смещается параллельно себе вдоль своей нормали.

2. Наклоны главного сечения пентапризм на углы  $\alpha$  и  $\beta$  вокруг осей  $x$  и  $y$  дают отклонение визирной оси в боковом направлении на угол  $\frac{2l}{a'}\alpha$  или на угол  $\frac{2l}{a'}\beta$ , где  $l$  — расстояние от сетки  $C$  до эквивалентного зеркала  $\mathcal{E}\mathcal{Z}$ ;  $a'$  — расстояние от задней узловой точки объектива  $O$  до изображения сетки  $C^V$ . Наклон изображения при этом также не возникает, так как эквивалентное зеркало  $\mathcal{E}\mathcal{Z}$  в данном случае поворачивается вокруг оси  $y$  на углы  $\alpha$  или  $\beta$ .

У каждой из пентапризм существует особая ось, параллельная главному сечению, наклоны вокруг которой призмы на малые углы не вызывают поворотов эквивалентного зеркала ЭЭ вокруг оси  $y$ . У обычной пентапризмы эта особая ось перпендикулярна биссектрисе угла между осями  $x$  и  $y$ , у пентапризмы с крышей она параллельна этой биссектрисе (см. п. 11).

3. Любая из подвижных пентапризм — обычная или с крышей — в сочетании с перекрестием  $C$  и неподвижным плоским зеркалом  $З$  может быть использована для фокусировки в оптической системе отсчетной трубы без точных направляющих для визирования в плоскости, параллельной зеркалу  $З$ . Однако предпочтительнее схема с обычной пентапризмой, так как отсутствие крыши позволяет получить лучшее качество изображения и избежать раздвоения зрачка и изображения сетки.

## Глава IV

### ЦЕНТРИРОВАНИЕ УЗЛОВ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ОСНОВНЫМ БАЗАМ

#### 16. Основные базы оптических узлов и систем

Одной из наиболее распространенных операций при сборке и юстировке оптических систем является центрирование их элементов по отношению к заданным конструкторским базам. Эта операция выполняется с различной точностью в зависимости от преследуемой цели.

Грубая центровка частей до десятых долей миллиметра требуется в осветительных системах и в тех случаях, когда следят лишь за тем, чтобы пучок световых лучей не срезался диафрагмами оптической системы. Точная центровка частей оптических систем — до сотых долей миллиметра — необходима при установке визирных и оптических осей по отношению к заданным конструкторским базам — к осям вращения, к осям уровней и т. д. Еще более точная центровка линз требуется при сборке объективов микроскопов, зрительных труб, проекционных приборов, фото- и киноаппаратов, так как все эти объективы должны давать изображение высокого качества.

Основной базой при центрировании оптических систем с целью обеспечения высокого качества изображения является оптическая ось. Под оптической осью понимают прямую, которая проходит через центры кривизны всех сферических поверхностей, составляющих центрированную оптическую систему. В таком определении оптическая ось имеется только у систем из двух поверхностей — у отдельной линзы или у пары сферических зеркал. В реальной оптической системе с числом поверхностей более двух нет оптической оси в упомянутом смысле.

Можно было бы определить понятие оптической оси с абберационной точки зрения. Назвать, например, оптической осью реальной системы объектива прямую, проходящую через его заднюю узловую точку и через ту точку плоскости изображения, которая

имеет минимальную волновую aberrацию. Однако пользоваться таким определением оптической оси практически было бы весьма сложно.

На практике часто встречается необходимость в определении понятия оптической оси не с aberrационной, а с чисто геометрической точки зрения. Оптической осью в этом смысле можно было бы назвать прямую, проходящую через переднюю  $K$  и заднюю  $K'$  узловые точки системы (рис. 62). Местоположение изображения точки предмета в поле зрения проектирующей системы можно также определить, например, с помощью так называемой

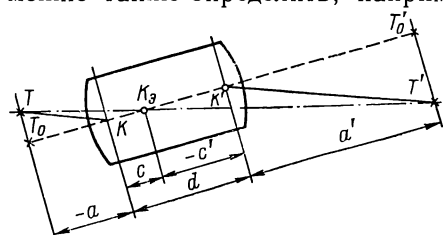


Рис. 62. Определение местоположения эквивалентной узловой точки линзовой системы

эквивалентной узловой точки [14]. Место эквивалентной узловой точки  $K_3$  легко найти, если известно положение действительных узловых точек системы  $K$  и  $K'$  и ее линейное увеличение  $V$ , так как последнее равно

$$V = \frac{a'}{a} = \frac{c'}{c}, \quad (\text{IV.1})$$

где  $a$  и  $a'$  — расстояния от передней узловой точки  $K$  до точки предмета  $T_0$  на оси, совпадающей с отрезком  $\overline{KK'}$ , и соответственно от задней узловой точки  $K'$  до сопряженной точки изображения  $T'_0$ ;

$c$  и  $c'$  — расстояния от тех же точек  $K$  и  $K'$  до эквивалентной узловой точки  $K_3$ .

Изображение  $T'$  точки предмета  $T$  находится на фиктивном осевом луче  $\overline{TK_3}$ , а ход действительного луча представляется ломаной линией  $\overline{TK} + \overline{KK'} + \overline{K'T'}$ , причем выходящий луч  $\overline{K'T'}$  параллелен падающему лучу  $\overline{TK}$ . Если точка предмета  $T_0$  лежит на оси  $\overline{KK'}$  системы, то ее изображение  $T'_0$  находится на той же оси.

Для расстояния  $c'$  от эквивалентной узловой точки  $K_3$  до задней узловой точки  $K'$  из формулы (IV.1) получим

$$c' = Vc. \quad (\text{IV.2})$$

Из рис. 62 напомним

$$c = c' + d.$$

После подстановки в формулу (IV.2) найдем

$$c' = \frac{V}{1-V} d. \quad (\text{IV.3})$$

Из выражения (IV.3) следует, что при удалении предмета от объектива до бесконечности, когда линейное увеличение  $V$  непрерывно уменьшается до нуля, эквивалентная узловая точка  $K_3$  будет непрерывно приближаться к задней узловой точке  $K'$  и совместится с ней при  $a = \infty$ .

Осью телескопической системы тогда следует назвать прямую, проходящую через заднюю узловую точку объектива  $K_1'$  и переднюю узловую точку окуляра  $K_2$  (рис. 63). Пучки лучей, параллельные этой оси, по выходе из телескопической системы не изменяют своего направления.

Важнейшее значение при юстировке оптических приборов имеет также понятие визирной оси. Визирная ось обычно определяется как прямая, которая проходит через центр перекрестия сетки и через заднюю узловую точку объектива. Это понятие справедливо лишь для центрированного круглого, плоского и равномерного освещенного входного зрачка.

В общем случае зрачок может быть произвольной формы и может занимать любое положение по отношению к оси оптической системы. В качестве центра такого зрачка следует принять точку, совпадающую

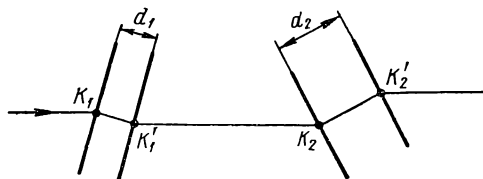


Рис. 63. Определение положения оптической оси системы двух линз

с центром тяжести сечения светового пучка в плоскости входного зрачка. Если освещенность в плоскости входного зрачка равномерная, то этот центр совпадает с геометрическим центром тяжести действующего сечения зрачка.<sup>1</sup>

Если зрачок разделен на части, то каждая из его самостоятельно действующих частей имеет свой центр тяжести и оптическая система с сеткой будет иметь несколько визирных осей, проходящих через эти центры тяжести каждой из частей зрачка и через центр общего перекрестия. Известно, например, что куб-призма, стоящая перед объективом отсчетной трубы, делит его зрачок на две независимые части, поскольку куб-призма составлена из двух отдельных призм, разворачивающихся в самостоятельные развертки, в которых, как по независимым каналам, распространяются световые пучки. Так же делит световые пучки и ребро крыши в призмах. Здесь развертка призмы для обеих ее половинок получается как бы общая, но на самом деле в каждой половинке световые пучки распространяются независимо. Здесь также имеются два главных луча, которые проходят через центры тяжести своих частей входного зрачка.

Это обстоятельство используется оптиками на практике, например при контроле прямого угла крыши в призмах. Знак ошибки угла крыши определяется с помощью небольшой расфокусировки объектива автоколлиматора; при этом наблюдается

<sup>1</sup> Таким образом, в общем случае визирная ось представляет собой ломаную линию, отрезки которой в пространстве изображений и в пространстве предметов являются взаимно сопряженными линиями.



расстояния  $a$  и  $b$  при изготовлении сетки выдержаны с необходимой точностью одинаковыми, а штрих  $\Gamma\Gamma$  — строго прямолинейным.

В автоколлимационных окулярах Гаусса указанная ошибка не возникает, так как здесь наблюдается непосредственно автоколлимационное изображение центра перекрестия, т. е. точки  $C$ .

В визирных системах с внутренней фокусировкой применяются движущиеся вдоль оси линзы, плоские зеркала или призмы. Поперечная децентрировка в этих случаях может вызвать так называемую кривизну, или непрямолинейность, визирной линии [40].

Для визирных систем с глубокой перефокусировкой существует несколько понятий для определения направления визирной оси. Применяется обычное понятие о визирной оси как о направлении, определяемом центром перекрестия, которое находится

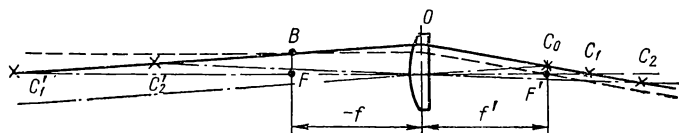


Рис. 65. Визирная линия трубы с фокусировкой

в плоскости изображения визирной трубы. Когда плоскость изображения совпадает с фокальной плоскостью объектива, то «главный луч объектива, проходящий через перекрестие сетки. . . часто называют астрономической визирной осью» [11, стр. 71]. В обоих случаях здесь подразумевается, что второй точкой визирной оси является центр выходного зрачка объектива или, точнее, задняя узловая точка объектива.

В трубах с перефокусировкой используется еще и третье определение понятия «визирная ось».

«Если перекрестие сетки при перефокусировке перемещается по оптической оси или главному лучу, то визирная ось будет иметь неизменное положение. В действительности перекрестие сетки может перемещаться по направлению, не совпадающему ни с оптической осью, ни с главным лучом, и направление визирной оси окажется непостоянным» (там же).

На рис. 65 перекрестие перемещается по наклонной, но строго прямолинейной траектории  $C_0C_1C_2$ , причем точка  $C_0$  совпадает с фокальной плоскостью объектива  $O$ . Изображение этой траектории в пространстве предметов представляет собой сопряженную наклонную же прямую  $C'_0C'_1C'_2$ , причем изображение сопряженной точки  $C'_0$  находится в бесконечности. Прямая  $C'_2C'_1C'_0$ , представляющая собой геометрическое место изображений точек траектории перекрестия  $C$  в пространстве предметов, параллельна астрономической визирной оси и «называется главной или геодезической визирной осью» (там же).



Вследствие ошибок направляющих фокусирующего тубуса траектория сетки  $C_0C_1C_2$  никогда не бывает прямолинейной, и изображение траектории  $C'_0C'_1C'_2$  также будет некоторой кривой линией. Поэтому правильнее было бы назвать эту последнюю кривую не осью, а **визирной линией** [40].

Из рис. 65 видно, что если пренебречь аберрациями объектива, (главным образом дисторсией), то строго прямолинейная траектория движения сетки  $C_0C_2$  изображается в пространстве предметов также в виде отрезка прямой  $C'_2C'_0$ . При поперечном смещении сетки эта прямая  $C'_2C'_0$  будет лишь менять направление, вращаясь вокруг точки  $B$  передней фокальной плоскости объектива (показано штриховой линией).

## 17. Центрирование оптических узлов и систем

Для правильной работы многих приборов необходимо определенным образом установить визирные, оптические и другие оси по отношению к заданным конструкторским базам — плоскостям, осям вращения, осям уровней или к визирным, оптическим и другим осям или направлениям, внешним по отношению к юстируемым

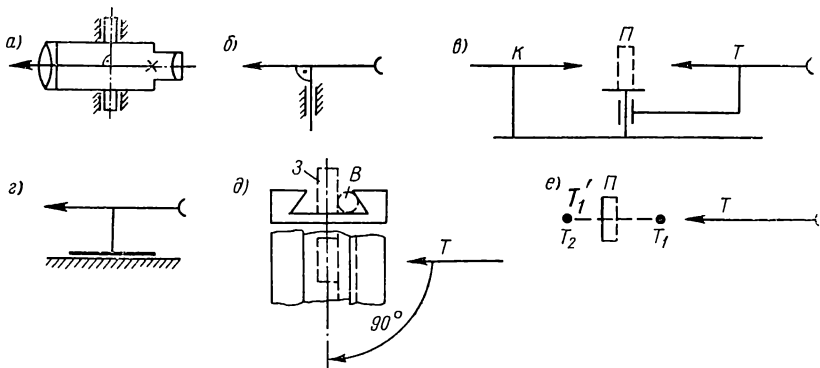


Рис. 66. Типовые задачи по юстировке визирных осей труб и других осей по отношению к заданной плоскости

мому узлу или прибору. Многие примеры были рассмотрены ранее. Здесь делается общий обзор указанных задач, которые можно классифицировать по числу связей, накладываемых заданной конструкторской базой на юстируемый объект.

Можно выделить всего три группы задач: в первой группе юстируемую ось требуется установить параллельно заданной плоскости, во второй — параллельно заданному направлению и в третьей — юстируемую ось надо совместить с заданной осью.

Примеры задач первой группы приведены на рис. 66, где условно изображены:  $a$  — теодолитная труба, визирная ось которой,

показанная жирной стрелкой, должна быть параллельна коллимационной плоскости, т. е. плоскости, перпендикулярной оси цапф или оси вращения трубы; *б* — нивелирная труба, визирная ось которой, точнее — ее визирная линия, должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения нивелира; *в* — неподвижный коллиматор *K* и поворотная труба *T* горизонтального гониометра, визирные оси которых должны быть перпендикулярны оси вращения трубы *T*; *г* — труба на подставке, визирная ось которой должна быть параллельна опорной плоскости подставки; *д* — неподвижная труба *T*, визирная ось которой должна быть перпендикулярна направляющим формы ласточкина хвоста; *е* — неподвижная труба *T*, визирная ось которой должна быть параллельна плоскости, проходящей через базовый штрих (показанный на рисунке штриховой линией  $T_1T_2$ ), и через центр объектива трубы *T*.

Ко всем перечисленным трубам предъявляются по существу одинаковые требования: их визирные оси должны быть установлены параллельно заданной плоскости с предписанной точностью (обычно от нескольких секунд до десятков секунд угла), для чего достаточно одной пары встречных винтов при сетке (или при объективе), действующих перпендикулярно направлению заданной плоскости. Контроль при юстировке труб (рис. 66, *а—г*) осуществляется их поворотом в заданной плоскости на пол-оборота, в результате чего ошибка меняет знак и наблюдается ее удвоенная величина.

Для измерения величины ошибки используются различные способы. В теодолите (рис. 66, *а*) удвоенная коллимационная ошибка отсчитывается по горизонтальному лимбу (на рисунке не показан) после перевода трубы через зенит и повторного наведения в точку, близкую к горизонту (см. п. 27). Неперпендикулярность визирной оси в нивелире (рис. 66, *б*) обнаруживается нивелированием по способу двух станций, а в лабораторных условиях — с помощью двух встречных коллиматоров. Последний способ применим и к трубе на подставке (рис. 66, *г*). В гониометре (рис. 66, *в*) коллимационная ошибка трубы *T* выявляется автоколлимационным методом с помощью вспомогательной плоскопараллельной пластинки *П*, установленной на регулируемом столике.

При юстировке неподвижных труб (рис. 66, *д, е*) ошибки выявляются другими способами. Чтобы сравнить направление визирной оси юстируемой трубы с заданной плоскостью, последнюю необходимо «материализовать». В направляющий паз формы ласточкина хвоста (рис. 66, *д*) можно ввести вспомогательный валик *В*, который должен быть строго прямолинейным и цилиндрическим. Нормаль плоского зеркала *З*, прижатого к валику *В*, при этих условиях будет перпендикулярна оси направляющего паза.

В примере по рис. 66, *е* направление штриха  $T_1 T_2$  «оптифицируют» с помощью пластинки  $\Pi$ . Установка плоскопараллельной пластинки  $\Pi$  перпендикулярно штриху проверяется по совмещению точки  $T_2$  с зеркальным отражением точки  $T'_1$  противоположного конца штриха от плоскости пластинки, которая ставится посередине между этими точками. Трубу  $T$  перпендикулярно пластинке  $\Pi$  можно установить автоколлимационным методом.

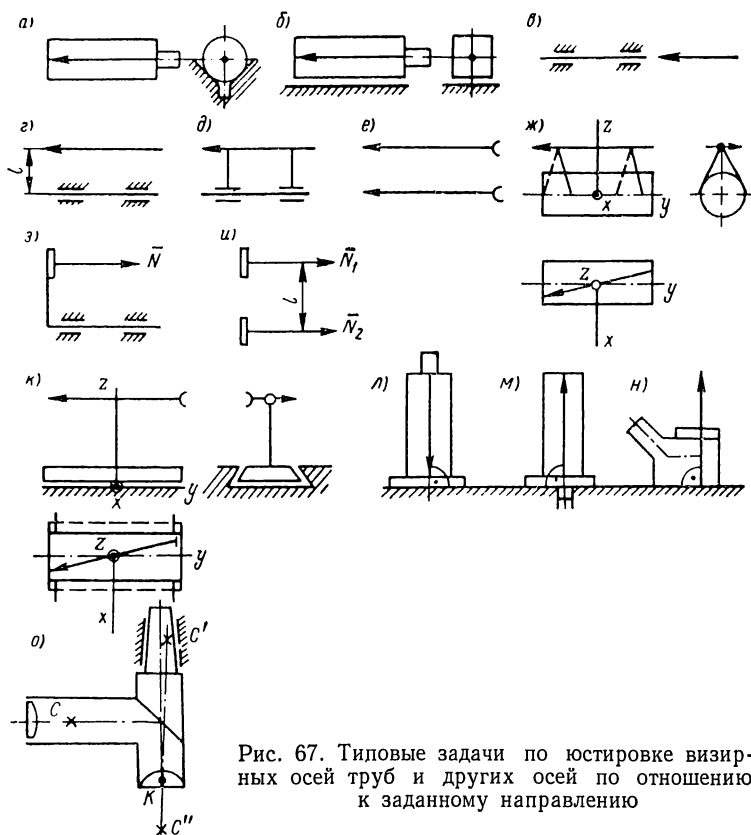


Рис. 67. Типовые задачи по юстировке визирных осей труб и других осей по отношению к заданному направлению

Примеры задач второй группы показаны на рис. 67, где условно изображены: *а* — поворотная труба с цапфами, визирная ось которой должна быть параллельна геометрической оси, проходящей через центры цапф; *б* — квадратная трубка, визирная ось которой должна быть параллельна геометрической оси ее корпуса; *в* — неподвижная трубка, визирная ось которой должна быть параллельна оси вращения, отделенной от трубки и расположенной соосно; *г* — неподвижная трубка, визирная ось которой должна быть параллельна оси вращения, отделенной от трубки и сдвинутой на расстояние  $l$ ; *д* — поворотная трубка внецентренная, визирная

ось которой должна быть параллельна оси вращения;  $e$  — бинокулярные трубки, оптические оси которых должны быть взаимно параллельны;  $ж$  — накладной цилиндрический уровень, ось которого должна быть параллельна оси (ребру) укладочной призмы, скрепленной с уровнем;  $з$  — плоское зеркало на консоли, скрепленной с осью вращения; нормаль зеркала  $\bar{N}$  должна быть параллельна оси вращения;  $и$  — два плоских зеркала, разделенных расстоянием  $l$ , нормали которых  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$  должны быть взаимно параллельны;  $к$  — трубка, скрепленная с направляющей формы ласточкина хвоста; визирная ось трубки должна быть параллельна оси направляющей;  $л$ ,  $м$  и  $н$  — торцевая трубка, фланцевый коллиматор и подставная трубка, визирные оси которых должны быть перпендикулярны соответственно опорному торцу, опорному фланцу и опорной плоскости трубок.

Перечисленные задачи второй группы также имеют много общего: юстируемые визирные или оптические оси, ось уровня, оси вращения или ось направляющих должны быть установлены параллельно заданным направлениям — осям вращения, геометрическим осям, опорным торцам и плоскостям — с относительно высокой точностью (от нескольких секунд до десятков секунд угла). Для этого необходимо юстируемые оси наклонять в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что можно осуществить двумя парами встречных и взаимно перпендикулярных винтов при сетке или при объективе, или, наконец, наклонами всего юстируемого объекта по отношению к внешней базе вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Для выявления ошибок следует использовать поворот юстируемого объекта на большой угол, желательно на  $180^\circ$ , вокруг оси, по отношению к которой необходимо ориентировать юстируемую ось.

Перекладка элемента, с которым связана юстируемая ось, на оси (являющейся для этого элемента внешней базой) с одновременным поворотом элемента на  $180^\circ$  не решает задачи полностью; при этом выявляется составляющая ошибка лишь в одной плоскости. Покажем это на примере рис. 67,  $ж$ . При перекладке накладного уровня с поворотом на  $180^\circ$  вокруг оси  $z$  обнаружится лишь непараллельность оси уровня по отношению к плоскости  $xу$  на угол  $\alpha$ . Чтобы проверить параллельность оси уровня по отношению к оси укладочной призмы, следует повернуть призму с уровнем вокруг оси  $y$  на угол  $\beta$ . Орт  $\bar{A}_0$  направления оси уровня, в начальном положении призмы равный  $\bar{A}_0 = A_x \bar{i} + A_y \bar{j} + A_z \bar{k}$ , после ее поворота на угол  $\beta$  вокруг оси  $y$  против часовой стрелки будет равен

$$\begin{aligned} \bar{A}_\beta = & (A_x \cos \beta + A_z \sin \beta) \bar{i} + A_y \bar{j} + \\ & + (-A_x \sin \beta + A_z \cos \beta) \bar{k}. \end{aligned}$$

Синус угла наклона  $i$  оси уровня к горизонтальной плоскости дается третьей проекцией, т. е.  $\sin i = -A_x \sin \beta + A_z \cos \beta$ . Если

в начальный момент сделать  $A_z = 0$ , то видно, что угол  $i$  будет зависеть только от направления вращения призмы вокруг оси  $y$ : при поворотах призмы на небольшой угол  $\beta$  в противоположных направлениях пузырек накладного уровня будет уходить в разные стороны. Для устранения обеих составляющих ошибки — угла  $\alpha$  и угла  $\gamma$  — оправу с уровнем следует наклонять по отношению к накладной призме соответственно вокруг осей  $x$  и  $z$ .

В примере по рис. 67, *к* переключкой трубы в направляющем пазу выявляется лишь одна составляющая непараллельности визирной оси — в плоскости  $yz$ .

Для выявления другой составляющей ошибки — в плоскости  $xu$  — можно воспользоваться приемом, который был использован ранее (рис. 66, *д*).

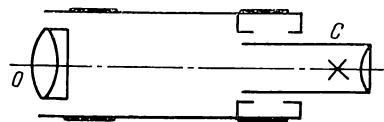


Рис. 68. Задача о совмещении визирной линии трубы с ее геометрической осью

Для контроля ошибок в примерах по рис. 67, *в*, *г*, *з*, *и* целесообразно использовать автоколлимационный метод в различных вариантах исполнения.

Когда требуется юстировать не визирные, а оптические оси труб, как в примере по рис. 67, *е*,

то для контроля удобно воспользоваться проекционной установкой, например установкой А. Н. Захарьевского для биноклей [18].

На рис. 67, *о* приведена схема центрировочного микроскопа, который применяется, например, для установки оптического делительного стола по отношению к шпинделю станка [63, стр. 390]. Для правильной работы изображение  $C''$  сетки в предметной плоскости микроскопа необходимо установить на продолженную ось вращения шпинделя. Визирная ось  $\overline{C'K}$ , проходящая через перекрестие сетки  $C'$  и заднюю узловую точку  $K$  микрообъектива, при этом может быть и наклонена к оси вращения шпинделя.

На рис. 68 в качестве примера задач третьей группы схематически показана поворотная труба с глубокой фокусировкой. Для совмещения визирной линии трубы с ее геометрической осью вращения необходимо сдвигать и сетку  $C$ , и объектив  $O$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для контроля следует повернуть трубу на  $180^\circ$  вокруг собственной оси и наблюдать, имеется ли биение изображения одной далекой (или бесконечно далекой) и второй близкой точки пространства предметов. Рассмотрим этот случай более подробно.

В трубах с внутренней фокусировкой поперечный сдвиг сетки с траектории центра передвигной фокусирующей линзы приводит не только к наклону визирной линии, но и к ее искривлению в пространстве предметов [40]. Это связано с тем, что изображение перекрестия через фокусирующую линзу даже при ее идеально

прямолинейных направляющих в общем случае получается на отрезке гиперболы, уравнение которой имеет вид

$$y = e \left[ \left( 1 - \frac{x}{2f'} \right) - \sqrt{\left( \frac{x}{2f'} \right)^2 - \frac{x}{f'}} \right], \quad (\text{IV.4})$$

где  $x$  — значения абсциссы точек гиперболы, т. е. расстояние от плоскости перекрестия  $C$  до его изображения в обратном ходе лучей через отрицательную линзу;

$e$  — величина поперечного сдвига перекрестия  $C$  от оси  $x$ , совпадающей с траекторией перемещения центра фокусирующей линзы;

$f'$  — заднее фокусное расстояние линзы.

По формуле (IV. 4) можно рассчитать кривизну визирной линии труб с глубокой фокусировкой. В трубе горного теодолита ТГ-3 наибольшая стрелка кривизны визирной линии в пространстве предметов при поперечном сдвиге сетки на  $e = 1$  мм составила 0,585 мм.

Если непрямолинейность визирной линии в этой трубе не должна превышать 0,01 мм, то допуск на неточность совмещения центра перекрестия сетки с траекторией центра фокусирующей линзы следует установить менее 0,02 мм.

В трубах с глубокой фокусировкой предусматривается специальная поперечная регулировка перекрестия по отношению к передвижной фокусирующей линзе. В визирных трубах нивелиров и теодолитов регулировочные винты при сетке обычно используются для юстировки направления визирной линии по отношению к собственной оси вращения или к направлению оси уровня. Если эти винты использовать для устранения кривизны визирной линии, то для юстировки положения визирной линии следует ввести дополнительные регулировочные устройства.

Для контроля прямолинейности визирной линии труб с глубокой фокусировкой применяют три способа.

Для работы по первому способу требуется коллиматор с несколькими неподвижными перекрестиями, расположенными на различных расстояниях между объективом и его фокусом. Изображения всех перекрестий должны лежать строго на одной прямой. Эта прямая обычно совпадает с геометрической осью коллиматора, проходящей через центры хорошо обработанных цапф наружной трубы, что позволяет использовать для контроля прямолинейности визирной линии вращение трубы коллиматора на неподвижных опорах.

Вместо описанного коллиматора можно воспользоваться и эталонной визирной трубой с достаточной глубиной перефокусировки и строго прямолинейной визирной линией.

Для использования второго способа сама испытуемая визирная труба должна иметь хорошо обработанные цапфы. При повороте такой трубы на  $180^\circ$  на неподвижных опорах изменяются отсчеты,

снятые трубой до ее поворота по ряду неподвижно закрепленных марок, расположенных на различных расстояниях перед трубой. Обработкой полученных результатов измерений можно найти удвоенную величину кривизны визирной линии в пространстве предметов для каждой установки трубы.

Описанный способ не может быть использован для контроля труб, не имеющих поворота вокруг продольной оси. В этих случаях можно применить третий способ — способ оптического поворота. Для этого после выполнения серии отсчетов по маркам, неподвижно закрепленным перед испытуемой трубой на различных расстояниях, непосредственно перед трубой включают обращающую призму, например призму Дове или призму Аббе с крышкой, и снимают вторую серию отсчетов по тем же маркам. Обработкой результатов измерений и здесь можно выявить кривизну визирной линии в ее промежуточных точках.

## Г л а в а V

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 18. Основные требования к качеству изображения оптических систем

**Основные погрешности оптических систем.** Оптические системы, применяемые в оптико-механических приборах, позволяют решать следующие задачи:

1) наблюдать изображения объектов непосредственно глазом (визуальные системы) или их фотографировать (фотографические системы);

2) измерять линейные размеры объектов или углы между ними (длиномерные и угломерные системы), снимать отсчеты по шкалам (отсчетные системы);

3) разлагать немонахроматические излучения в спектры (спектральные системы);

4) выполнять интерферометрические, рефрактометрические, колориметрические, фотометрические, поляриметрические измерения с помощью соответствующих систем;

5) концентрировать и передавать световую энергию (осветительные системы, светопроводы).

Современные оптические приборы применяют как в видимой, так и в невидимых — ультрафиолетовой и инфракрасной — областях спектра, используя соответствующие приемники лучистой энергии: глаз, фотоэмульсию, фотоэлемент, фотоэлектронный умножитель, фотосопротивление, электроннооптический преобразователь, электроннолучевую трубку, болометр и др.

Оптические системы должны давать изображения высокого качества, особенно системы первых трех из перечисленных групп, и иметь заданные характеристики (увеличение, поле зрения и др.). Другими важными требованиями являются обеспечение высокой точности измерений, надежности, т. е. нерасстраиваемости прибора в условиях эксплуатации, высокой производительности измерений, возможно более низкой себестоимости изготовления прибора, простоты ремонта при эксплуатации.



На качество изображения оптической системы и на другие ее свойства влияют следующие основные факторы.

1. Отклонения величины основного показателя преломления  $n_D$ , средней дисперсии  $n_F - n_C$  и других констант оптических материалов, из которых изготовлены детали, от стандартных (табличных) значений, а также такие дефекты, как оптическая неоднородность, двойное лучепреломление, свили и т. д.

2. Погрешности обработки оптических деталей — отклонение формы их рабочих поверхностей от заданной, децентрировка линз, клиновидность пластинок и разверток призм.

3. Погрешности сборки, в результате которых нарушается взаимоположение деталей и узлов в приборе и появляются децентрировка системы, расфокусировка изображения и биение осей, а также деформации оптических поверхностей.

Некоторые погрешности изготовления и сборки деталей и отдельные отклонения констант оптических материалов влияют на одни и те же свойства системы (например, на качество изображения), благодаря чему возможна взаимокompенсация таких дефектов. Пользуясь этой возможностью, можно расширить допуски на оптические детали.

В данной главе основное внимание уделено расчету допусков на обработку и юстировку оптических деталей и узлов.

**Критерии качества изображения, допуски для оптических систем.** Точки предметов даже идеальной оптической системой вследствие дифракции изображаются в виде пятен конечных размеров, в пределах которых волновая разность хода достигает величины  $\lambda/2$  — половины длины волны используемого света. Согласно критерию Релея, качество изображения точки считается первоклассным, пока волновые аберрации оптической системы не превосходят величины  $\lambda/4$  — четверти длины волны света. Для видимой области спектра средняя длина волны  $\lambda_{cp} = 0,55$  мкм, поэтому допустимые волновые аберрации визуальных систем не должны быть больше величины

$$\Delta_s = 0,14 \text{ мкм.} \quad (V.1)$$

Допустимые аберрации фотографических систем могут значительно превосходить критерий Релея, так как структура фотоэмульсии обычно грубее дифракционной структуры оптического изображения.

В некоторых оптических системах высокое качество изображения требуется только в одном направлении, например в спектральных приборах — вдоль спектра.

В визуальных системах из указанного допуска  $\Delta_s = 0,14$  мкм на все «технологические» аберрации, возникающие за счет ошибок изготовления и сборки оптических деталей, рекомендуется выделить только его часть не более [17]

$$(\Delta_s)_{дон} = 0,1 \text{ мкм.} \quad (V.2)$$

Этот допуск задается на ошибки всех оптических деталей системы, влияющих на качество изображения, в пределах рабочего, или действующего, пучка лучей.

**Рабочим, или действующим, пучком** называется пучок лучей наибольшего сечения, который дает в поле зрения оптической системы изображение одной точки предмета, а по выходе из системы целиком попадает в зрачок глаза наблюдателя.

Соответственно рабочим отверстием в отличие от светового размера называют участок оптической поверхности, на который падает рабочий пучок лучей.

При достаточной освещенности диаметр зрачка глаза наблюдателя  $d_{з.г} = 2 \text{ мм}$ . Если выходной зрачок прибора больше двух миллиметров, то его рабочим, или действующим, выходным зрачком становится зрачок глаза наблюдателя.

### Прохождение фронта световой волны через оптическую систему.

При прохождении через любую оптическую систему фронт световой волны, дающий изображение отдельных точек предмета, изменяет свою форму. Например, плоский волновой фронт  $w$ ,

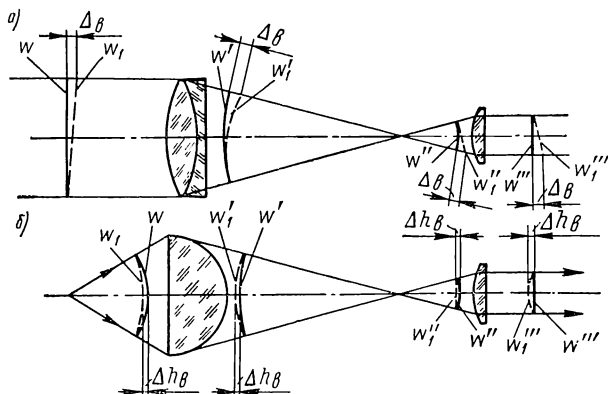


Рис. 69. Прохождение волновых фронтов через телескопическую систему (а) и микросистему (б)

исходящий из точки далекого предмета, объектив зрительной трубы (рис. 69, а) превращает в сферический фронт  $w'$ , в центре которого и получается изображение этой точки. Окуляр, наоборот, сферический волновой фронт  $w''$  превращает в плоский фронт  $w'''$ . Микрообъектив, условно изображенный на рис. 69, б в виде плоско-выпуклой линзы, превращает сферический волновой фронт  $w$  одного радиуса кривизны с центром в точке близкого предмета в сферический же фронт  $w'$ , но другого радиуса кривизны с центром в изображении этой точки.

Рассмотрим также прохождение через оптические системы волнового фронта  $w_1$ , имеющего наклон  $\Delta\beta$  или деформацию  $\Delta h_g$ . Последовательные положения этого волнового фронта на рис. 69

показаны штриховыми линиями и отмечены буквами  $w'_1$ ,  $w''_1$  и  $w'''_1$ . На основании принципа таутохронизма<sup>1</sup> следует, что в пределах данного пучка лучей, дающего изображение точки предмета, наклон волнового фронта  $\Delta_\theta$  и его деформация  $\Delta h_\theta$  при прохождении через любую оптическую систему не изменяют своей величины [17]. Использование этого вывода позволяет значительно упростить расчет допусков для оптических поверхностей и деталей.

## 19. Требования к оптическим деталям

**Прохождение волнового фронта через поверхность, перпендикулярную оси пучка лучей.** На рис. 70 показано прохождение плоского волнового фронта через границу между средами с показателями преломления  $n_1 > n_2$ , которая имеет местную неровность

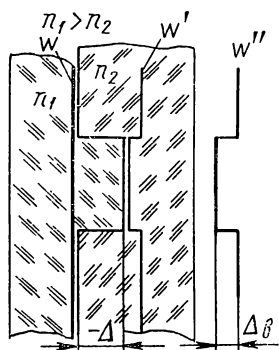


Рис. 70. Прохождение плоского волнового фронта через перпендикулярную границу раздела, имеющую местную неровность высоты  $-\Delta$

глубины  $-\Delta$ . Участок волнового фронта, проходящий через неровность, отстает от остальной части волнового фронта  $w'$ , на котором возникает местная деформация величины  $\Delta_\theta$ . Эта деформация равна оптической разности хода между лучами общего параллельного пучка, один из которых проходит через местную неровность  $-\Delta$ , а другой ее минует, т. е.

$$\Delta_\theta = -(n_1 - n_2) \Delta. \quad (V.3)$$

В случае отражающей поверхности  $n_2 = -n_1 = -n$ ; тогда

$$\Delta_\theta = -2n\Delta. \quad (V.4)$$

Следовательно, деформация выходящего фронта волны прямо пропорциональна высоте неровности оптической поверхности;

если на последнюю падает плоский волновой фронт  $w$ , то выходящий фронт  $w''$  в некотором масштабе повторяет форму оптической поверхности.

Оптические детали и поверхности вызывают различные по характеру деформации проходящего через них волнового фронта — нерегулярные микронеровности за счет микрошероховатостей поверхностей (рис. 71, а) и нарушение формы за счет, например, цилиндричности поверхностей (рис. 71, б) или их местных ошибок. При пользовании немонахроматическим источником света возникают также поперечный хроматизм, например за счет клиновидности деталей (рис. 71, в), и продольный хроматизм  $\Delta h_{FC}$  за счет непредусмотренной их фокусности (рис. 71, г).

<sup>1</sup> Принцип равенства времен прохождения светом пути между двумя фиксированными положениями волнового фронта по любому из лучей пучка.

**Допуски на поперечный и продольный хроматизм.** Допуск как на поперечный, так и на продольный хроматизм также можно задать в волновой мере. В самых ответственных случаях, например для деталей астрономических приборов, принимают, что в пределах рабочего пучка лучей наибольшее расстояние между волновыми фронтами для линий  $F$  и  $C$  тоже не должно превосходить величины  $(\Delta_{FC})_{\text{дон}} = 0,1 \text{ мкм}$  [31].

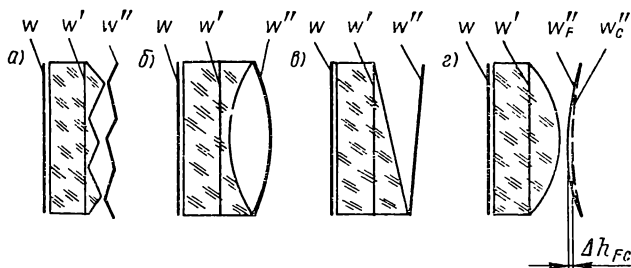


Рис. 71. Прохождение плоского волнового фронта через пластинку, имеющую микрошероховатость (а), цилиндричность (б), клиновидность (в) и сферичность (г)

При расчете допусков на клиновидность деталей поперечный хроматизм удобнее выражать в угловой мере. Допустимый угловой хроматизм за окуляром прибора при диаметре рабочего выходного зрачка  $d'_p$  равен

$$(\Delta\delta_{FC})_{\text{дон}} = \frac{(\Delta_{FC})_{\text{дон}}}{d'_p}. \quad (\text{V.5})$$

При  $(\Delta_{FC})_{\text{дон}} = 0,1 \text{ мкм}$  для допуска на хроматизм в угловых секундах получилось бы

$$(\Delta\delta_{FC})''_{\text{дон}} = \frac{20''}{d'_p}. \quad (\text{V.5a})$$

При диаметре рабочего выходного зрачка в 2 мм допуск составил бы всего  $(\Delta\delta_{FC})_{\text{дон}} = 10''$ .

В рядовых случаях рекомендуется задавать более широкие допуски на хроматизм — до  $20''$  для каждой детали, вызывающей хроматизм, независимо ни от размера выходного зрачка, ни от сложности оптической системы [52, стр. 121].

**Разделение приборного допуска на допуски для деталей и их элементов.** Общий приборный допуск можно разделить на допуски для отдельных деталей и их элементов (поверхности, углы), исходя из предположения, что действия первичных ошибок суммируются как случайные величины — по квадратичному закону. Следует еще учесть, что некоторые из ошибок имеют скалярный характер (например, хроматизм положения), а другие являются векторными (клиновидность деталей, цилиндричность поверхностей и др.).

В случае скалярных ошибок средняя величина волнового допуска  $(\Delta_\theta)_{cp}^{ck}$  на каждый источник таких ошибок подсчитывается по формуле

$$(\Delta_\theta)_{cp}^{ck} = \frac{(\Delta_\theta)_{\partial on}^{ck}}{\sqrt{m_{ck}}}. \quad (V.6)$$

В случае векторных ошибок средняя величина волнового допуска  $(\Delta_\theta)_{cp}^{вк}$  на каждый источник таких ошибок подсчитывается по аналогичной формуле

$$(\Delta_\theta)_{cp}^{вк} = \sqrt{2} \frac{(\Delta_\theta)_{\partial on}^{вк}}{\sqrt{m_{вк}}}. \quad (V.7)$$

В этих формулах  $(\Delta_\theta)_{\partial on}^{ck}$  и  $(\Delta_\theta)_{\partial on}^{вк}$  — общий допуск на скалярные и векторные ошибки оптической системы;  $m_{ck}$  и  $m_{вк}$  — число первичных скалярных и векторных ошибок.

**Допуски на оптические поверхности и детали, перпендикулярные оси пучка лучей.** Поскольку между погрешностью оптической поверхности высоты  $\Delta$  и величиной вызываемой ею деформации  $\Delta_\theta$  проходящего волнового фронта существует прямая пропорциональность, то для расчета допусков на ошибки оптических поверхностей можно пользоваться формулой вида

$$\Delta_{\partial on} = g (\Delta_\theta)_{\partial on}, \quad (V.8)$$

где  $g$  — коэффициент, связывающий допуск на дефекты поверхности детали с волновым допуском для нее.

Для преломляющей оптической поверхности, разграничивающей среды с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , из формулы (V.3) легко получить

$$g = -\frac{1}{n_1 - n_2}. \quad (V.9)$$

Для преломляющей поверхности, граничащей с воздухом ( $n_1 = 1$ ;  $n_2 = n$ ), найдем

$$g_n = -\frac{1}{1 - n}. \quad (V.9a)$$

Для внутренней отражающей поверхности ( $n_1 = -n_2 = n$ ) получим

$$g_{on} = -\frac{1}{2n}, \quad (V.9б)$$

а для наружной отражающей поверхности будет

$$g_o = -\frac{1}{2}. \quad (V.9в)$$

При  $n = 1,5$  для последних трех случаев получится

$$g_n = 2; g_{on} = -\frac{1}{3}; g_o = -\frac{1}{2}.$$

Следовательно, требования к точности обработки наружной отражающей поверхности в четыре раза, а внутренней отражающей поверхности — даже в шесть раз строже, чем к обработке преломляющей поверхности, граничащей с воздухом.

Используя коэффициент  $g$  из формулы (V.9), легко найти требования к обработке оптических поверхностей по ГОСТу 2789—59. Расчеты показывают, что рабочие поверхности оптических деталей, граничащие с воздухом, почти всегда требуют полировки по наивысшим классам чистоты — выше  $\nabla 12$ . Поверхности склейки можно обрабатывать по более низким классам чистоты ( $\nabla 10$  и даже  $\nabla 9$ ).

Отдельные дефекты полированных поверхностей и материала (царапины, выколки, пузыри, камни и др.) регламентируются не по их глубине в соответствии с ГОСТом 2789—59, а по величине их общей площади по отношению к площади поперечного сечения рабочего пучка лучей в месте расположения указанных дефектов.

К дефектам макрогеометрии оптических поверхностей по ГОСТу 10732—64 относятся их отклонение от правильной сферической или плоской формы в числе интерференционных полос  $\Delta N$  под пробным стеклом и их отступление от поверхности пробного стекла в числе полос  $N$ .

Первая ошибка включает астигматичность (цилиндричность) поверхности и местные ошибки нерегулярного характера.

Допустимую разность стрелок в главных сечениях поверхности или величину допустимой местной ошибки в пределах рабочего отверстия найдем из формулы, аналогичной формуле (V.6),

$$\Delta h_{\partial on} = g (\Delta h_s)_{\partial on}. \quad (V.10)$$

Выражая разность стрелок  $\Delta h_{\partial on}$  числом интерференционных полос под пробным стеклом, получим

$$\Delta N_{\partial on} = \frac{\Delta h_{\partial on}}{\lambda/2} = g \frac{(\Delta h_s)_{\partial on}}{\lambda/2} = g (\Delta N_s)_{\partial on}, \quad (V.11)$$

где  $\lambda$  — длина волны света, используемого для освещения при контроле поверхности пробным стеклом (при контроле в белом свете по интерференционным полосам красного цвета берется длина волны зеленого участка спектра  $\lambda = 0,55$  мкм, так как красные полосы появляются там, где для зеленого участка спектра наступает темнота);

$(\Delta N_s)_{\partial on}$  — допуск на астигматизм и местные деформации выходящего волнового фронта в числе полудлин волны света.

Для визуальных систем волновой допуск  $(\Delta h_s)_{\partial on}$  в пределах рабочего участка во всяком случае не должен превосходить величины 0,1 мкм или в числе полос

$$(\Delta N_s)_{\partial on} = \frac{(\Delta h_s)_{\partial on}}{\lambda/2} < \frac{0,1}{0,28} \text{ мкм} \approx 0,35 \text{ полосы}. \quad (V.12)$$

Допуск на астигматичность поверхности в пределах светового отверстия можно увеличить в квадрате отношения светового диаметра  $d_{cs}$  к рабочему диаметру пучка  $d$ , в результате чего будет

$$\Delta N = \Delta N_{don} \left( \frac{d_{cs}}{d} \right)^2 = g (\Delta N_a)_{don} \left( \frac{d_{cs}}{d} \right)^2. \quad (V.13)$$

Допуск на местные ошибки нерегулярного характера в пределах светового сечения можно увеличивать лишь в том случае, если эти ошибки подчиняются формуле (V.13). В противном случае их следует задавать той величины, какой они получились по формуле (V.11) для рабочего участка поверхности.

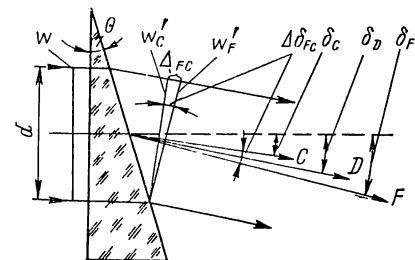


Рис. 72. Прохождение пучка немонохроматического света через преломляющий клин

Допуск  $N$  на общее отклонение формы поверхностей, перпендикулярных к оптической оси, можно определить из допустимой величины остаточных aberrаций системы.

В рядовых случаях величины  $N$  задают из других условий, например из требований взаимозаменяемости деталей или из удобства контроля их поверхностей; для неотвественных

деталей допуск  $N$  задают из технологических возможностей серийного оптического производства, где легко выдерживается допуск в 10 полос.

В полевых приборах запасные детали, например защитные стекла панорам, стереотруб, должны быть взаимозаменяемы: при замене поврежденного стекла запасным не должен возникать недопустимый параллакс сетки и не должна появляться непараллельность осей.

Для удобства контроля несферичности, которая равна наибольшей разности числа полос  $\Delta N$  в главных сечениях поверхности, общее отклонение  $N$  не должно превосходить определяемую величину  $\Delta N$  более чем в 3—5, в крайнем случае — в 10 раз.

Клиновидность пластинок и разверток призм, нормальных к оси пучка лучей, а также косина линз (рис. 72 и 73) вызывают как отклонение преломленных лучей на угол  $\delta = (n - 1) \theta$ , так и поперечный хроматизм величины

$$\Delta\delta_{FC} = \delta_F - \delta_C = (n_F - n_C) \theta = \frac{n_D - 1}{v} \theta.$$

Допуск на клиновидность преломляющих деталей можно найти из формулы

$$\theta_{don} = \frac{\Delta\delta_{FC}}{n_F - n_C} = \frac{\Delta\delta_{FC} v}{n_D - 1}, \quad (V.14)$$

где  $\Delta\delta_{FC}$  — допуск на угловой хроматизм в месте расположения детали;  
 $\nu$  — коэффициент дисперсии;  
 $n_F - n_C$  — дисперсия материала для синей (F) и красной (C) линий спектра водорода;  
 $n_D$  — основной показатель преломления для D линии спектра натрия.

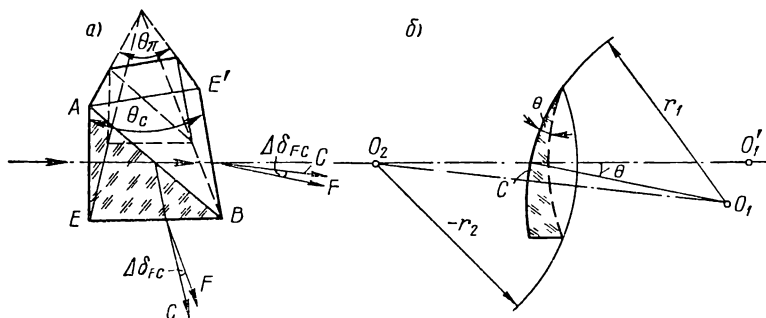


Рис. 73. Клиновидность развертки призмы вследствие ошибок углов  $\theta_c$  и пирамидальности  $\theta_\pi$  (a) и клиновидность линзы вследствие децентрировки (б)

Для практических расчетов удобнее видоизмененная формула

$$\theta_{\text{дон}} = \frac{(\Delta\delta_{FC})_{\text{дон}} \nu}{n_D - 1} \cdot \frac{1}{\gamma} = \frac{(\Delta\delta_{FC})_{\text{дон}} \nu}{n_D - 1} \cdot \frac{d'_p}{d}, \quad (\text{V.14a})$$

где  $(\Delta\delta_{FC})_{\text{дон}}$  — величина допуска на угловой хроматизм детали, пересчитанная за окуляр прибора;

$\gamma$  — угловое увеличение оптической системы, расположенной за деталью, для которой рассчитывается допуск на клиновидность;

$d$  и  $d'_p$  — диаметр рабочего пучка лучей в месте расположения детали и диаметр рабочего выходного зрачка прибора.

Остальные обозначения прежние.

Допуск на клиновидность разверток призм по ГОСТу 10732—64 выражается двумя составляющими — клиновидностью  $\theta_c$  в плоскости главного сечения призмы, возникающей за счет ошибок ее углов, и клиновидностью  $\theta_\pi$  в перпендикулярном направлении за счет пирамидальности развертки призмы (рис. 73, a). В силу взаимной перпендикулярности составляющих  $\theta_c$  и  $\theta_\pi$  суммарная клиновидность развертки призмы

$$\theta = \sqrt{\theta_c^2 + \theta_\pi^2}.$$



При расчете допусков и при контроле ошибок призм каждая из составляющих  $\theta_c$  и  $\theta_\pi$  рассматривается как самостоятельная ошибка.

Из разверток призм можно найти зависимость между отклонениями отдельных углов призмы и клиновидностью в сечении  $\theta_c$ , а также между пирамидальностью  $\pi$  призмы и ее клиновидностью  $\theta_\pi$  (см. задачу 1, п. 20).

Ошибка угла крыши вызывает двоение изображения, когда пучок лучей падает одновременно на обе отражающие грани крыши. Если допустить за окуляром двоение изображения не более 20", то допуск на угол крыши

$$\Delta_{кр} = \frac{20''}{4\gamma n \cos i}, \quad (V.15)$$

где  $\gamma$  — угловое увеличение системы, стоящей за призмой, для осевой точки ребра крыши;

$n$  — показатель преломления призмы;

$i$  — угол падения осевого луча на ребро крыши.

Допуск на децентрировку линзы, исходя из допустимого углового хроматизма, вычисляется из формулы

$$c = (\Delta\delta_{FC})_{\partial on} \nu f' \frac{d_p'}{d} = (\Delta_{FC})_{\partial on} \nu f' \frac{d_p'}{d}. \quad (V.16)$$

Формулу (V.16) можно получить из формулы (V.14a), если угол  $\theta$  выразить через величину поперечной децентрировки  $c$  тонкой линзы и радиусы ее поверхностей  $r_1$  и  $r_2$  (рис. 73, б).

Для каждой из линз, составляющих ахроматическую пару, допуски  $c$  получаются одинаковой величины, так как условие ахроматизации двух линз имеет вид

$$\nu_1 f'_1 = -\nu_2 f'_2.$$

Вследствие децентрировки линз возникает не только хроматизм, но и другие аберрации. В ответственных системах необходимо исследовать влияние децентрировки на величину комы на оси [49, стр. 295].

**Требования к оптическим поверхностям и деталям в зависимости их от местоположения в ходе лучей системы.** При расчете допусков удобно пользоваться габаритной оптической схемой прибора. На рис. 74 дана схема оптики правой трубы АСТ 10×45, которая состоит из защитного стекла 1, головной призмы 2, объектива 3, окулярной призмной системы 4, сетки 5, окуляра 6 и светофильтра 7. Построена также схема с выпрямленным ходом лучей, на которой оптические узлы отмечены цифрами со штрихами, причем развертка призмы 4 и пластинка 5 в сходящемся ходе лучей редуцированы к воздуху. Штриховыми линиями показан ход крайних лучей осевого пучка, сплошными линиями — рабочий пучок, который уже первого в 2,25 раза, так как диаметр

выходного зрачка  $d'_p = 4,5 \text{ мм}$  во столько же раз больше зрачка глаза  $d_{з.з} = 2 \text{ мм}$ . Из конструктивной схемы оптики известны световые отверстия деталей, сорта стекол, углы наклона рабочих поверхностей к оси пучка.

Уже по одной схеме оптики с ходом рабочего пучка лучей можно сделать ряд выводов о требованиях к отдельным поверхностям, деталям и узлам оптической системы.

Из формул (V.13), (V.14a) и (V.16) видно, что допуски на цилиндричность и местные ошибки оптических поверхностей, допуски на клиновидность пластинок и децентрировку линз тем строже,

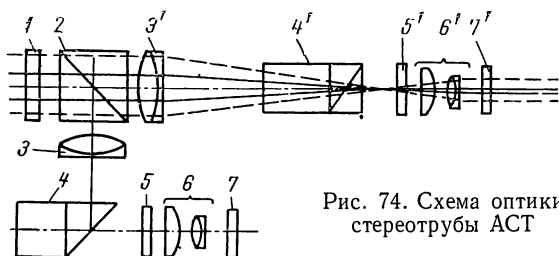


Рис. 74. Схема оптики стереотрубы АСТ

чем больше сечение рабочего пучка лучей. Если детали и узлы оптической системы стереотрубы (рис. 74) расположить в последовательности снижения требований к точности их изготовления (с учетом также сложности деталей и узлов), то на первом месте оказались бы детали и узлы 2, 3, 1, затем 4, 6, 7 и, наконец, пластинка 5 сетки, требования к точности изготовления которой свободны, так как в месте ее расположения пучок лучей сходится в точку ( $d \rightarrow 0$ ).

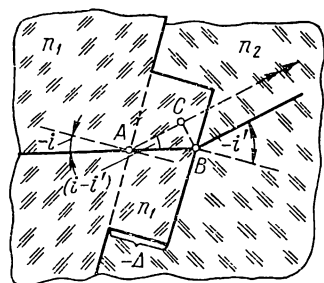
В той же зависимости от размера сечения рабочего пучка находятся требования к материалам для деталей в отношении оптической однородности, двойного лучепреломления, отклонений оптических констант. Поэтому для деталей, стоящих в широком сечении рабочего пучка, следует выбирать материалы более высоких категорий, а для деталей, находящихся в узком пучке, допустимо применять материалы пониженных категорий.

К чистоте полировки поверхностей и к их чистке, а также в отношении таких дефектов, как пузыри, камни, царапины, выколки, наоборот, требования возрастают с уменьшением сечения рабочего пучка. Расположив детали и узлы системы трубы АСТ в порядке снижения требований к чистоте полированных поверхностей и к перечисленным выше дефектам, получим обратную последовательность. Самые строгие требования следует предъявить к поверхностям, близким к плоскости изображения, в первую очередь — к пластинке 5 сетки, менее строгие — к деталям окуляра 6, светофильтру 7, призме 4, на последних местах окажутся детали и узлы 2, 3, 1 (с учетом массы стекла).

Эти общие соображения позволяют избежать грубых ошибок при выборе для деталей оптических материалов по показателям качества.

**Требования к наклонным плоским оптическим поверхностям к плоскопараллельным пластинкам.** Некоторые плоские поверхности и отдельные детали типа плоскопараллельных пластинок (защитные стекла, разделительные пластинки, развертки призм) наклонены к оси пучка лучей. Таковы, например, отражающие грани головной призмы 2 и окулярных призм 3 на рис. 74.

Найдем общее выражение для коэффициента  $g$ , который связывает высоту неровности  $\Delta$  наклонной плоскости, разделяющей



среды с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , с вызываемой этой неровностью деформацией  $\Delta_g$  проходящего волнового фронта (рис. 75). Деформация  $\Delta_g$  плоского волнового фронта равна оптической разности хода между двумя лучами падающего параллельного пучка, один из которых (показан сплошной ломаной линией) проходит через местную неровность, а другой (показан штриховой линией), минуя ее, преломляется на граничной плоскости. Эта разность хода

$$\Delta_g = n_1 \overline{AB} - n_2 \overline{AC}.$$

Из рисунка замечаем, что

$$\overline{AB} = -\frac{\Delta}{\cos i}; \quad \overline{AC} = \overline{AB} \cos(i' - i),$$

Рис. 75. Прохождение плоского волнового фронта через наклонную границу раздела, имеющую местную неровность высоты  $-\Delta$

где  $i$  и  $i'$  — угол падения луча и соответствующий ему угол преломления на пограничной плоскости.

После подстановки и преобразований получим

$$\Delta_g = -\Delta (n_1 \cos i - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}). \quad (V.17)$$

Для коэффициента  $g$  найдем

$$g_i = -\frac{1}{n_1 \cos i - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}}, \quad (V.18)$$

где  $i$  — угол падения осевого луча на наклонную плоскость.

Для поверхностей разных типов коэффициент  $g$  имеет различную величину и вычисляется по несколько отличающимся формулам:

для преломляющей поверхности, граничащей с воздухом ( $n_1 = 1$ ;  $n_2 = n$ ),

$$g_{ni} = -\frac{1}{\cos i - \sqrt{n^2 - \sin^2 i}}; \quad (V.18a)$$

для внутренней отражающей поверхности ( $n_1 = -n_2 = n$ )

$$g_{oni} = -\frac{1}{2n \cos i}; \quad (\text{V.18б})$$

для наружной отражающей поверхности ( $n = 1$ )

$$g_{oi} = -\frac{1}{2 \cos i}. \quad (\text{V.18в})$$

Для тех же типов поверхностей, но перпендикулярных оси пучка из формул (V.18а), (V.18б) и (V.18в) получаются формулы (V.9а), (V.9б) и (V.9в).

В табл. 10 и на рис. 76 приведены абсолютные величины коэффициентов  $g_{ni}$ ,  $g_{oni}$  и  $g_{oi}$  для углов падения  $i$  от 0 до  $90^\circ$ . Из формул (V.18), (V.18а)—(V.18в) видно, что и для наклонных оптических поверхностей сохраняется прямая пропорциональность между

их погрешностями и деформацией выходящего волнового фронта.

Формулы (V.8), (V.10) и (V.13) для расчета допусков на микронеровности, на цилиндричность и

на местные ошибки поверхностей сохраняют свой вид и для наклонных поверхностей, но коэффициент  $g_i$  следует подставлять из формулы (V.18) в соответствии с типом поверхности и углом падения осевого луча.

В дальнейшем полагаем, что пучок световых лучей имеет малый апертурный угол, т. е. является почти параллельным, а сечение пучка круглое. Рабочий участок наклонной поверхности при этих условиях будет эллип-

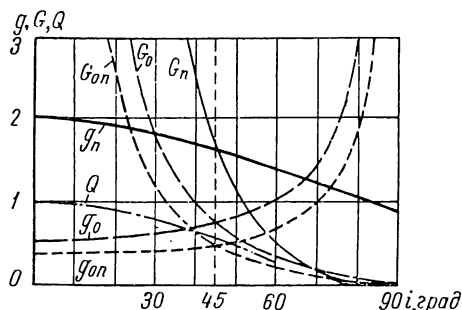


Рис. 76. График зависимости коэффициентов  $g$ ,  $G$  и  $Q$  от угла наклона  $i$  для оптических поверхностей различных типов

тической формы с длиной малой оси  $l_{\min}$  и длиной большой оси  $l_{\max}$ . Если ось, вокруг которой наклонена оптическая поверхность, перпендикулярна оси рабочего пучка, то  $l_{\min} = d$ , а  $l_{\max} = d/\cos i$ , где  $d$  — диаметр рабочего сечения.

Таблица 10

Коэффициенты для расчета допусков в зависимости от угла наклона поверхностей и деталей

Коэффициенты $g, G, Q$	Величина угла наклона $i$ в град				
	0	30	45	60	90
$g_n$	2,0	1,8	1,6	1,4	0,9
$g_o$	0,5	0,6	0,7	1,0	$\infty$
$g_{on}$	0,3	0,4	0,5	0,7	$\infty$
$G_n$	$\infty$	5,4	1,6	0,5	0
$G_o$	$\infty$	1,7	0,7	0,3	0
$G_{on}$	$\infty$	1,2	0,5	0,2	0
$Q$	1,0	0,8	0,6	0,3	—

Величина допуска на цилиндричность в числе полос  $\Delta N_{\text{дон}}$  по формуле (V.11) в пределах рабочего участка эллиптической формы и для наклонной поверхности не зависит от направления оси цилиндра. Если же допуск выражать не числом полос  $\Delta N_{\text{дон}}$  а величиной наименьшего допустимого радиуса кривизны цилиндрической поверхности, то допуск будет зависеть от направления ее главных сечений: он получится наиболее строгим, когда ось цилиндра параллельна короткой оси  $l_{\text{min}}$  рабочего участка, и наименее строгим, когда ось цилиндра совпадает с длинной осью  $l_{\text{max}}$ ; в остальных случаях допуск имеет промежуточную величину. Это следует иметь в виду при определении допуска  $\Delta N$  в пределах светового размера поверхности по формуле (V.13).

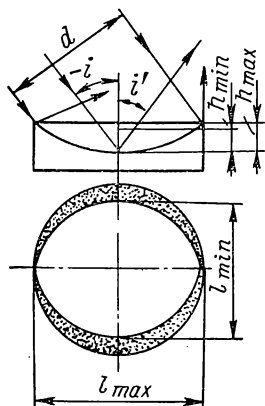


Рис. 77. Астигматизм при отражении от наклонной сферической поверхности

Другой причиной возникновения астигматизма в изображении точки является сферичность наклонной поверхности. Разность стрелок прогиба выходящего волнового фронта в пределах рабочего пучка лучей (рис. 77)

$$\Delta h_s = \frac{\mu h}{g_i} = \frac{h_{\text{max}} - h_{\text{min}}}{g_i}. \quad (\text{V.19})$$

Наибольшая  $h_{\text{max}}$  и наименьшая  $h_{\text{min}}$  стрелки прогиба сферической поверхности относятся как квадраты длин осей рабочего участка эллиптической формы, поэтому

$$h_{\text{max}} = h_{\text{min}} \left( \frac{l_{\text{max}}}{l_{\text{min}}} \right)^2 = h_{\text{min}} k^2. \quad (\text{V.20})$$

Выражая допуск не сферичность наклонной оптической поверхности числом полос  $N_{\text{дон}}$  вдоль малой оси рабочего участка, из формулы (V.19) с учетом формулы (V.20) для общего случая получим

$$N_{\text{дон}} = \frac{g_i}{k^2 - 1} (\Delta N_s)_{\text{дон}}, \quad (\text{V.21})$$

где  $(\Delta N_s)_{\text{дон}}$  — допуск на астигматизм выходящего волнового фронта, выраженный числом полудлин волны света, используемого для освещения при контроле поверхности пробным стеклом. Для визуальных систем величина допуска  $(\Delta N_s)_{\text{дон}}$ , как и в формуле (V.11), не может превосходить 0,35 полосы.

В некоторых случаях, например в спектральных призмах с автоколлимационным ходом лучей, в призме Дове, перед поверхностью, для которой рассчитывается допуск, расположена наклонная преломляющая плоскость (рис. 78). Коэффициент анаморфозы  $k_a$  последней равен

$$k_a = \frac{l_n}{d} = \frac{\cos i'_n}{\cos i_n},$$

где  $i_n$  и  $i'_n$  — угол падения и угол преломления луча на наклонной плоскости;

$d$  и  $l_n$  — ширина сечения падающего и преломленного пучка. Длина большой оси  $l_{\max}$  рабочего участка отражающей плоскости, для которой определяется допуск  $N$ , равна  $l_{\max} = l_n / \cos i$ ,

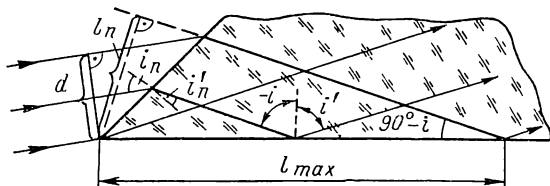


Рис. 78. К определению коэффициента анаморфозы наклонной преломляющей плоскости

где  $i$  — угол падения луча на эту плоскость. Длина малой оси рабочего участка  $l_{\min} = d$ , поэтому отношение его осей

$$k = \frac{l_{\max}}{l_{\min}} = \frac{l_n}{d \cos i} = \frac{k_a}{\cos i}.$$

Применительно к данному случаю формулу (V.51) приведем к виду

$$N_{\partial on} = \frac{g_i}{(k_a / \cos i)^2 - 1} (\Delta N_s)_{\partial on}. \quad (V.22)$$

Когда преломляющая плоскость перпендикулярна оси падающего пучка лучей ( $i_n = 0$ ,  $k_a = 1$ ), а также в случае зеркала с наружным отражением ( $k_a = 1$ ) формула (V.22) упрощается:

$$N_{\partial on} = \frac{g_i}{\tan^2 i} (\Delta N_s)_{\partial on} = G_i (\Delta N_s)_{\partial on}, \quad (V.23)$$

где  $G_i$  — коэффициент, связывающий в указанных частных случаях сферичность поверхности с возникающим астигматизмом.

Для наклонного плоскопараллельного зеркала с внутренним отражением ( $i = i'_n$ ) из формулы (V.22) получим несколько отличающееся выражение

$$N_{\partial on} = \frac{g_i}{\tan^2 i_n} (\Delta N_s)_{\partial on}, \quad (V.24)$$

где  $i_n$  — угол падения луча на преломляющую поверхность пластинки.

Согласно ГОСТу 10732—64 допуск на сферичность в числе полюсов  $N$  для некруглых деталей следует относить к наименьшему световому размеру  $l_{cs \min}$ . В пределах указанного размера допуск  $N$  определяется по формуле

$$N = N_{\partial on} \left( \frac{l_{cs \min}}{d} \right)^2. \quad (V.25)$$

Заметим, что астигматизм за счет цилиндричности у наклонных поверхностей частично или даже полностью может компенсироваться астигматизмом за счет сферичности, поскольку направление оси цилиндра при наличии первой ошибки может иметь любую ориентировку. Такая взаимокompенсация может случайно получиться в процессе изготовления оптической детали, а при сборке до некоторой степени ею можно управлять, вращая наклонное зеркало вокруг его нормали.

Допустимую клиновидность наклонных пластинок и разверток призм можно найти из формулы (V.14a), введя коэффициент  $Q$ , который учитывает влияние угла  $i$  наклона входной грани к оси пучка; в результате получим

$$\theta_i = Q\theta = Q \frac{(\Delta\delta_{FC})_{\partial on v}}{n_D - 1} \cdot \frac{d'_p}{d}. \quad (V.26)$$

Коэффициент  $Q$  равен

$$\begin{aligned} Q &\approx (n_D - 1) (\sqrt{n_D^2 + (n_D^2 - 1) \operatorname{tg}^2 i} - 1)^{-1} \approx \\ &\approx \left(1 + \frac{n_D + 1}{2n_D} \operatorname{tg}^2 i\right)^{-1}. \end{aligned} \quad (V.27)$$

В табл. 10 и на рис. 76 приведены величины коэффициента  $Q$ , а также величины коэффициента  $G_i$ , входящего в формулу (V.23), для всех типов наклонных поверхностей — преломляющей ( $G_n$ ), наружной отражающей ( $G_o$ ) и внутренней отражающей ( $G_{on}$ ).

Из рис. 76 и из данных табл. 10 видна общая зависимость требований к оптическим поверхностям разных типов и к преломляющим пластинкам от их угла наклона к оптической оси системы.

1. Требования в отношении цилиндричности и местных ошибок (допустимое отклонение  $\Delta N$ ) перпендикулярных к оси наружных отражающих поверхностей в четыре раза, а внутренних отражающих поверхностей — даже в шесть раз строже, чем преломляющих поверхностей, граничащих с воздухом.

По мере возрастания угла наклона требования к указанным поверхностям изменяются неодинаково: допуски на отклонение на преломляющие поверхности (кривые  $g_n$ ) непрерывно ужесточаются (более чем вдвое при угле  $i = 90^\circ$ ), а на отражающие поверхности (кривые  $g_o$  и  $g_{on}$ ), наоборот, непрерывно расширяются вплоть до свободных при скользящем ходе ( $i = 90^\circ$ ).

2. Требования в отношении сферичности с увеличением угла  $i$  наклона плоских преломляющих и отражающих поверхностей быстро и непрерывно растут от свободных (при  $i = 0$ , когда  $G_n = G_o = G_{on} = \infty$ ) до нуля (при  $i = 90^\circ$ , когда  $G_n = G_o = G_{on} = 0$ ). При  $i = 45^\circ$  коэффициенты  $g$  и  $G$  для поверхностей данного типа равны друг другу.

3. Допуск на клиновидность пластинок и разверток призм с ростом их угла наклона непрерывно ужесточается (кривая  $Q$ ).

Допуски для типовых оптических узлов

Оптические системы и узлы	Класс точности пробных стекол по ГОСТу 2786—62	Допуски под пробное стекло в числе полос		Допуски на отклонение толщины линз в мм	Допуски на децентрировку линз в мм	Категория по $n_D$ и по $(n_F - n_C)$ по ГОСТу 3514—57
		N	$\Delta N$			
Микроскопы	Объективы <sup>1</sup> Окуляры	1—2	0,1—0,3	0,01—0,05	0,003—0,005	1—2
		3	0,3—0,5	0,1	0,01—0,05	3—4
Фотообъективы и проекционные объективы	Линзы объективов Светофильтры	1—2	0,1—0,5	0,05—0,3	0,005—0,2	1—2
		3	0,5—1	—	—	—
Телескопические системы	Линзы объективов Линзы оборачивающих систем	1—2	0,3—0,5	0,1—0,3	0,01—0,05	1—2
		2	0,3—0,5	0,2—0,3	0,02—0,1	2—3
	Коллективы	3	0,5—1	0,2—0,5	0,05—0,2	4
	Линзы окуляров	2—3	0,3—0,5	0,1—0,3	0,01—0,1	3—4
	Светофильтры	3	1—3	—	—	—
	Сетки и шкалы	—	2—5	—	—	—

<sup>1</sup> Для апохроматов особо высокого качества следует назначать 1-й класс точности пробных стекол, задавать  $N$  и  $\Delta N$  не более 0,05 полосы и производить перерасчет системы на плавки стекол.



Использование приведенных формул, графика или табл. 10 позволяет весьма просто решать разнообразные задачи по расчету допусков на оптические детали. Для ориентировки в табл. 11 и 12 приведены примерные величины допусков на типовые линзовые и призмённые детали некоторых оптических систем.

Т а б л и ц а 12

**Допуски на отражающие плоскости и на углы  
для типовых зеркально-призмённых систем**

Группы призм	Допуски под пробное стекло в числе полос		Наименьший допуск на отдельные углы	Примеры призм по группам точности
	$N$	$\Delta N$		
Высокой точности	0,2—0,5	0,05—0,2	1—5"	Все призмы с крышей, куб-призмы
Средней точности	0,5—2	0,2—0,5	2—5'	Головные призмы визиров, призмы биноклей
Низкой точности	5—10	1—2	10—15'	Смотровые призмы

## 20. Решение типовых задач по расчету допусков на оптические детали и узлы

Для задания обоснованных допусков на изготовление и сборку оптических деталей и узлов их следует вычислить с учетом всесторонних требований к прибору и в качестве окончательных допусков принять наиболее строгие из полученных величин. Необходимо при этом принимать во внимание технологические возможности производства, а также экономические соображения.

В литературе имеется много примеров расчета допусков на ошибки изготовления и юстировки оптических деталей, узлов и систем [12—13; 19; 26; 27; 30; 32; 34; 41 и др.]. В заключение решим еще некоторые типовые задачи, взятые из заводской практики.

**Задача 1.** Рассчитать допуски на изготовление головной прямоугольной призмы типа АР-90° артиллерийской стереотрубы АСТ 10×45 (деталь 2 на рис. 74) из условия, что разрешающая способность трубы должна быть не ниже  $\varepsilon'' = 6''$ . Материал призмы — оптическое стекло марки К8.

**Решение.** Для изготовления призмы необходимо указать допуски  $N_1$ ,  $\Delta N_1$  на преломляющие поверхности, допуски  $N_2$ ,  $\Delta N_2$  на отражающую грань, а также допустимую клиновидность  $\theta$  развертки призмы.

Прежде всего найдем величину волнового допуска на астигматизм для каждой преломляющей и отражающей поверхности

$(\Delta N_{\theta})_{\partial on}$  в пределах рабочего выходного зрачка. В данном случае  $d'_p = d_{з.э} = 2$  мм, так как роль выходного зрачка выполняет зрачок глаза наблюдателя. Разрешающая способность трубы при этом зрачке должна быть не ниже теоретического предела  $\epsilon''_{теор} = \frac{120''}{d_p} = \frac{120''}{2 \cdot 10} = 6''$ .

В оптической системе трубы АСТ имеется:

преломляющих рабочих поверхностей, перпендикулярных оси и граничащих с воздухом, — 14, не считая поверхностей пластинки сетки 5 (рис. 74);

внутренних отражающих поверхностей, наклоненных под углом  $i = 45^\circ$  к оси, — 4.

Астигматизм от наклонной внутренней отражающей поверхности вследствие ее цилиндричности и сферичности при  $i = 45^\circ$  в четыре раза больше, чем астигматизм из-за цилиндричности перпендикулярной к оси преломляющей поверхности (см. рис. 76 или табл. 10). Поэтому при расчете допуска в волновой мере  $(\Delta N_{\theta})_{\partial on}$  на каждую такую преломляющую поверхность следует принять, что  $m = 14 + 8 \cdot 4^2 = 142$ . Здесь учтено, то каждая наклонная поверхность имеет два источника астигматизма — цилиндричность и сферичность, и принято квадратичное суммирование отдельных ошибок.

Приняв  $(\Delta N_{\theta})_{\partial on} = 0,35$  полосы, в соответствии с формулой (V.7) получим

$$(\Delta N_{\theta})_{n.ср} = \sqrt{2} \frac{0,35}{\sqrt{142}} \approx 0,0425 \text{ полосы.}$$

Для наклонных отражающих поверхностей допуск будет вчетверо больше, т. е.

$$(\Delta N_{\theta})_{o.ср} = 0,17 \text{ полосы.}$$

По формуле (V.13) найдем:

для преломляющих граней

$$\Delta N_1 = 2 \cdot 0,0425 \left( \frac{45}{20} \right)^2 \approx 0,4 \text{ полосы.}$$

и соответственно для отражающей грани

$$\Delta N_2 = 0,5 \cdot 0,17 \left( \frac{45}{20} \right)^2 \approx 0,4 \text{ полосы.}$$

При угле наклона  $i = 45^\circ$   $g_{on} = G_{on}$ , поэтому

$$N_2 = \Delta N_2 = 0,4 \text{ полосы.}$$

Допуск  $N_1$  зададим из условия, чтобы он не превышал допуска  $\Delta N_1$  в три-четыре раза, и примем  $N_1 = 1,5$  полосы.

Клиновидность  $\theta_c$  и  $\theta_\pi$  развертки прямоугольной призмы определим из рис. 73, откуда видно, что

$$\theta_c = \delta_{45^\circ},$$

т. е. клиновидность  $\theta_c$  в главном сечении призмы равна разности острых углов.

Для клиновидности в перпендикулярном направлении получим

$$\theta_\pi = \sqrt{2} \pi,$$

т. е. она в  $\sqrt{2}$  больше величины пирамидальности развертки.

По формуле (V.14a), рассматривая каждую ошибку как самостоятельную и полагая допуск на хроматизм  $(\Delta\delta_{FC})_{\text{дон}} = 10''$ , найдем

$$\theta_c = \frac{10'' \cdot 64}{0,5163} \cdot \frac{1}{10 \cdot 60} \approx 2' = \delta_{45^\circ}.$$

Пирамидальность допустима до величины  $\pi \approx 1,5'$ .

Допуск на угол  $90^\circ$  можно задать  $\Delta_{90^\circ} = 5'$ . Окончательно на призму зададим следующие допуски:

$$N_1 = 1,5 \text{ полосы; } \Delta N_1 = 0,4 \text{ полосы;}$$

$$N_2 = 0,4 \text{ полосы; } \Delta N_2 = 0,4 \text{ полосы;}$$

$$\delta_{45^\circ} = 2'; \quad \Delta_{90^\circ} = 5' \text{ и } \pi = 1,5'.$$

**Задача 2.** Рассчитать допуски на изготовление поворотной плоскопараллельной пластинки, которая стоит перед отсчетной

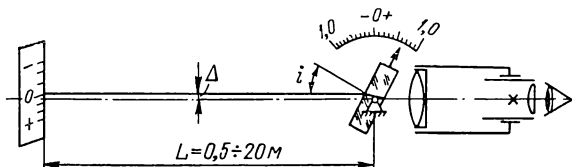


Рис. 79. Отсчетная труба с поворотной пластинкой

трубой и используется в качестве микрометра для считывания долей делений миллиметровой шкалы (рис. 79). Диаметр входного зрачка трубы  $d_p = 60 \text{ мм}$ , увеличение  $\Gamma = 30\times$ . Расстояние  $L$  от трубы до шкалы в процессе измерения может изменяться в пределах от  $0,5$  до  $20 \text{ м}$ , точность отсчета по шкале должна быть не ниже  $\pm 0,05 \text{ мм}$  при любом расстоянии до нее. Пластинка микрометра смещает визирный луч параллельно себе на  $\Delta = \pm 1,00 \text{ мм}$  при повороте от нулевого положения на угол  $i = \pm 30^\circ$ . Материал пластинки — оптическое стекло К8.

**Решение.** Для изготовления пластинки необходимо указать допуски,  $N$ ,  $\Delta N$  и  $\theta$ .

Очевидно, что наиболее жесткие требования к пластинке получатся для наибольшего угла ее поворота  $i = \pm 30^\circ$ . По формулам (V.13), (V.18a), (V.21) и (V.14a) найдем

$$\Delta N = 0,15 \text{ полосы; } N = 0,5 \text{ полосы; } \theta = 1'.$$

Если главное сечение клиновидной пластинки параллельно направлению измерения, то при повороте пластинки в любую сторону возникнет дополнительное отклонение визирного луча всегда в сторону основания клина; в соответствии с формулой (III.74в) приращение угла отклонения луча клином

$$\Delta \delta_i = \frac{n^2 - 1}{2n} \theta \operatorname{tg}^2 i, \quad (\text{V.28})$$

а ошибка на шкале составит  $\delta \Delta = L \Delta \delta_i$ .

Ограничивая наибольшую допустимую ошибку величиной  $\pm 0,05 \text{ мм}$ , получим значительно более строгий допуск на клиновидность поворотной пластинки  $\theta = 3''$ . Окончательно зададим следующие допуски:

$$N = 0,5 \text{ полосы; } \Delta N = 0,15 \text{ полосы; } \theta = 3''.$$

Если предусмотреть возможность юстировки пластинки — разворот ее в оправе, то главное сечение клина можно установить вдоль оси поворота пластинки и тогда ее клиновидность не влияла бы на точность отсчета; при этом условии допуск на клиновидность можно было бы расширить до  $1'$ .

**Задача 3.** Рассчитать допуски на децентрировку линз окуляра увеличения  $\Gamma = 10^\times$ , который используется в комплекте сменных окуляров бинокулярного микроскопа. Конструкция окуляра и его оптическая схема приведены на рис. 80, а, б. Фокусное расстояние коллектива  $l$  равно  $f'_1 = 39,3 \text{ мм}$ , глазной линзы  $2$  —  $f'_2 = 19,8 \text{ мм}$ , расстояние между их главными плоскостями  $d = 27,9 \text{ мм}$ .

**Решение.** Децентрировка линз окуляра в бинокулярном приборе вызывает непараллельность осей пучков лучей, выходящих из одной и той же точки предмета. Допуск на непараллельность осей пучков в направлении, перпендикулярном главному базису, не превышает  $15'$ ; поэтому допуск на непараллельность оси выходящего пучка для точки в центре поля зрения по отношению к геометрической оси корпуса 3 окуляра составит не более  $\vartheta = 7,5'$  или  $\vartheta = 0,002 \text{ рад}$ .

Непараллельность оптической оси окуляра вызывают поперечные сдвиги глазной линзы  $e_2$  и коллектива  $e_1$ . Из рис. 80, в, г найдем

$$\vartheta_2 = \frac{e_2}{f'_2}$$

и соответственно

$$\vartheta_1 = \frac{e_1}{f'_2} \cdot \frac{d - f'_2}{f'_1}.$$

Видно, что децентрировка коллектива 1 влияет меньше, чем глазной линзы 2. Для окуляра  $\Gamma = 10^\times$ , например, при  $\vartheta_1 = \vartheta_2$  получится  $e_1 \approx 4,8e_2$ . Предельно допустимые сдвиги центров линз с геометрической оси корпуса окуляра соответственно будут:  $e_2 < 0,04$  мм;  $e_1 < 0,2$  мм.

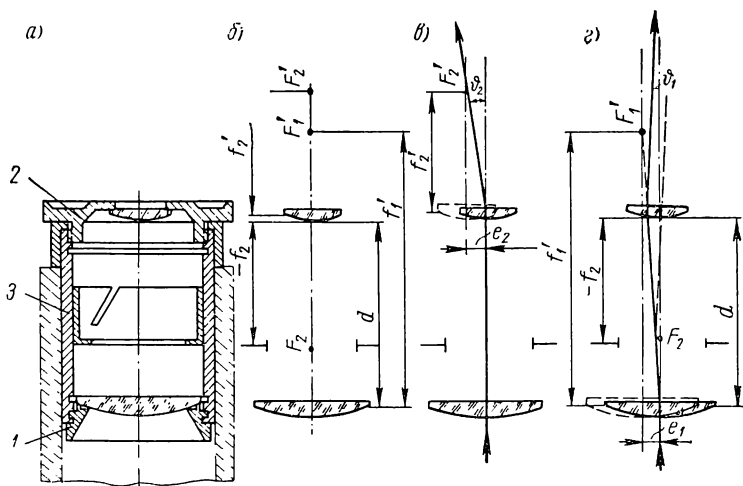


Рис. 80. Влияние децентрировки глазной и коллективной линзы на ход лучей через окуляр

Полученные формулы и числовые величины позволяют определять допуски на децентрировку линз, на несоосность расточки посадочных мест под линзы по отношению к резьбе оправ, а также на несоосность резьб в корпусе 3 окуляра по отношению к оси его наружной поверхности и т. д. Как видно из расчета, все эти допуски, особенно для глазной линзы, получаются трудновыполнимыми в серийном производстве. При сборке окуляров для бинокулярных микроскопов приходится применять селективный подбор узлов с контролем биения выходящих пучков по отношению к оси корпуса окуляра.

**Задача 4.** Поворотная система трех плоских зеркал 1, 2 и 3 используется<sup>1</sup> для вращения изображения солнечного диска в плоскости неподвижной щели Ш, совпадающей с фокусом объ-

<sup>1</sup> Е. Т. Антропов. Применение зеркальной системы прямого зрения в спектроскопии. — «Приборы и техника эксперимента», 1961, № 5, стр. 193—194.

ектива  $O$  (рис. 81, а). При этом требуется, чтобы диаметрально сечение солнечного диска всегда совпадало с серединой щели  $\mathcal{W}$  с точностью не ниже  $\pm 0,01$  мм.

Необходимо рассмотреть влияние ошибок изготовления и юстировки поворотной зеркальной системы на выполнение указанного требования и обосновать соответствующие допуски. Конструктивные данные схемы приведены на рис. 81, а.

*Решение.* Система трех зеркал 1, 2 и 3, когда их нормали компланарны и углы  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_{23}$  между зеркалами 1, 2 и 3 равны

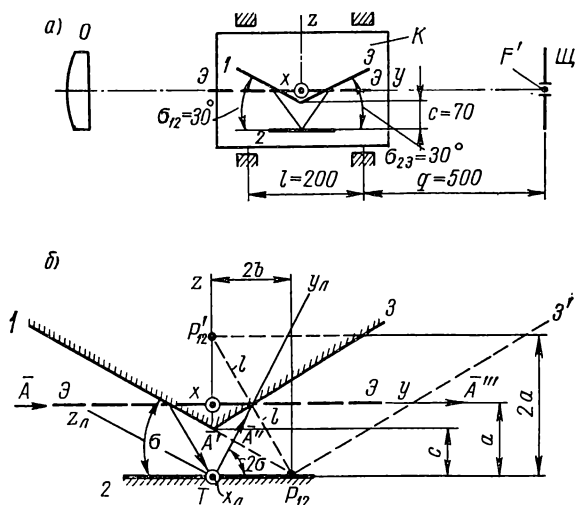


Рис. 81. Влияние ошибок поворотной системы трех плоских зеркал на положение изображения

друг другу по величине (в нашем случае  $\sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma = 30^\circ$ ), приводится к эквивалентному плоскому зеркалу  $\mathcal{E}\mathcal{E}$ , параллельному среднему зеркалу 2 (рис. 81, б), в сочетании с перпендикулярным ему зеркальным ромбом, т. е. эта система эквивалентна зеркальной системе класса А + Б-0 (см. табл. 9). Нормали эквивалентной системы компланарны нормальям исходной системы зеркал. Приведение зеркал 1, 2, 3 к эквивалентной системе сделано в соответствии с рис. 53, в связи с чем на рис. 81, б сохранены прежние обозначения.

Расстояние  $a$  между зеркалом 2 и эквивалентным зеркалом  $\mathcal{E}\mathcal{E}$ , а также толщину ромба  $b$  найдем из рис. 81, б, откуда

$$a = 2c \cos^2 \sigma \quad (\text{V.29})$$

и соответственно

$$b = c \sin 2\sigma, \quad (\text{V.30})$$

где  $c$  — расстояние от зеркала 2 до ребра зеркал 1, 3.

Если зеркало 2 сдвинуть вдоль его нормали на величину  $\Delta c$ , то расстояние от него до эквивалентного зеркала ЭЭ изменится на величину

$$\Delta a = 2\Delta c \cos^2 \sigma, \quad (V.31)$$

которая всегда больше величины  $\Delta c$ , если угол  $\sigma$  меньше  $38^\circ$ . Таким образом, эквивалентное зеркало ЭЭ в данном случае ( $\sigma = 30^\circ$ ) сдвигается в сторону, противоположную сдвигу зеркала 2. Следовательно, сдвигом зеркала 2 вдоль его нормали можно изменять положение плоскости эквивалентного зеркала ЭЭ по отношению к оси вращения корпуса  $K$  зеркальной системы (рис. 81, а). При этом одновременно изображение солнечного диска сместится вдоль оси на величину

$$2\Delta b = 2\Delta c \sin 2\sigma, \quad (V.32)$$

что вызовет такой же величины расфокусировку.

Следовательно, сдвиг зеркала 2 вдоль его нормали на расстояние  $\Delta c$  вызовет параллельный сдвиг выходящего осевого луча величины  $2\Delta a = 4\Delta c \cos^2 \sigma$  и расфокусировку изображения величины  $2\Delta b = 2\Delta c \sin 2\sigma$ . При  $\sigma = 30^\circ$   $2\Delta a = 3\Delta c$  и  $2\Delta b = \sqrt{3} \Delta c$ . Такими параллельными сдвигами зеркала 2 можно совместить плоскость эквивалентного зеркала ЭЭ с осью вращения оправы  $K$ .

Теперь рассмотрим повороты зеркала 2 вокруг оси  $x$  на угол  $\alpha_2$  и вокруг оси  $y$  на малый угол  $\beta_2$ .

При повороте зеркала 2 на угол  $\alpha_2$  луч  $\bar{A}''$  отклонится от своего номинального направления в ту же сторону на угол  $2\alpha_2$ , а луч  $\bar{A}'''$  — на угол  $2\alpha_2$  в противоположном направлении (рис. 81, б). Эквивалентное зеркало ЭЭ при этом повернется вокруг оси  $x$  тоже на угол  $\alpha_2$ , но против направления поворота зеркала 2. Следовательно, наклонами зеркала 2 вокруг оси  $x$  можно установить эквивалентное зеркало ЭЭ системы параллельно оси вращения корпуса  $K$ .

При рассмотрении поворота зеркала 2 вокруг оси  $y$  предположим, что он происходит около точки падения  $T$  осевого луча на это зеркало. При этом условии отраженный от зеркала 2 луч  $\bar{A}''$  будет лишь вращаться вокруг точки  $T$ , отклоняясь на угол  $\gamma''$  в сторону и на угол  $\alpha''$  вверх. Величину обоих углов отклонения найдем из матричного выражения вида

$$\bar{A}''_A = S_A M' \bar{A}'_A. \quad (V.33)$$

Орт  $\bar{A}''_A$  получится сразу в системе осей  $x_A y_A z_A$ , ось  $y_A$  которой совпадает с направлением луча  $\bar{A}''$ , отраженного от зеркала 2 в его исходном положении, а ось  $x_A$  параллельна оси  $x$  неподвижной координатной системы  $x y z$ .

Для матрицы  $S_\lambda$  поворота системы координат из рис. 81, б найдем

$$S_\lambda = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\sigma & \sin 2\sigma \\ 0 & -\sin 2\sigma & \cos 2\sigma \end{pmatrix}.$$

Для орта  $\bar{A}'$  направления падающего луча и для орта  $\bar{N}_2$  нормали повернутого на угол  $\beta_2$  зеркала 2 напишем

$$\bar{A}' = \cos 2\sigma \bar{j} - \sin 2\sigma \bar{k}; \quad \bar{N}_2 = \sin \beta_2 \bar{i} + \cos \beta_2 \bar{k}.$$

Подстановкой матриц в формулу (V.33) после преобразований получим в общем виде

$$\bar{A}_\lambda'' = \begin{pmatrix} -m_{13} \sin 2\sigma \\ m_{22} \cos^2 2\sigma - m_{33} \sin^2 2\sigma \\ -(m_{22} + m_{33}) \frac{1}{2} \sin 4\sigma \end{pmatrix}. \quad (\text{V.33a})$$

Здесь уже учтено, что элементы  $m_{12} = m_{23} = m_{32} = 0$ , так как  $N_{2y} = 0$ . Подставляя элементы матрицы  $M'$  из формулы (III.20), с точностью до малых величин 2-го порядка окончательно найдем

$$\bar{A}_\lambda'' \approx \begin{pmatrix} 2\beta_2 \sin 2\sigma \\ 1 - 2\beta_2^2 \sin^2 2\sigma \\ -\beta_2^2 \sin 4\sigma \end{pmatrix}. \quad (\text{V.33б})$$

Первая строка равна углу бокового отклонения  $\gamma''$  выходящего луча  $\bar{A}_\lambda''$ , третья строка — углу его отклонения по высоте  $\alpha''$ . Учтя отражение этого луча от зеркала 3, заключаем, что поворот зеркала 2 на малый угол  $\beta_2$  вокруг оси  $y$  против часовой стрелки отклоняет выходящий из системы зеркал луч  $\bar{A}''$  влево на угол  $\gamma'' = 2\beta_2 \sin 2\sigma$  и вверх на весьма малый угол  $\alpha'' = \beta_2^2 \sin 4\sigma$ . При  $\sigma = 30^\circ$   $\gamma'' = \sqrt{3} \beta_2$  и  $\alpha'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \beta_2^2$ . Изображение солнечного диска при этом сместится в плоскости щели влево на расстояние  $\sqrt{3} \left( q + \frac{l}{2} \right) \beta_2$  мм. Кроме того, появится небольшой величины поворот изображения.

Перейдем к окончательным выводам и расчетам. Итак, поворотная система зеркал 1, 2, 3 эквивалентна системе класса А + + Б-0 (когда угол  $\beta_2 = 0$ ) в сочетании с зеркальным ромбом толщины  $b = c \sin 2\sigma = 70 \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 60$  мм. Вследствие ошибок опор, например за счет биения шарикоподшипников, ось вращения корпуса  $K$  не будет стабильной. При наклоне этой оси в плоскости



эквивалентного зеркала ЭЭ на малый угол  $\theta$  появится сдвиг изображения величины  $\Delta = 2b\theta$  только за счет толщины  $b$  ромба. При наклоне оси в перпендикулярном направлении появится дополнительный сдвиг изображения за счет поворота самого зеркала ЭЭ, в результате чего суммарная ошибка достигнет наибольшей возможной величины  $\Delta_{\max} = (2q + l + 2b) \theta$ , где  $\left(q + \frac{l}{2}\right)$  — расстояние от плоскости щели Щ до средней точки корпуса К.

Допустимый угол наклона оси вращения корпуса К в нашем случае составит  $\theta_{\text{дон}}'' = \frac{\Delta_{\text{дон}} \cdot 2 \cdot 10^5}{2 \left(q + b + \frac{l}{2}\right)} = \frac{\pm 0,01 \cdot 2 \cdot 10^5}{2(500 + 60 + 100)} \approx 1,5''$ .

Ошибки юстировки также вызовут биение изображения. Основное условие правильной работы оптической системы состоит в том, чтобы все ее оси совпадали друг с другом. Если принять за основную конструкторскую базу установки ось вращения корпуса К, то с этой осью необходимо совместить оптическую ось объектива О, центр щели Щ и плоскость эквивалентного зеркала ЭЭ системы зеркал 1, 2 и 3. Биения центра изображения солнечного диска не будет и в том случае, когда этот центр и след продолженного эквивалентного зеркала ЭЭ пересекаются со следом оси вращения корпуса К в общей точке фокальной плоскости объектива О (рис. 81, а). Но при этом будет н а к л о н плоскости изображения, т. е. непараллельность плоскости изображения по отношению к плоскости щели.

Сдвиг следа зеркала ЭЭ от следа оси вращения вызывает учетверенной величины биение изображения диска Солнца, поэтому допуск на эту ошибку составит не более 0,005 мм при условии, что она будет располовинена. Устранить указанную ошибку можно сдвигами или наклонами эквивалентного зеркала.

Пирамидальность системы зеркал 1, 2, 3, возникающую за счет разворота зеркала 2 вокруг оси  $y$  на угол  $\beta_2$ , можно компенсировать при юстировке наклонами эквивалентного ромба в плоскости эквивалентного зеркала ЭЭ. При этом достигается равенство ошибок  $\left(q + \frac{l}{2}\right) \beta_2 \sin 2\sigma = b\theta$ .

# СБОРКА И ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ УЗЛОВ И ПРИБОРОВ

## Глава VI

### ЮСТИРОВКА ТИПОВЫХ УЗЛОВ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

#### 21. Сборка объективов зрительных труб, микроскопов и фотоаппаратов

**Типы объективов, требования к ним.** Объективы в оптических приборах выполняют важнейшую задачу: они создают обусловленного качества изображение плоскости предметов в пределах заданного угла (при бесконечно удаленной плоскости предметов) или в пределах участка заданного размера (при конечном расстоянии до плоскости предметов). В зависимости от назначения объективов к ним предъявляются различные требования.

Объективы зрительных труб должны давать изображение первоклассного качества в центре поля и удовлетворительное — на его краях в пределах небольшого угла поля зрения, достигающего  $5\text{--}10^\circ$ , редко  $15^\circ$ , и при не очень большом относительном отверстии — от  $1:10$  до  $1:4$ , редко до  $1:3$ .

Объективы микроскопов должны образовывать почти идеальное по качеству увеличенное изображение объекта в пределах сравнительно небольшого линейного поля зрения окуляра, составляющего  $10\text{--}20$  мм по диаметру. Объективы микроскопов имеют большую переднюю числовую апертуру, достигающую  $0,2$  у слабых объективов,  $0,65$  — у средних и  $1,25$  и даже  $1,40$  — у сильных объективов, и соответственно большое линейное увеличение от нескольких единиц до ста и более крат.

Фото- и кинообъективы характеризуются большим полем изображения, которое должно быть плоским. Поле зрения обычных и светосильных объективов составляет  $30\text{--}60^\circ$ , у широкоугольных объективов оно доходит до  $90\text{--}120^\circ$  и более. Качество изображения точек предметов при этих условиях даже в центре поля у фотообъективов не получается очень высоким.

Различие требований приводит и к различным конструкциям объективов. Наиболее просты объективы зрительных труб, которые обычно состоят всего из двух линз. Объективы микроскопов

имеют более сложную систему— состоят из четырех—шести и большего числа линз. Фото- и кинообъективы конструктивно также сложны: самые простые состоят из трех линз (триплеты), объективы средней сложности — из четырех—семи линз, а современные киносьемочные объективы с переменным фокусным расстоянием иногда имеют до восемнадцати линз.

Вместе с усложнением оптической системы объективов усложняется их сборка. Основное требование, выполняемое при сборке объективов, заключается в том, чтобы получить необходимое качество изображения на оси и в пределах всего заданного поля зрения. Однако выполнение этого требования зависит также от качества материала и от точности изготовления оптических деталей. Оптические материалы имеют отклонение показателей преломления и дисперсии от стандартных табличных величин, которые были приняты при расчете оптической системы объектива, а также такие дефекты, как натяжения, свили и другие неоднородности. К ним добавляются погрешности изготовления: отклонение радиусов кривизны поверхностей от расчетных величин, несферичность поверхностей, отклонение толщины линзы по оси от заданной величины, децентрировка линз. В результате погрешностей и дефектов сборки объектива линзы могут быть деформированы, децентрированы и смещены вдоль оси из расчетного положения. Таким образом, каждая линза может иметь до полутора десятков первичных ошибок, влияющих на качество объектива. Складываясь, эти ошибки могут недопустимо испортить качество изображения и даже изменить оптические характеристики объектива: фокусное расстояние, задний отрезок и др.

При сборке объективов возможна частичная компенсация отклонений оптических характеристик материалов и некоторых погрешностей изготовления линз. Для компенсации децентрировки линз используют различные приемы. При склеивании линзы центрируют, совмещая их оптические оси взаимными сдвигами по поверхности склейки и контролируя центровку автоколлимационной трубкой.

При завальцовке линз в оправы их или точно центрируют перед закреплением (при сборке объективов свинчиваемой конструкции), или закрепляют без центрировки, после чего обрабатывают результативно сборочные базы оправ относительно оптической оси линзы для обеспечения центрировки линз (при сборке объективов насыпной конструкции).

Для компенсации отклонений толщины линз и показателей преломления материалов изменяют по расчету один или два воздушных промежутка между линзами. Линзы объективов сложных систем подают на сборку комплектами с приложением индивидуального паспорта, где и указывают пересчитанные воздушные промежутки. Для комплектации линз пользуются специальными таблицами, в которых вычислены влияния малых отклонений оп-

тических констант стекол и конструктивных параметров системы (толщин линз, воздушных промежутков и др.) на абберации и на некоторые характеристики объектива (фокусное расстояние, задний отрезок и т. д.). Одна из таких таблиц приведена в статье И. А. Шошина [52].

В особо ответственных случаях оптическую систему объектива приходится пересчитывать на минимум аббераций с учетом действительных отклонений компонентов. Применяется также индивидуальная сборка сложных объективов с пригонкой воздушных промежутков между линзами по результатам измерений полевых аббераций на оптической скамье [64].

Допуски на децентрировку линз составляют от нескольких сотых долей миллиметра до 0,01 мм и меньше. Допуски на воздушные промежутки задаются в зависимости от их величины: для больших промежутков эти допуски грубее (составляют десятые доли миллиметра), для малых — строже (не превышают сотых, а иногда и тысячных долей миллиметра).

В конструкциях объективов, как правило, не предусматривается никаких юстировочных регулировок. В объективах насыпной конструкции можно лишь взаимно поворачивать оправы с линзами вокруг оптической оси. В микрообъективах допускается, кроме того, установка прокладных колец между оправами линз для изменения воздушных промежутков, а также предусмотрена поперечная регулировка одной из линз с оправой, например менисковой линзы 3 в объективе  $90 \times 1,25$  (рис. 85).

Технологические процессы сборки объективов построены таким образом, чтобы обеспечить наилучшую взаимную центровку оптических поверхностей системы, выдержать заданные воздушные промежутки между несклеиваемыми поверхностями и не допустить деформаций поверхностей.

Рассмотрим несколько подробнее сборку объективов основных типов.

**Сборка объективов зрительных труб.** Объективы малых и средних диаметров, как правило, склеивают, а объективы большого диаметра собирают с воздушным промежутком между линзами. Склейку объективов обычно выполняют в оптических цехах. Линзы предварительно центрируют на специальных станках, обрабатывая абразивным кругом наружную цилиндрическую поверхность линз так, чтобы их геометрическая ось с большой точностью совпадала с оптической осью. Эта цилиндрическая поверхность обычно и является сборочной базой линзы при склейке объективов или при сборке несклеиваемых объективов в оправках.

Контроль центровки линз при склейке производится или в проходящем свете, или автоколлимационным способом. В обоих случаях склеиваемую линзу надо вращать на опорном кольце, прижимая ее к боковому упору. При контроле первым способом

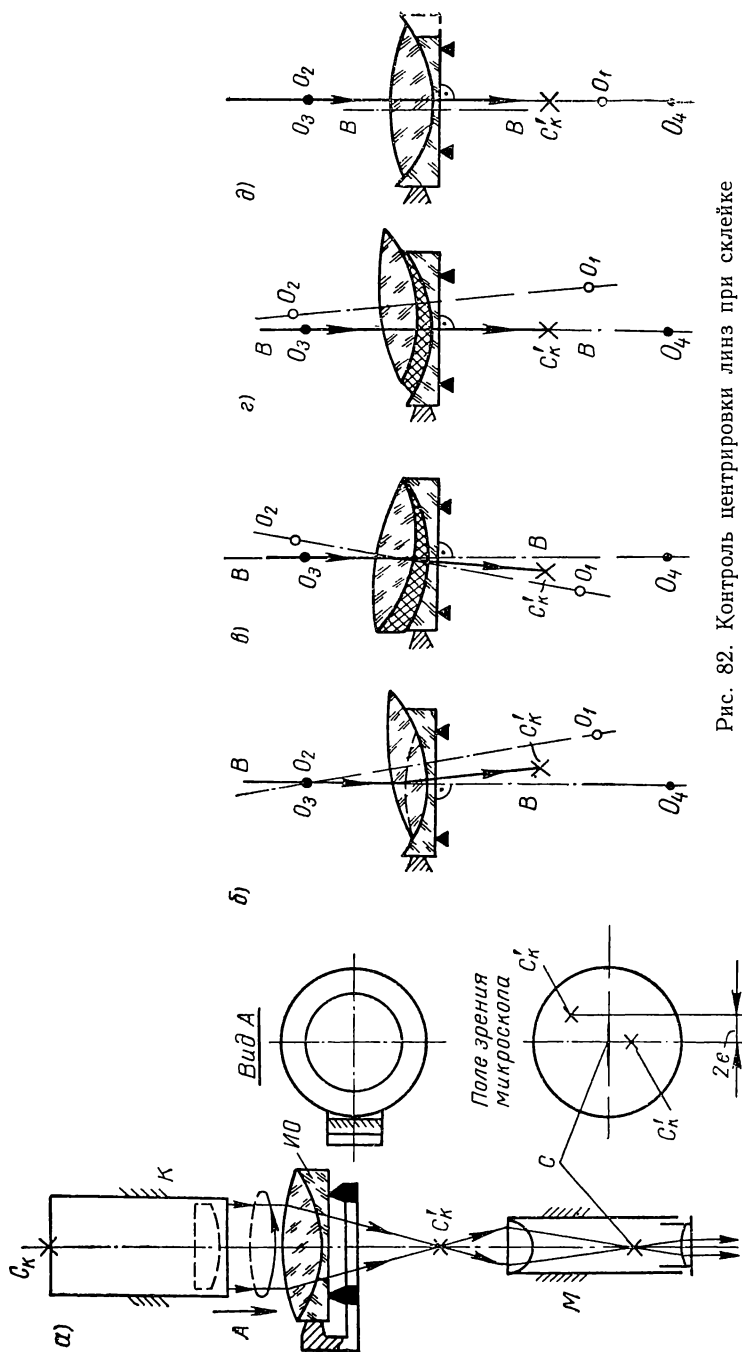


Рис. 82. Контроль центровки линз при склейке

следят за тем, чтобы изображение  $C'_k$  сетки  $C_k$  коллиматора  $K$  при вращении испытуемого объектива  $ИО$  на опорном кольце не сдвигалось относительно сетки  $C$  микроскопа  $M$  в направлении, перпендикулярном к боковому упору ножевого типа (рис. 82, а). По существу здесь контролируют, совпадает ли узловая точка системы склеиваемых линз с геометрической осью базирующей линзы, которая лежит на опорном кольце и касается бокового упора. Величина сдвига  $2e$  служит мерой децентрировки контролируемой системы.

Этот способ контроля имеет существенный недостаток, так как им контролируется не центрировка поверхностей, как это необходимо, а лишь отсутствие биения узловой точки системы линз. Если слой клея между линзами имеет клиновидность (рис. 82, в) или если базирующая линза (прижимаемая к упору) сама децентрирована (рис. 82, д), то сдвигами верхней линзы можно скомпенсировать биение изображения сетки  $C'_k$ , возникающее за счет обоих этих дефектов. На рис. 82, б, в, г показана взаимокompенсация биений за счет сдвига линзы и клиновидности слоя клея. Однако в данном случае дефекты не компенсируются взаимно, а как бы заслоняются друг другом: остаются некомпенсированными аберрации, вносимые этими дефектами, — хроматизм за счет клиновидности слоя клеящего вещества и кома как следствие опрокидывания верхней линзы на угол клина этого слоя. Качество изображения склеенной линзы будет низким, она окажется децентрированной, так как центры кривизны  $O_1$  и  $O_2$  верхней линзы не будут лежать на одной прямой, проходящей через центры кривизны  $O_3$  и  $O_4$  нижней базирующей линзы (рис. 82, г). С другой стороны, при данном способе контроля может быть забракована точно центрированная система, у которой центры всех поверхностей  $O_1 — O_4$  лежат на одной прямой, если базирующая линза получила децентрировку при обработке в оптическом цехе. В этом случае изображение сетки  $C'_k$  будет иметь биение, так как ось вращения  $ВВ$  линзы не совпадает с ее оптической осью (рис. 82, д).

Контроль вторым способом осуществляется на установке ГОИ. При этом непосредственно следят за биением автоколлимационных изображений сеток центрировочных трубок от каждой из поверхностей склеиваемого объектива по отношению к оси, проходящей через центр вращения базирующей линзы и через центр  $O_4$  поверхности, лежащей на опорном кольце (рис. 83). Наблюдается биение с помощью двух автоколлимационных центрировочных трубок, одна из которых расположена над контролируемой линзой, другая — снизу (на рисунке трубки не показаны). Вообще говоря, автоколлимационные изображения от всех поверхностей можно было бы наблюдать с помощью одной-единственной трубки, но некоторые из изображений оказались бы

плохого качества. Наилучшие автоколлимационные изображения получатся от поверхности, ближайшей к данной трубке, т. е. в верхней трубке — от верхней поверхности 1, в нижней — от нижней поверхности 4. Изображения от поверхностей 2 и 3 могут получиться в одной из трубок лучше, чем в другой.

Вращаемая линза поджимается к неподвижному упору в виде угольника. У центрированной системы автоколлимационные

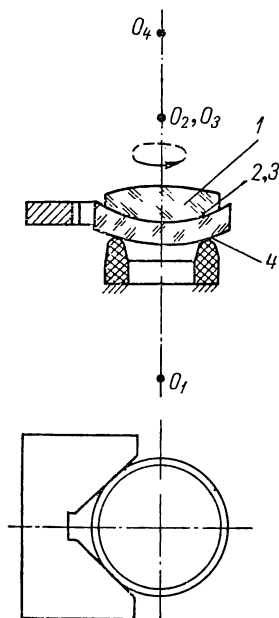


Рис. 83. Метод ГОИ для контроля децентрировки линз

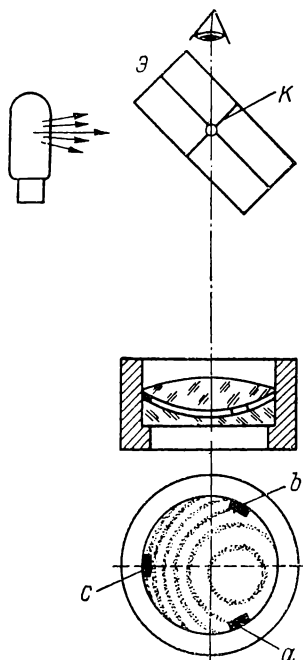


Рис. 84. Метод Максудова для контроля клиновидности воздушного слоя между линзами

изображения от центров всех поверхностей не имеют биения. Поэтому при этом способе контроля обнаруживаются и клиновидность слоя клея, и децентрировка базировочной линзы, если эти дефекты имеются.

Клиновидность воздушного промежутка между несклеиваемыми линзами дает кому на оси. Для контроля этой клиновидности удобно воспользоваться также методом Максудова (рис. 84). На систему линз в оправе, между которыми в трех точках помещены равнотолщинные прокладки *a*, *b*, *c*, направляют свет от ртутной лампы с помощью экрана *Э* из белой бумаги, а через отверстие в его центре наблюдают интерференционные кольца, возникающие в воздушном слое между линзами. Предварительно отверстие экрана помещают на ось объектива, следя за тем, чтобы

отражения креста  $K$  (центр креста совпадает с центром отверстия в экране  $\mathcal{E}$ ) от всех поверхностей линз располагались в створе. Если после этого центр колец не совпадает с центрами отражений крестов, то это значит, что воздушный промежуток имеет клиновидность. На рис. 84 толщина прокладки  $c$  слишком велика, ее следует уменьшить.

Качество изображения склеенных или собранных объективов зрительных труб окончательно определяют на коллиматорной установке по светящейся точке (искусственной звезде) или по штриховым мирам.

**Сборка микрообъективов.** Все микрообъективы должны давать первоклассное по качеству изображение, а объективы, предназначенные для микроскопов с револьверами, должны быть еще и взаимозаменяемы: при последовательном включении их в ход лучей поворотом револьверного диска изображение точки в центре поля не должно выходить за пределы полевой диафрагмы окуляра, а возникающая расфокусировка изображения не должна превышать  $\pm 10$  мм перед окуляром. Для выполнения первого требования объективы следует центрировать с точностью выше 0,04 мм независимо от их увеличения (см. пример на стр. 8), а для выполнения второго требования опорный торец корпусов объективов следует подрезать по высоте с точностью выше 0,01 мм. Иммерсионные объективы, кроме того, должны быть герметичны со стороны фронтальной линзы.

В. П. Линник и П. Д. Радченко в 1936—1937 гг. предложили способ сборки микрообъективов, позволивший значительно упростить их изготовление и одновременно повысить их качество. Этот способ был разработан применительно к объективам насыпной конструкции, как более технологичным в сборке (рис. 85).

Центрировка линзовой системы объектива обеспечивается тем, что внутреннее посадочное отверстие корпуса  $б$  растачивают по 2-му классу точности (в микрообъективах выдерживают размер  $\varnothing 13A$ ), а оправы с линзами  $1$ ,  $4$  и  $5$  обрабатывают по скользящей посадке того же класса точности (в микрообъективах —  $\varnothing 13C$ ).

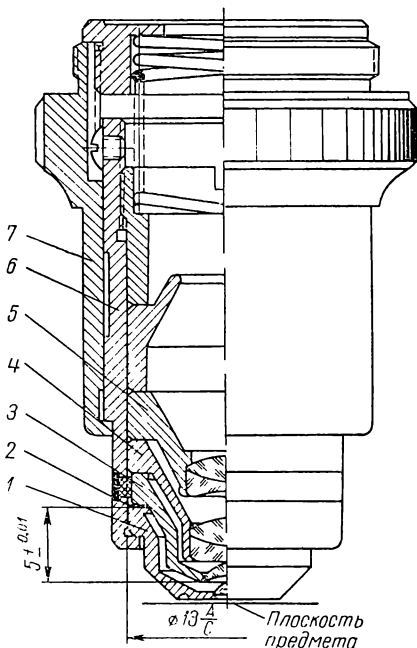


Рис. 85. Микрообъектив  $90\times 1,25$



При сборке объективов по способу Линника—Радченко линзы предварительно закрепляют без центрировки в своих оправках, имеющих припуски на обработку по всем наружным размерам. Затем оправы с линзами посредством внутренней технологической резьбы (на рисунке она отсутствует) устанавливают на специальном «плавающем» патроне, который позволяет с помощью регулировочных винтов совместить оптическую ось линзы с осью шпинделя центрировочного станка. После этого оправы окончательно обрабатывают, т. е. протачивают поверху в размер  $\varnothing 13C$  и подрезают с обеих сторон с выдерживанием заданных расстояний от опорных торцов до ближайших вершин линзы. Центрирование линзы на станке контролируют по автоколлимационным бликам от центров ее внешних поверхностей с помощью автоколлимационной трубки.

В послевоенные годы способ Линника—Радченко стали широко применять также на сборке фотообъективов насыпной конструкции (см. ниже). На сборке микрообъективов теперь преимущественно используется несколько видоизмененный процесс. Оправы линз при этом способе изготавливают по окончательным наружным размерам без внутренней технологической резьбы и оставляют припуск только на расточку посадочного отверстия под линзу. При расточке оправы в качестве установочной базы используются ее внешний диаметр  $13C$  и один из опорных торцов. Оправа закрепляется в цанговом патроне, и при расточке отверстия под линзу выдерживается с большой точностью расстояние от ее вершины до ближайшего опорного торца.

Подробности рассмотрим на примере сборки фронтальной линзы микрообъектива  $90 \times 1,25$  (см. также рис. 7). Линза представляет собой часть шарика диаметром  $1,56$  мм и толщиной  $0,92$  мм, т. е. значительно больше полусферы. Световой диаметр задней поверхности равен  $1,55$  мм, т. е. линза работает почти всей задней полусферой. Посадочное отверстие под линзу растачивают на конус с углом  $8^\circ$  концентрично  $\varnothing 13C$  оправы. Глубину расточки, т. е. расстояние  $5 \pm 0,01$  от вершины линзы до верхнего опорного торца оправы, контролируют оптическим толщетомером, на конце измерительного щупа которого приклеена фронтальная линза того же диаметра, что и испытываемая.

Перед закаткой линзу вклеивают шеллаком в расточку оправы и нажимами на края линзы кончиком заостренной бамбуковой палочки центрируют ее так, чтобы фронтальная плоская поверхность стала строго перпендикулярной оси шпинделя станка. При этом отраженное от поверхности изображение лампочки не должно иметь биения. После застывания шеллака линзу завальцовывают в оправе.

Линзы, центрированные и закрепленные в оправках, после чистки собирают в корпусе и проверяют качество создаваемого объективом изображения точки. Если обнаруживается сфери-

ческая аберрация, то с помощью прокладных колец 2 (рис. 85) изменяют воздушный промежуток между фронтальной линзой 1 и менисковой линзой 3. Кому на оси объектива устраняют поперечными сдвигами той же линзы 3, диаметр оправы которой на 0,2 мм меньше оправ остальных линз. Астигматизм компенсируют взаимным разворотом линз вокруг оптической оси.

Опорный торец наружного корпуса 7 окончательно собранного объектива после его центрировки подрезают на специальном станке с целью обеспечения взаимозаменяемости объективов, работающих на поворотном револьверном диске.

Качество изображения микрообъективов испытывается путем наблюдения точечного препарата.

**Сборка фотообъективов.** Простые объективы собираются в оправках насыпного типа, сложные фотообъективы — также и в свинчиваемых оправках с выдерживанием воздушных промежутков по индивидуальному паспорту для каждого комплекта оптики.

Объективы насыпного типа (рис. 86) собирают по способу Линника—Радченко, Корпус растачивают по 2-му классу точности, оправы линз обрабатывают по скользящей посадке того же класса, например в триплете выдерживают  $\varnothing 15 \frac{A}{C}$ . Перед обработкой каждая

из оправ с линзой закрепляется на резьбовой оправке 5 сферической шайбы 4 центрировочного патрона (рис. 87). С помощью регулировочных винтов 2 шайбу 4 совместно со стаканом 1 можно сдвигать в поперечном направлении и смещать оптическую ось линзы параллельно себе. Винтами 3 можно, кроме того, поворачивать шайбу 4 вокруг ее центра Ц, который должен совпадать с центром (точнее — с автоколлимационной точкой) одной из поверхностей центрируемой линзы. Этими двумя движениями можно быстро и с большой точностью совместить оптическую ось линзы с осью вращения шпинделя станка. При наблюдении в автоколлимационную трубку блики от обеих поверхностей линзы при этом не будут иметь биения.

Проточив наружную поверхность оправы по диаметру 15С, подрезают ее передний торец с выдерживанием размера  $e$  до передней вершины линзы, а затем подрезают и задний торец,

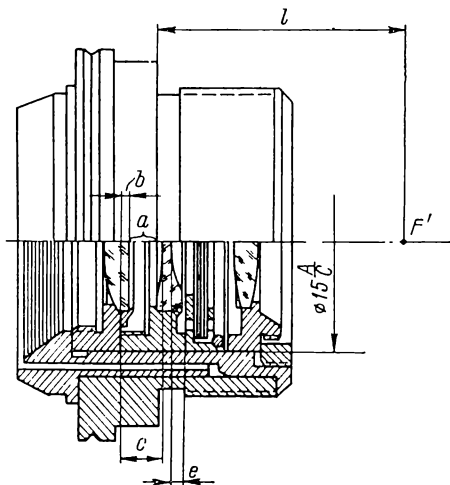


Рис. 86. Фотообъектив в оправе насыпной конструкции

Закрепив в корпусе обработанные под один диаметр оправы с линзами, получают готовый объектив. Расстояние  $l$  от опорного торца до задней фокальной плоскости выдерживают подрезкой торца корпуса объектива или регулировкой.

1 2

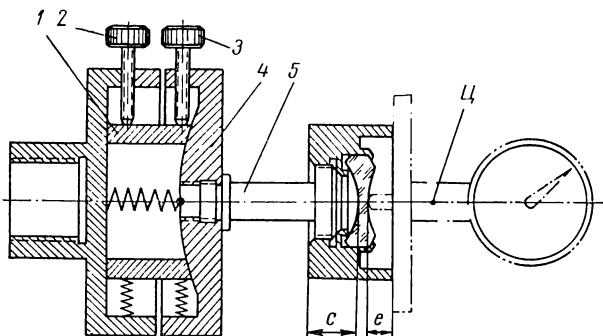


Рис. 87. Схема устройства центрировочного патрона

обрабатывая в них посадочные места под линзы (рис. 88). На оправку станка навинчивают внутренней технологической резьбой с упором в базовый торец  $K$  оправу 1 и растачивают посадочное отверстие под первую линзу. Измерив суммарный размер  $(A + d_1)$  и зная из паспорта толщину  $d_1$  линзы, находят размер  $A$ . Ввинтив оправу 2 до упора и расточив в ней посадочное отверстие под вторую линзу, измеряют размер  $M = (A + d_1) + a + d_2$  и находят первый воздушный промежуток  $a$ . Навинтив корпус 4 с ирисовой диафрагмой, ввинчивают в корпус до упора оправу 5 и специальным резцом растачивают в ней посадочное отверстие под третью линзу. Измерив размер  $N$ , находят величину второго воздушного промежутка  $b = N - (M + d_3)$ .

После пригонки и маркировки оправы развинчивают, отделяют, обезжиривают и подают на окончательную сборку. Навинтив на оправку станка оправу 1, завальцовывают первую линзу, контролируя центрировку. Затем ввинтив оправу 2, так же завальцовывают вторую линзу. При завальцовке третьей линзы оправу 5 закрепляют на оправке станка посредством внутренней резьбы с базированием на торец  $L$ . Этот торец и технологическую резьбу предусмотрительно обрабатывают от торца  $K$  в процессе механической сборки оправ объектива,

Расстояние  $l$  от заднего опорного торца фланца 3, с помощью которого объектив крепится к передней доске камеры, до заднего фокуса  $F'$  поддерживают подрезкой.

Качество собранных фотообъективов контролируют различными методами: определяют разрешающую способность в центре и на краях поля изображения визуально или фотопутем. Ответственные объективы (репродукционные, аэрофотосъемочные, киносъемочные и др.) исследуют по более широкой программе:

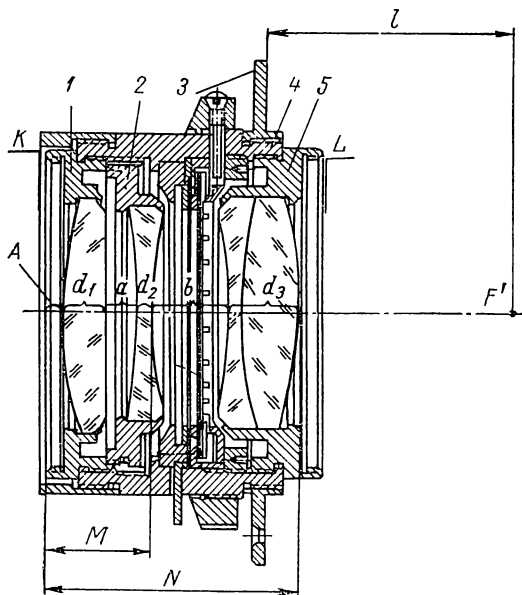


Рис. 88. Фотообъектив в оправе свинчиваемой конструкции

определяют разрешающую способность по глубине, находят плоскость наилучшей установки, измеряют астигматизм и кривизну поля, дисторсию, хроматизм, сферическую aberrацию, оценивают качество изображения при помощи частотно-контрастной и пограничной характеристики [64].

## 22. Сборка зрительных и визирных труб

Оптические трубы по назначению разделяются на зрительные и визирные. Зрительные трубы используются для наблюдения далеких предметов, не различимых с достаточной подробностью невооруженным глазом. Это, например, трубы для наблюдения искусственных спутников Земли, для рассматривания мишеней при стрельбе в тире, для снятия отсчетов по шкале зеркальных электроизмерительных приборов. Главное требование к таким

трубам состоит в том, чтобы они давали высокого качества увеличенное изображение наблюдаемых далеких объектов.

Визирные трубы имеют перекрестие. Они позволяют визировать далекие точки, задавать неизменное направление в пространстве. Такие трубы используются в качестве визиров целеуказания в дальномерах, в прожекторных установках, в качестве гидов в астроинструментах. Здесь основное значение имеет согласованность направления оси визира с направлением оси основного прибора. Визирные трубы с фокусировкой позволяют визировать точки, удаленные на различные расстояния. При этом прямолинейность визирной линии (траектории изображений центра перекрестия в пространстве предметов) может не иметь значения, как, например, в автоколлимационной центрировочной трубке Забелина, или же визирная линия должна быть строго прямолинейной, как это требуется в нивелирных трубах.

Конструктивно оптические трубы бывают прямые или с изломанной осью, если в ход лучей включены зеркально-призменные системы, служащие для сокращения продольных габаритов прибора или оборачивания изображения.

Все оптические трубы — зрительные и визирные — должны иметь высокое качество изображения, которое зависит в первую очередь от качества изготовления объектива и точности его центрировки в трубе. В трубах с прямолинейной осью центрировка линзовых узлов — объективов, оборачивающих линз, окуляров — обеспечивается просто, так как механические детали труб представляют собой тела вращения. Для этого надо лишь соосно расточить в трубах посадочные места под все линзовые узлы.

Малые децентрировки, которые здесь возможны, бывают двух видов:

1) децентрировка 1-го рода, или угловая децентрировка, т. е. взаимные наклоны оптических осей элементов оптической системы;

2) децентрировка 2-го рода, или линейная децентрировка, т. е. взаимные поперечные сдвиги оптических осей элементов оптической системы.

Допуски на децентрировки 1-го рода в ответственных случаях составляют 10—20", в обычных случаях — до 1—2'. Допуски на децентрировки 2-го рода задают до десятых долей миллиметра. Эти допуски, сравнительно просто выдерживаемые в прямых трубах, требуют особых приемов при сборке труб с зеркально-призменными системами, что показано в следующем параграфе.

### **23. Сборка и юстировка неподвижных зеркально-призменных систем в сходящемся ходе лучей**

Призмы и зеркала в сходящемся ходе лучей должны быть установлены строго в расчетное положение, так как их повороты и сдвиги приводят к взаимной децентрировке тех частей системы,

между которыми расположены призмы и зеркала. Повороты и сдвиги призм и зеркал, кроме порчи качества изображения системы, могут вызвать и другие дефекты — наклон изображения, срезание поля зрения или децентрировку и срезание зрачков системы. Поэтому при сборке зеркально-призменных систем учитывается влияние их подвижек на свойства и характеристики прибора и обязательно контролируется правильное положение призм и зеркал.

Отражательные призмы в сходящемся ходе лучей по расчету должны быть установлены так, чтобы входная и выходная преломляющие грани были перпендикулярны оптической оси системы с точностью до нескольких

угловых минут. В противном случае наклонная развертка призмы внесет астигматизм в изображение точек даже на оси системы. Проверить выполнение указанного требования не сложно. Покажем это на примере коленчатого визира с соборачивающей призмой Шмидта с крышей (рис. 89, а). Для контроля можно воспользоваться двумя авто-

моллимационными трубками малого увеличения. Одну из трубок  $AT_1$  следует установить на посадочное место той части системы, которая стоит перед призмой, вторую трубку  $AT_2$  — на посадочное место другой части системы, стоящей за призмой.

На рис. 89, б одна трубка опирается своим торцом на торец расточки под объектив  $Об$ , вторая — вставлена в расточку под окуляр  $Ок$  (рис. 89, а). Визирные оси каждой трубки должны быть параллельны оптическим осям тех частей системы, вместо которых трубки установлены. В нашем примере визирная ось первой трубки должна быть перпендикулярна опорному торцу расточки под объектив  $Об$ , а визирная ось второй трубки — параллельна геометрической оси посадочного цилиндра. Далее наклонами призму  $П$  следует установить так, чтобы входная и выходная ее грани стали перпендикулярны визирным осям соответствующих автоколлимационных трубок. При этом автоколлимационные изображения в поле зрения трубок займут нулевое положение. Входная и выходная грани призмы теперь будут перпендикулярны оптическим осям объектива  $Об$  и окуляра  $Ок$ , если их поставить на свои места.

При контроле описанным способом не замечаются параллельные сдвиги призмы, которые обычно хотя и менее вредны (они вызывают децентрировку 2-го рода), но так же нежелательны,

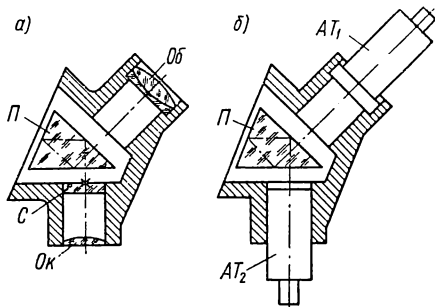


Рис. 89. Контроль установки призмы с помощью автоколлимационных трубок

как и наклоны призмы. Кроме того, автоколлимационный метод не позволяет обнаружить ошибки установки плоских зеркал. Указанных недостатков не имеет другой способ, основанный на использовании диоптровых центрировочных трубок. Рассмотрим особенности этого способа контроля на примере юстировки окулярного патрубкa перископа дальнего наблюдения (рис. 90, а).

В верхней расточке патрубкa закреплен объектив *Об*, выполняющий роль второй оборачивающей линзы перископа, а в боковой расточке — окуляр *Ок* с сеткой *С*. Между объективом и окуляром в сходящемся ходе лучей установлено плоское зеркало *З*.

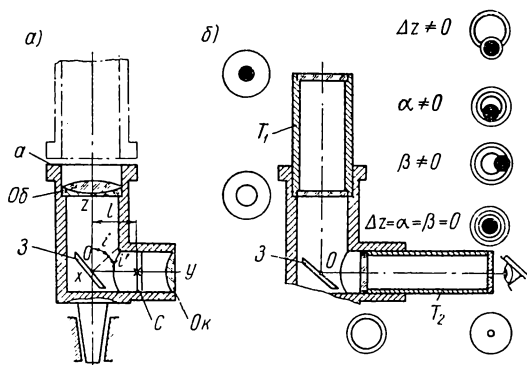


Рис. 90. Контроль установки плоского зеркала с помощью центрировочных трубок

Снизу патрубков укреплен на вертикальной оси вращения перископа, а на его верхний торец *а* устанавливаются трубы, которые заключают в себе всю остальную оптику перископа: первую оборачивающую линзу, объектив, коллектив, головную призму и защитное стекло. Высоту перископа (перископичность) можно изменять, удаляя одну из труб, которая не имеет оптики и ставится в параллельном ходе лучей между оборачивающими линзами.

Перископ служит для наблюдения и изучения местности, а также для измерения углов. Требуется, чтобы качество изображения оптической системы перископа было высоким, а сетка его не имела параллакса. В перископах, используемых для измерения вертикальных и горизонтальных углов, кроме того, не должно быть бокового наклона оси визира (ошибки *q*) и наклона горизонтальной оси качения головного зеркала или призмы (ошибки *l*, см. п. 28).

Окулярный патрубок является ответственной частью перископа, и к нему необходимо предъявить следующие требования:

1) оптическая система, состоящая из объектива *Об*, зеркала *З* и окуляра *Ок*, должна быть центрированной;

2) сетка  $C$  должна находиться в фокусе объектива  $Об$ ;

3) визирная ось, проходящая через изображение сетки  $C'$  в зеркале  $З$  при обратном ходе лучей и заднюю узловую точку объектива  $Об$ , должна быть параллельна вертикальной оси вращения перископа;

4) верхний опорный торец патрубка  $a$  должен быть перпендикулярен вертикальной оси вращения перископа.

Допуски на выполнение перечисленных требований можно найти из заданных пределов и точности измерения углов перископом, а также из конструктивных данных прибора. Будем полагать, что допуски на угловые величины составляют единицы минут угла, линейные допуски — десятые доли миллиметра.

Некоторые требования можно выполнить лишь при механической обработке патрубка, например последнее — четвертое — требование выполняется подрезкой торца  $a$  с установкой патрубка на станке от вертикальной оси вращения перископа.

Предположим далее, что центрировка оптической системы, состоящей из объектива  $Об$  и окуляра  $Ок$ , выполняется юстировкой плоского зеркала  $З$ . Легко заметить, что децентрировки 2-го рода не будет только при том условии, если оси расточек посадочных мест в патрубке под объектив и окуляр пересекаются в общей точке  $O$ . Это требование также выполняется в процессе механической обработки патрубка.

При сборке патрубка, как видно из указанных требований, необходимо центрировать оптические оси объектива и окуляра, а также ориентировать визирную ось перпендикулярно торцу  $a$  или параллельно вертикальной оси вращения прибора. Поскольку оба требования выполняются юстировкой одного зеркала  $З$ , то это может быть сделано лишь с той точностью, с какой центр перекрестия  $C$  совпадает с оптической осью окуляра  $Ок$ , а плоскость штрихов сетки  $C$  перпендикулярна этой оси.

Пусть все перечисленные здесь требования к обработке патрубка и установке сетки выполнены. Теперь надо установить зеркало  $З$  в правильное положение, т. е. в такое, когда его отражающая плоскость:

совпадает с точкой  $O$  пересечения оптических осей объектива  $Об$  и окуляра  $Ок$ ;

перпендикулярна плоскости, содержащей оптические оси объектива  $Об$  и окуляра  $Ок$ ;

образует равные углы ( $90^\circ - i$ ) и ( $90^\circ - i'$ ) с оптической осью объектива  $Об$  и оптической осью окуляра  $Ок$  ( $i$  и  $i'$  — углы падения и отражения осевых лучей).

Первое условие обеспечивается смещением зеркала  $З$  вдоль его нормали; второе — его поворотом вокруг оси, совпадающей с отражающей плоскостью зеркала и с плоскостью  $yz$ ; третье — поворотом зеркала вокруг оси, перпендикулярной плоскости  $yz$  и лежащей в плоскости отражения,



Смещения плоского зеркала вдоль нормали на величину  $\Delta z$  вызывают параллельный сдвиг отраженного пучка лучей величины  $t = 2\Delta z \sin i$  и расфокусировку величины  $\Delta l = 2\Delta z \cos i$  независимо от местоположения зеркала в ходе лучей. Влияние угловых поворотов зеркала прямо пропорционально расстоянию  $l$  точки падения осевого луча пучка от плоскости изображения. При повороте зеркала на малый угол  $\beta$  вокруг оси, совпадающей с плоскостью падения и отражающей плоскостью, сдвиг изображения  $t_\beta = 2l \beta \cos i$ , расфокусировка почти не возникает, но появляется наклон изображения на угол  $\alpha_n = 2\beta \sin i$ . При повороте зеркала на малый угол  $\alpha$  вокруг оси, лежащей в его плоскости и перпендикулярной плоскости падения, сдвиг изображения равен  $t_\alpha = 2l\alpha$ , а расфокусировка и наклон изображения практически отсутствуют. Оба поворота зеркала — на угол  $\alpha$  и на угол  $\beta$  — вызывают децентрировку 1-го рода частей системы, наклон плоскости изображения, параллакс сетки на краю поля зрения и сдвиг выходного зрачка с оси. Если, например, перпендикулярность визирной оси к торцу  $a$  пытаться юстировать поворотами зеркала  $З$  на углы  $\alpha$  и  $\beta$ , то следует иметь в виду, что чем ближе расположено зеркало к сетке  $C$ , тем на большие углы придется наклонять зеркало. При этом неизбежно получится система децентрированная, со смещенным с оси выходным зрачком.

Для установки зеркала  $З$  в правильное положение пользуются диоптровыми центрировочными трубками. Первая трубка  $T_1$  базируется в посадочном месте под объектив, который на время юстировки зеркала вынимают из патрубка. В трубке с обеих сторон закреплены прозрачные пластинки. На пластинке, установленной в дальнем конце, нанесено круглое черное пятно, а на ближней пластинке награвирована черная окружность несколько большего диаметра. Центры пятна и окружности должны совпадать с геометрической осью посадочного места трубки.

Вторая трубка  $T_2$  длиной 200—250 мм устанавливается в посадочном месте под окуляр. Спереди в ней закреплена прозрачная пластинка с черной окружностью наибольшего диаметра, а сзади — металлическая диафрагма с круглым отверстием диаметра 1 мм или меньше. Окружность и отверстие концентричны оси посадочного места трубки.

Если зеркало  $З$  занимает в патрубке правильное положение, то через отверстие диафрагмы трубки  $T_2$  видны концентрично расположенные друг к другу черное пятно и две окружности. Любая из перечисленных выше трех подвижек зеркала — смещение на  $\Delta z$  вдоль нормали или поворот на угол  $\alpha$  или  $\beta$  — по своему нарушает концентричность наблюдаемой картины, что показано на рис. 90, б. Соответствующими поворотами зеркала или его смещением при юстировке следует лишь добиться концентричного расположения пятна и колец.

Установив зеркало в правильное положение, ставят на место объектив *Об* и окуляр *Ок* и выполняют остальные требования к сборке патрубку. Чтобы проверить, совпадает ли сетка с фокусом объектива *Об* и перпендикулярна ли визирная ось по отношению к торцу *a* патрубка, можно воспользоваться автоколлиматором с опорным торцом. Визирная ось самого автоколлиматора должна быть перпендикулярна своему опорному торцу, что легко проверить, приложив к этому торцу вспомогательное плоское зеркало.

Малую неперпендикулярность визирной оси патрубка в плоскости *yz* можно устранить сдвигом зеркала *З* вдоль нормали.

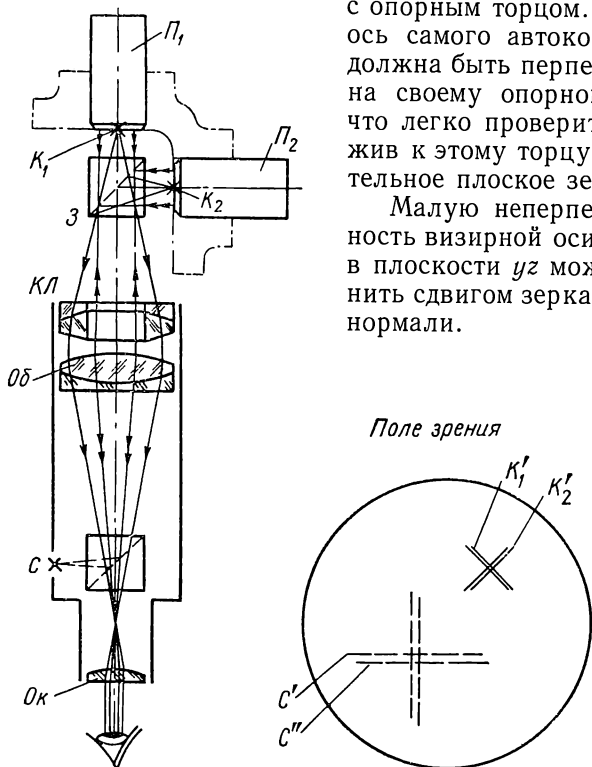


Рис. 91. Контроль установки разделительной призмы микроинтерферометра с помощью автоколлиматора с кольцевой линзой

Точность центрировки с помощью диоптровых трубок невысока: можно заметить сдвиги зеркала вдоль нормали в десятые доли миллиметра и повороты в несколько угловых минут. В обычных случаях такой точности вполне достаточно. Работа с трубками очень проста и удобна. Поэтому описанный способ центрирования оптических систем, имеющих в своем составе зеркала и призмы, получил на заводах очень широкое распространение.

В некоторых случаях требуется значительно более высокая точность центрировки призм и зеркал. Тогда для контроля пользуются автоколлиматором, совмещенным с микроскопом. Схема такого устройства показана на рис. 91 применительно к контролю

установки разделительной призмы  $Z$  в микроинтерферометре Линника. В посадочные места микрообъективов вставлены цилиндрические пробки  $P_1$  и  $P_2$ . Торцы пробок, обращенные к разделительной призме  $Z$ , оптически полированы и перпендикулярны геометрическим осям пробок. В центре торцов награвированы кресты  $K_1$  и  $K_2$ .

Автоколлиматор обычного устройства дополнен кольцевой линзой  $KЛ$ , которая совместно с его объективом  $Об$  образует объектив микроскопа, переносящего изображение крестов пробок  $K'_1$  и  $K_2^1$  в поле зрения окуляра  $Ок$ . В том же поле зрения получатся два автоколлимационных изображения  $C'$  и  $C''$  сетки  $C$  от торцов пробок. Изображения  $K'_1$ ,  $K_2^1$  и  $C'$ ,  $C''$  попарно совпадут только в том случае, когда разделительная плоскость призмы  $Z$  с большой точностью займет правильное положение. Здесь можно заметить наклоны призмы  $Z$  в десятки секунд угла, сдвиги — в сотые доли миллиметра.

## Глава VII

### ЮСТИРОВКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

#### 24. Сборка и юстировка монокулярных труб

Сборку монокулярных труб рассмотрим на примере серийного менискового школьного телескопа системы Максутава.

Телескоп этого типа предназначен для учебных астрономических наблюдений в средней школе. Он позволяет наблюдать Солнце, Луну и планеты солнечной системы — Венеру, Марс, Юпитер с четырьмя спутниками, Сатурн с кольцом, звездные скопления и некоторые туманности. С помощью школьного телескопа можно наблюдать двойные звезды с угловым расстоянием между ними до  $2,2''$ . Такие тонкие наблюдения возможны благодаря тому, что оптическая система менискового телескопа, предложенная и рассчитанная чл.-корр. АН СССР Д. Д. Максутным, позволяет получить почти идеальное по качеству изображение. При диаметре входного зрачка  $d_p = 70$  мм и при общем увеличении телескопа  $\Gamma = 70\times$  теоретический угол разрешения составляет около  $2''$ , а практический предел разрешения лишь на 10% ниже.

Объектив телескопа состоит из мениска 5 и двух сферических зеркал — главного вогнутого зеркала 8 и вторичного выпуклого зеркала 6, представляющего собой алюминированный участок внутренней поверхности мениска 5 (рис. 92). Основной особенностью системы Максутава является то, что толщина и радиусы кривизны мениска рассчитаны так, чтобы он был ахроматическим и имел такую сферическую aberrацию, которая компенсировала бы сферическую aberrацию обоих зеркал.

Телескоп имеет два сменных окуляра 10 и 13 увеличения  $\bar{\Gamma}_1 = 8\times$  и  $\bar{\Gamma}_2 = 25\times$ . Общее увеличение телескопа соответственно равно  $\Gamma_1 = 25\times$  и  $\Gamma_2 = 70\times$ . Окуляры имеют съемные зенитные призмы 11 и 12, позволяющие наблюдать точки, близкие к зениту. Для грубой установки телескопа служит механический диоптрый визир 4.

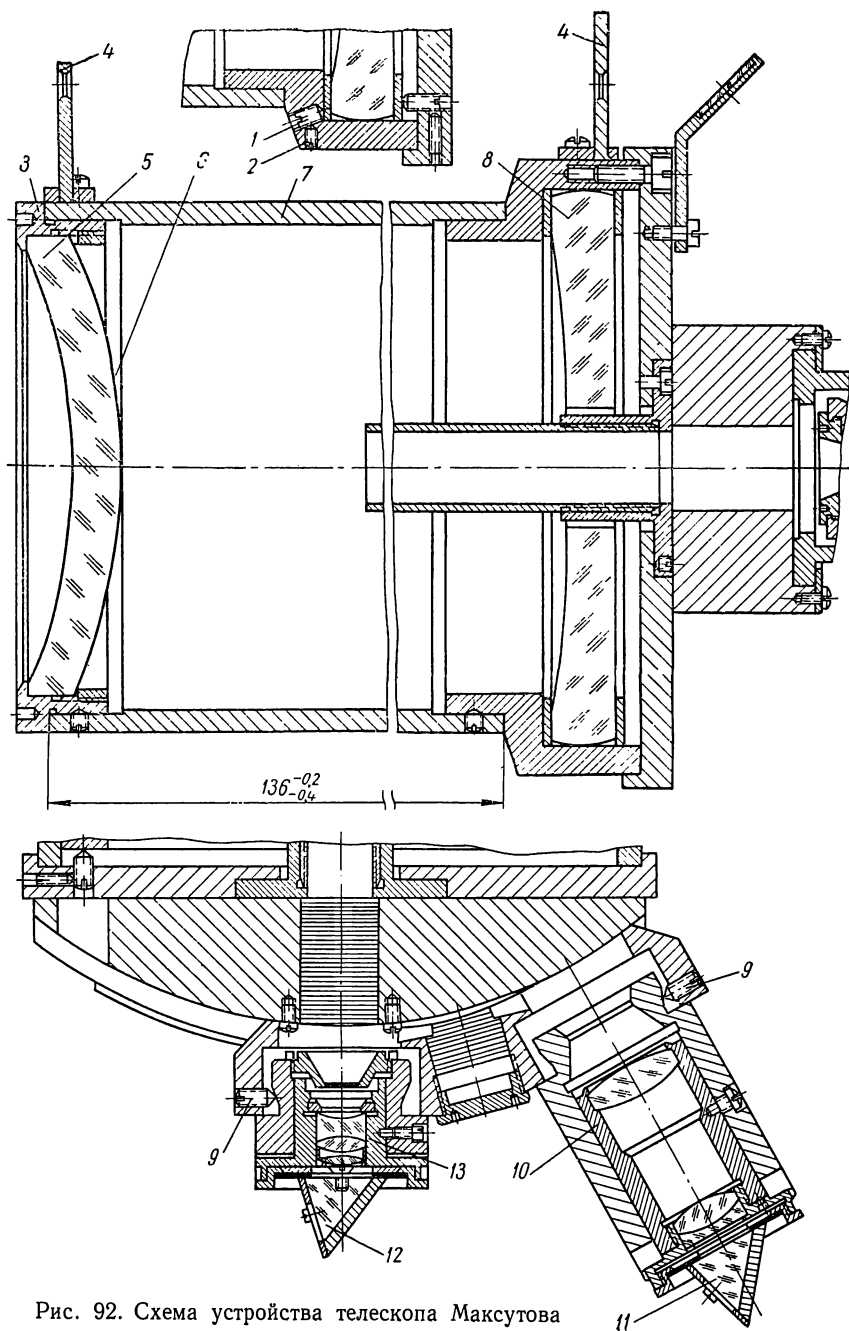


Рис. 92. Схема устройства телескопа Максутова

Для получения изображения высокого качества при сборке оптической системы телескопа необходимо точно центрировать главное зеркало 8 по отношению к мениску 5 и получить заданное расстояние между зеркалами около 134 мм.

Для центрирования предусмотрена возможность тонкого наклона зеркала 8 вокруг его вершины в любом направлении с помощью юстировочных стопоров 1. Кроме того, каждый из окуляров 10 и 13 можно центрировать отдельно тремя стопорами 9. Мениск 5 в оправе устанавливается в трубе 7 без всякой юстировки, но при его изготовлении, а также при обработке оправы 3 выдерживают строгие допуски на децентрировки. Затем с помощью вертикального коллиматора проверяется установка главного зеркала 8. Вторичное зеркало 6 имеет большое линейное увеличение  $V \approx 5,25\times$ , поэтому смещения главного зеркала 8 вдоль оси вызывают увеличенное в  $V^2$ , т. е. примерно в 28 раз, смещение фокальной плоскости системы объектива. Измерив величину смещения фокуса  $F'$  системы, легко найти и сопряженную с ней величину смещения главного зеркала из его правильного положения.

На том же вертикальном коллиматоре со светящейся точкой (искусственной звездой) в фокусе можно проверить качество изображения объектива. Дефекты, замечаемые в дифракционном изображении точки, устраняют тонкой юстировкой главного зеркала 8. По окончании этой операции юстировочные винты 1 стопорят с помощью поперечных винтов 2, а затем все винты замазывают суриком. Окуляры стопорами 9 центрируют так, чтобы изображение точки коллиматора оказалось в центре полевой диафрагмы.

## 25. Сборка и юстировка бинокулярных приборов

Бинокулярные приборы имеют ряд преимуществ по сравнению с монокулярными приборами: они дают возможность работать двумя глазами, что более привычно для наблюдателя и поэтому меньше его утомляет, и позволяют использовать высокую чувствительность стереоскопического зрения. Стереоскопические приборы отличаются весьма высокой точностью продольных и поперечных установок. Стереодальномеры, например, позволяют оценивать параллактические углы до десятых долей секунды, стереокомпараторы для аттестации штриховых шкал позволяют измерять с точностью до десятых долей микрометра. Весьма распространены также наблюдательные стереоскопические приборы — бинокли, стереотрубы, бинокулярные и стереомикроскопы.

При стереоскопическом наблюдении выполняются два основных условия: во-первых, глаза аккомодируют, т. е. устанавливаются на резкость путем изменения выпуклости хрусталика так, чтобы отчетливо видеть интересующую точку  $T$  предмета, удаленную на расстояние  $-a$ , и, во-вторых, оси глаз конвергируют, т. е. сходятся на точке  $T$ , поворачиваясь вокруг центров глаз на угол  $k$

(рис. 93). Если расстояние между центрами глаз — база — равно  $\delta$ , то при малом угле конвергенции осей получается простое условие для нормального стереоскопического восприятия, а именно

$$-ak = \delta = \text{const.} \quad (\text{VII.1})$$

Таким образом, при стереоскопическом наблюдении существует тесная связь между аккомодацией глаз и конвергенцией их осей: произведение расстояния до наблюдаемого предмета на угол между осями глаз есть величина постоянная.

Однако даже при наблюдении невооруженными глазами это основное условие нередко нарушается, в первую очередь за счет таких дефектов зрения, как косоглазие, аметропия и анизометропия, анизэйкопия.

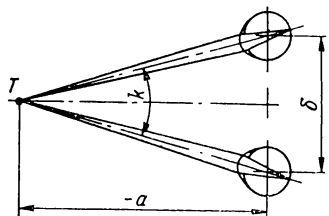


Рис. 93. Связь между конвергенцией и аккомодацией при бинокулярном зрении

При косоглазии наблюдатель, аккомодируя на точку  $T$ , не может свести оси глаз под нужным углом  $k$  на некоторую величину  $\Delta k$ , которая и служит мерой косоглазия. При малой величине косоглазия стереоскопическое восприятие затрудняется, при большом косоглазии оно расстраивается — наступает двоение изображений.

Объем аккомодации глаз зависит от возраста — у всех людей он уменьшается с годами. Пределы же аккомодации у нормально видящих людей начинаются от бесконечности и ограничиваются некоторой ближайшей точкой. В этих пределах можно получить резкое изображение и стереоскопическое восприятие точек предметов.

При аметропии указанные естественные пределы резкого видения смещаются либо в сторону меньших расстояний — при близорукости, либо в сторону больших расстояний — при дальнозоркости. Если предметы видны недостаточно резко, то их стереоскопическое восприятие затруднено, а при сильном размытии изображений предметов оно исчезает.

Еще более мешает стереонаблюдению анизометрия, т. е. неравенство аметропий глаз наблюдателя. Встречаются люди с неодинаковой близорукостью левого и правого глаза, или с неодинаковой дальнозоркостью глаз, или с аметропией только одного глаза. Во всех этих случаях оси глаз могут устанавливаться под нужным углом конвергенции, но в одном глазу получится нерезкое изображение предмета, что затрудняет получение нормального стереоэффекта.

Анизэйкопия проявляется в том, что наблюдатель видит каждым глазом изображения предметов, не равные по величине за счет, например, различия увеличений в оптических системах глаз. В этом случае наблюдается искаженный по глубине образ про-

странства предметов, фронтальная плоскость кажется наклоненной или неплоской. Встречаются также и другие, менее существенные и более редкие дефекты, такие, как различие освещенностей или окраски изображений в глазах, перекося изображений и др.

Все перечисленные дефекты зрения встречаются довольно часто, но они почти не мешают стереоскопическому зрению, если они малы по величине. Наибольший вред причиняют косоглазие и анизометропия, так как они нарушают основную связь между аккомодацией глаз и конвергенцией их осей.

В бинокулярных приборах предусматривается возможность компенсации аметропии и анизометропии. Технические требования ограничивают также дефекты самих приборов, которые могут появиться вследствие погрешностей изготовления и сборки деталей.

Основные требования к бинокулярным приборам с учетом условий стереоскопического наблюдения можно сформулировать в общем виде следующим образом (см. ГОСТ 7048—54).

1. Приборы должны быть пригодны для наблюдателей с расстоянием между глазами от  $\delta_{\min} = 52$  мм до  $\delta_{\max} = 74$  мм.

2. В приборах должна быть предусмотрена возможность коррекции аметропии обоих глаз наблюдателя в пределах не менее  $\pm 5$  дптр, а также возможность коррекции анизометропии в пределах не менее  $\pm 3$  дптр.

3. При любом расстоянии между центрами выходных зрачков, а также при любой диоптрийной установке окуляров в приборах должно выдерживаться соответствие между расстоянием до изображений предметов и углом между осями выходящих пучков лучей. Для телескопических бинокулярных труб оси пучков лучей, выходящих из обоих окуляров от одной и той же точки предмета, должны быть параллельны между собой в пределах следующих допусков: в горизонтальной плоскости при конвергенции осей — не более  $60'$ ; при дивергенции осей — не более  $20'$ ; в вертикальной плоскости — не более  $\pm 15'$ .

4. Увеличения оптических систем бинокулярного прибора должны быть одинаковыми. Относительная разность их увеличений не должна превышать 2%, если угловое поле зрения окуляров не превосходит  $50^\circ$ , и 1,5% — если поле зрения более  $50^\circ$ .

5. Изображения в оптических системах не должны иметь перекося. Алгебраическая разность углов поворота изображений вокруг оптических осей у двух систем бинокулярного прибора по абсолютному значению не должна быть более  $30'$ .

Предъявляются также и другие, менее существенные требования, которые, однако, оказываются сложными для выполнения. Требуется, например, чтобы торцы окулярных наглазников при установке нулевых отсчетов на диоптрийных шкалах обоих приборов были на одинаковой высоте с отклонением не более чем на 2 мм.



Требования 1—3 выполняются конструктивно в различных биноклярных приборах по-разному.

1. Чтобы дать возможность пользоваться приборами наблюдателям с различным расстоянием между глазами, в простейших случаях увеличивают выходной зрачок систем. Если, например диаметр выходных зрачков трубок принять  $d'_p = 9$  мм и расстояние между осями трубок  $\delta = 63$  мм, то при диаметре зрачков глаз наблюдателей  $d_{з.г} = 2$  мм не будет срезания пучков при любом базисе глаз от  $\delta_{\min} = 56$  мм до  $\delta_{\max} = 70$  мм (рис. 94, а). Выходные зрачки можно сделать также прямоугольной формы (рис. 94, б).

В большинстве случаев в биноклярных приборах расстояние между окулярами делается переменным. Для этого легкие трубы—бинокли, стереотрубы—соединяют шарнирно. Вращая трубы вокруг оси  $O$  шарнира, изменяют расстояние между окулярами в соответствии с глазным базисом наблюдателя (рис. 94, в). В тяжелых конструкциях (дальномеры и др.) обе системы биноклярного прибора расположены в общем корпусе, а для изменения расстояния между окулярами используют ромбпризмы, которые через зубчатые секторы поворачивают в противоположные стороны (рис. 94, г). Применяют также передвижные вдоль базиса окуляры (рис. 94, д).

Рис. 94. Способы изменения расстояния между выходными зрачками в биноклярных приборах

2. В простых театральных биноклях для коррекции аметропии окуляры смещают по глубине совместно, для чего их укрепляют на общем мостике. В других конструкциях предусматривается раздельная диоптрийная установка окуляров.

3. В биноклярных приборах с неизменным расстоянием между окулярами, как, например, в простых театральных биноклях, параллельность осей выходящих пучков будет обеспечена, если параллельны друг другу оптические оси труб (рис. 95, а). В биноклях с окулярами, закрепленными на общем выдвижном

мостике, непараллельность осей по высоте может появиться при развороте мостика вокруг своей оси за счет зазоров между расточками в трубах и корпусами окуляров (рис. 95, б). Величина допустимого взаимного сдвига окуляра  $e_{ок}$  в театральных биноклях равна

$$e_{ок} \leq f'_{ок} k_{\theta}, \quad (VII.2)$$

где  $k_{\theta}$  — допустимая непараллельность осей выходящих пучков по высоте (до  $15'$ );  
 $f'_{ок}$  — фокусное расстояние окуляров.

Таким образом, этот допуск целиком зависит от величины фокусного расстояния окуляров. При  $f'_{ок} = 20$  мм и  $k_{\theta}$  до  $0,002$  рад получим  $e_{ок} = 0,04$  мм, а при  $f'_{ок} = 10$  мм — всего  $e_{ок} = 0,02$  мм. Такой или несколько большей величины допуск в театральных биноклях все-таки можно выдержать без юстировки: отверстия в корпусах под объективы и окуляры должны быть расточены так, чтобы оптические оси труб были параллельны друг другу с точностью до  $0,02—0,04$  мм.

В бинокулярных трубах с переменным расстоянием между окулярами должна сохраняться параллельность осей выходящих пучков при любом окулярном базисе. При шарнирном соединении труб основной базой прибора является ось шарнира  $I—I$  (рис. 96, а). Оптические оси обеих труб также должны быть параллельны друг другу с точностью  $0,02—0,04$  мм (в зависимости от величины фокусного расстояния окуляров).

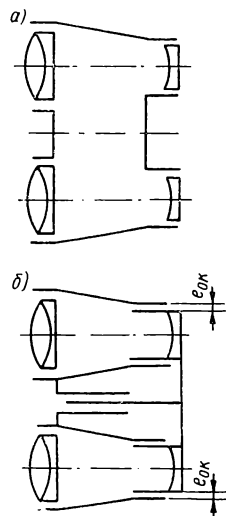


Рис. 95. Схемы конструкций биноклей с неизменным расстоянием между трубками

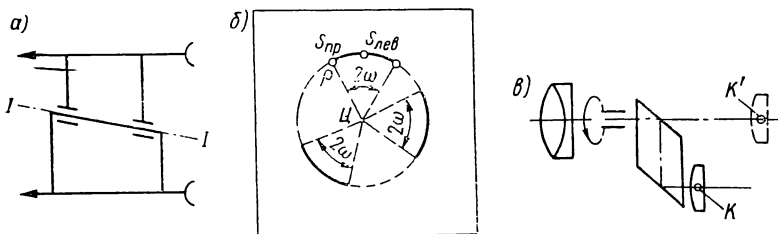


Рис. 96. Влияние непараллельности оптических осей труб по отношению к шарниру (а, б) или к оси вращения ромбпризмы (в) на направление выходящих пучков лучей

Но выполнения одного этого условия еще недостаточно: требуется чтобы оптическая ось поворачиваемой трубы была параллельна также и оси шарнира. Точность выполнения второго требования зависит от величины угла поворота  $\omega$  труб вокруг оси шарнира

и от взаимоположения оптических осей труб при установке средней базы между окулярами.

Предположим, что бинокль с шарнирным соединением труб помещен в параллельный ход лучей между линзами проекционного коллиматора системы Захарьевского (см. рис. 100, б). На экране коллиматора (рис. 96, б) увидим два блика: один — от левой трубки  $S_{лев}$ , другой — от правой трубки  $S_{пр}$ . Пусть правая трубка поворотная. Если бы она могла поворачиваться на полный оборот, то блик от нее описал бы на экране окружность, которая на рис. 96, б показана штриховой линией. Центр  $C$  этой окружности является как бы следом изображения оси шарнира на экране. Главный луч, идущий через узловую точку проекционного объектива коллиматора и через этот центр  $C$ , параллелен оси шарнира. Поскольку блик в правой трубке не совпадает с точкой  $C$ , а описывает вокруг нее окружность, оптическая ось правой трубки не параллельна оси шарнира.

В биноклях угол поворота трубки вокруг шарнира ограничен углом  $2\omega$ , поэтому блик опишет не полную окружность, а только ее дугу. В зависимости от направления ошибки непараллельности осей в трубках эта дуга может располагаться на любом участке окружности. Очевидно, наименее выгодно, когда дуга располагается на вертикальных участках окружности. Если при средней величине окулярной базы блик от левой трубки совместить с центром дуги, описываемой бликом от правой трубки, то допуск на непараллельность оптической оси этой поворотной трубки по отношению к оси шарнира найдется из условия

$$\rho < \frac{0,002 \text{ рад}}{\sin \omega}. \quad (\text{VII.3})$$

Здесь принято, что непараллельность указанных осей вызывает дополнительную непараллельность пучков не более  $0,002 \text{ рад}$ .

Видно, что чем меньше угол поворота труб вокруг шарнира — угол  $\omega$ , тем грубее допуск  $\rho$ . Если, например, угол поворота  $\omega = \pm 30^\circ$ , то допустимо  $\rho$  меньше  $0,004$ , а при  $\omega$  до  $\pm 10^\circ$   $\rho = 0,012 \text{ рад}$ .

В системах, где окулярную базу изменяют с помощью поворотной ромбпризмы, дополнительная непараллельность выходящих пучков лучей не возникает только в том случае, если изображение  $K'$  узловой точки окуляра  $K$  совпадает с осью поворота ромбпризмы. Точность совмещения точки  $K'$  также будет зависеть от величины угла поворота призм на оси и от величины фокусного расстояния окуляра (рис. 96, в).

4. Увеличения труб бинокулярной оптической системы должны быть одинаковыми. На рис. 97, а показан бинокль, увеличения в трубах которого отличаются на  $\Delta\Gamma$ . Если оптические оси труб строго параллельны, то расхождение осевых лучей для краевых точек поля зрения на угол  $\omega\Delta\Gamma$  объясняется только наличием

разности увеличений. Наиболее неприятно расхождение лучей для точек, лежащих выше или ниже оси. Оно не должно превышать величины 0,004, т. е. следует выполнить требование

$$\omega \Delta \Gamma \leq 0,004.$$

Для допустимой разности увеличений в относительной мере отсюда получим

$$\frac{\Delta \Gamma}{\Gamma} \leq \frac{0,004}{\omega \Gamma} = \frac{0,004}{\omega_{ок}}, \quad (\text{VII.4})$$

где  $\omega_{ок}$  — угол поля зрения за окуляром.

Таким образом, допуск на разность увеличений в бинокулярных трубах зависит только от величины угла  $\omega_{ок}$  поля зрения

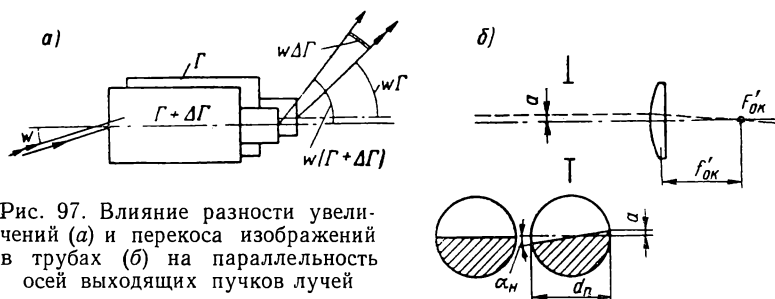


Рис. 97. Влияние разности увеличений (а) и перекоса изображений в трубах (б) на параллельность осей выходящих пучков лучей

окуляров. Этот допуск тем строже, чем больше угол  $\omega_{ок}$ . В обычном бинокле  $\omega_{ок} = 25 \div 30^\circ$ , поэтому допустима разность увеличений  $\Delta \Gamma / \Gamma$  не более 0,012—0,010 или менее 1,2—1,0%.

Разность увеличений зависит от действительных значений фокусных расстояний объективов и окуляров труб. В серийном производстве они могут отклоняться от расчетных величин до  $\pm 1\%$  у объективов и до 2—3% у окуляров. Вследствие этого наибольшая разность увеличений в трубах может составить более 6%, что в несколько раз больше найденного допуска, следовательно, допуск  $\frac{\Delta \Gamma}{\Gamma}$  можно выполнить лишь комплектацией объективов и окуляров по фокусным расстояниям.

5. В бинокулярной системе не должно быть также перекоса или взаимного наклона изображений, так как это вызовет расхождение осей пучков лучей, идущих из краевых точек поля зрения. Если, например, имеется наклон изображения только в правой ветви системы на угол  $\alpha_n$ , то на краю поля возникает непараллельность выходящих пучков лучей по высоте на угол  $a/f'_{ок}$ , где  $a$  — превышение точек изображения в пределах полевой диафрагмы диаметра  $d_n$ , причем  $a = \frac{d_n}{2} \alpha_n$  (рис. 97, б). Задавая на

непараллельность осей пучков прежний допуск—меньше  $0,004 \text{ рад}$ , последовательно напишем

$$\frac{a}{f'_{ок}} = \frac{d_n \alpha_n}{2f'_{ок}} = w_{ок} \alpha_n \leq 0,004,$$

откуда

$$\alpha_n \leq \frac{0,004}{w_{ок}}. \quad (\text{VII.5})$$

Допуск на перекося изображений также зависит только от величины окулярного угла поля зрения.

Возникает перекося изображений вследствие неправильной установки призм оборачивающей системы, т. е. от разворота их главных сечений. Если, например, главные сечения призм системы Малафеева взаимно перпендикулярны на угол  $\gamma$ , то перекося изображения будет равен удвоенной величине, т. е.  $\alpha_n = 2\gamma$ .

В обычном бинокле поле зрения окуляров  $w_{ок} = 25 \div 30^\circ$  и поэтому допустим перекося изображений величины

$$\alpha_n < 0,012 \div 0,010 \text{ рад или } \alpha_n > 30'.$$

Таким образом, при юстировке призмы должны быть установлены взаимно перпендикулярно с погрешностью не более  $8 \div 6'$ .

Одним из основных требований к биноклярным приборам является требование параллельности оптических осей. На примере призмного бинокля рассмотрим, за счет чего возникает непараллельность осей и как можно ее устранить при сборке.

Рис. 98. Схема монокуляр призмного бинокля

На рис. 98 схематически показана половина бинокля. Основной конструкторской базой (КБ) является ось шарнира. По отношению к ней должна быть параллельна оптическая ось трубы, проходящая через узловую точку объектива Об и узловую точку окуляра Ок, точнее, через узловую точку изображения окуляра Ок' за системой призм  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  при обратном ходе лучей. Пусть рабочий угол поворота трубки бинокля вокруг оси шарнира составляет величину  $\omega = \pm 45^\circ$ ; по формуле (VII.3) допуск на непараллельность оптической оси трубки и оси шарнира составит

$$\rho \leq \frac{0,002}{\sin \omega} = \frac{0,002}{\sin 45^\circ} \approx 0,003 \text{ рад}.$$

При фокусном расстоянии окуляра  $f'_{ок} = 20 \text{ мм}$  этот допуск соответствует поперечному сдвигу узловой точки окуляра или объектива на величину  $e_{ок} = e_{об} = 0,06 \text{ мм}$ .

Рассмотрим действенные подвижки и ошибки изготовления основных деталей и узлов, влияющие на направление оптической оси трубки призмного бинокля. Далее определим предельные допустимые величины этих подвижек и ошибок изготовления из расчета, что каждая из них в отдельности вызывает непараллельность оптических осей друг к другу в  $0,002 \text{ рад}$  или непараллельность оптической оси каждой трубки к оси шарнира в  $0,003 \text{ рад}$ .

1. Ошибка расточки отверстия в корпусе бинокля под оправу объектива, децентрировка объектива в оправе;  $e_{об} = 0,06 \text{ мм}$ .

2. Ошибка расточки в корпусе посадочного места под оправу окуляра, децентрировка окуляра в оправе;  $e_{ок} = 0,06 \text{ мм}$ .

Зазоры в окулярной резьбе механизма диоптрийной установки непосредственно вызывают непараллельность оптических осей труб, поэтому допуск для зазора следует найти по формуле (VII.2), откуда получим  $e_{ок} < 0,04 \text{ мм}$ .

3. Сдвиг ребра  $P_1$  первой призмы  $\Pi_1$  вдоль оси  $y$  из-за ошибки фрезерования гнезда на мостике под призму и из-за погрешности кругления контура призмы;  $e_{\Pi_1} < 0,03 \text{ мм}$ , так как сдвиг ребра вызывает удвоенной величины сдвиг осевого луча.

4. Сдвиг ребра  $P_2$  второй призмы  $\Pi_2$  вдоль оси  $x$  по тем же причинам;  $e_{\Pi_2} < 0,03 \text{ мм}$ .

5. Наклон главного сечения первой призмы  $\Pi_1$  вокруг оси  $y$  на угол  $\beta_1$  за счет неперпендикулярности на тот же угол опорной плоскости мостика;  $\beta_1 < \frac{0,003}{2\gamma_1} = \frac{0,03}{x_1} \text{ мм}$ , где  $x_1$  — расстояние до приведенного ребра  $P_{\Sigma 1}$  призмы  $\Pi_1$  от переднего фокуса окуляра;  $\gamma_1$  — угловое увеличение окуляра для точки ребра  $P_{\Sigma 1}$ .

Приняв  $x_1 \approx 80 \text{ мм}$ , получим  $\beta_1 < 0,0004 \text{ рад}$ , т. е. меньше  $1,5'$ .

6. Наклон главного сечения второй призмы  $\Pi_2$  вокруг оси  $x$  на угол  $\alpha_2$  за счет неперпендикулярности на тот же угол опорной плоскости мостика;  $\alpha_2 < \frac{0,03 \text{ мм}}{x_2}$ , где  $x_2$  — расстояние до приведенного ребра  $P_{\Sigma 2}$  призмы  $\Pi_2$  от переднего фокуса окуляра.

7. Ошибка прямого угла  $\Delta_{90^\circ}$  призмы  $\Pi_1$ ;  $(\Delta_{90^\circ})_1 < \frac{0,03 \text{ мм}}{nx_1}$ , где  $x_1$  — как в пункте 5,  $n$  — показатель преломления призмы.

8. Ошибка прямого угла второй призмы  $\Pi_2$ ;  $(\Delta_{90^\circ})_2 < \frac{0,03 \text{ мм}}{nx_2}$ , где  $x_2$  — как в пункте 6.

9. Пирамидальность  $\pi_1$  призмы  $\Pi_1$ , действующая подобно наклону ее главного сечения на угол  $(\beta_1)_{\pi_1} = \pi_1 n$  (см. пункт 5);  $\pi_1 < \frac{0,03 \text{ мм}}{nx_1}$ .

10. Пирамидальность  $\pi_2$  призмы  $\Pi_2$ , действующая подобно наклону ее главного сечения на угол  $(\alpha_2)_{\pi_2} = \pi_2 n$  (см. пункт 6);  $\pi_2 < \frac{0,03 \text{ мм}}{nx_2}$ .

Таким образом, имеется более 10 ошибок, влияющих на направление оптической оси каждой трубки. Предельные допуски для них достаточно жесткие для серийного производства и невыполнимые без юстировки. На практике суммарная погрешность из-за перечисленных выше ошибок в десятки раз превосходит допустимую величину, в нашем случае  $0,003 \text{ рад}$  за окуляром (или  $e_{ок} = 0,06 \text{ мм}$  в линейной мере). Для компенсации такой ошибки

приходится предусматривать не один, а даже два компенсатора: первый — для грубой, предварительной юстировки параллельности оптических осей трубок бинокля, второй — для окончательной, точной юстировки.

Любая из подвижек схемных деталей (сдвиг объектива, смещение обеих призм или сдвиг окуляра), вызывающая непараллельность оптических осей трубки, может быть использована для компенсации всех перечисленных ошибок при юстировке бинокля.

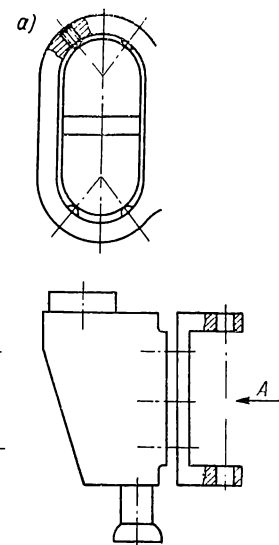
В биноклях фирмы «Цейс» для окончательной юстировки параллельности осей используется, например, поперечный сдвиг объективов на величину до  $0,5 \text{ мм}$  с помощью двойного эксцентрика. В некоторых моделях биноклей этой же фирмы применены эксцентрики не при объективах, а при окулярах, что, по-видимому, менее

Рис. 99. Схемы устройств для юстировки параллельности осей в биноклях с помощью стопоров, сдвигающих призмы (а), и наклонами шарнира (б)

рационально. Для грубой юстировки в биноклях фирмы «Цейс» имеется лишь одна возможность — наклон главных сечений призм за счет боковых прокладок, устанавливаемых на опорных плоскостях мостика.

В биноклях фирмы «Бауш и Ломб» грубая и окончательная юстировка параллельности осей выполняется смещениями призм в гнезде на мостике вдоль их главных сечений с помощью латунных сферических стопоров, ввинчиваемых в корпуса (рис. 99, а). Объективы не имеют никаких регулировок. При таком способе получается более простая и дешевая конструкция бинокля, но призмы находятся под воздействием местных напряжений в точках контактов со стопорами и часто у них откалываются углы.

В биноклях некоторых английских фирм для юстировки используется наклон призм с помощью стопоров вокруг осей, параллельных их главным сечениям.



В биноклях некоторых французских фирм юстировка параллельности осей выполняется также продольными подвижками призм, которые после установки на место закрепляются на мостике гипсовой. Гнезда под призмы не фрезеруются, и их можно свободно передвигать и поворачивать в процессе юстировки. Объективы не имеют юстировочных подвижек. Это также удешевляет и упрощает конструкцию, а гипсовка обеспечивает надежную сохранность заводской юстировки. Однако ремонт таких биноклей несколько затруднен.

Общим недостатком всех перечисленных способов юстировки параллельности осей биноклей является то, что сдвиги объектива, смещение и наклоны призм неизбежно приводят к децентрировке оптических систем труб и к порче качества изображения.

В биноклях старого выпуска с большим увеличением ( $\Gamma = 10\times$ ) параллельность оптических осей трубок к оси шарнира обеспечивалась регулировкой самого шарнира, который можно было при сборке наклонять в двух плоскостях по отношению к корпусам каждой из трубок (рис. 99, б). При такой конструкции подвижками призм  $П_1$  и  $П_2$  (рис. 98) можно центрировать оптические системы труб бинокля и получить высокое качество изображения, а при юстировке параллельности оптических осей труб за счет наклонов и разворотов самого шарнира сохранить центровку систем.

В современных отечественных биноклях для грубой юстировки используется наклон главных сечений призм на мостике на ограниченный угол боковыми прокладками под призмы, а для окончательной юстировки — сдвиг объектива в пределах до 0,5 мм с помощью двойного эксцентрика. Возникающая децентрировка 2-го рода объектива по отношению к окуляру на величину до 0,5 мм в обычных биноклях почти не влияет на качество изображения. В широкоугольных системах такая децентрировка уже не допустима.

В типовой технологический процесс сборки и юстировки биноклей входят следующие основные операции:

- сборка узлов — объективов, окуляров и узла шарнира;
- комплектовка объективов и окуляров по результатам измерений их фокусных расстояний для обеспечения в пределах заданных допусков равенства увеличений в трубах;

- сборка призм в корпусах, устранение перекоса изображений и закрепление призм в гнездах чеканкой;

- предварительная сборка, измерение непараллельности оптических осей и предварительное ее устранение посредством установки боковых прокладок в гнездах под призмы;

- чистка оптики, окончательная сборка и юстировка параллельности осей разворотами эксцентриков объективов, установка нуля диоптрийных шкал окуляров;



герметизация бинокля, комплектация, контроль и испытание бинокля.

Коллиматоры для контроля биноклей при сборке имеют большое разнообразие конструкций; наиболее известны следующие коллиматоры: многотрубный, двухтрубный с эталонной плоскостью и проекционный системы Захарьевского.

Многотрубные коллиматоры чаще всего состоят из трех коллиматорных труб, которые расположены так, что одна из них приходится напротив объектива неподвижной трубки бинокля, а вторая и третья — напротив объектива поворотной трубки бинокля при его двух крайних положениях. Визирные оси всех трех коллиматоров должны быть взаимно параллельны с высокой точностью, например для бинокля  $B8 \times 30$  с точностью не ниже  $10-20''$ . За испытуемым биноклем помещается перекидная трубка, с помощью которой можно наблюдать в правый или в левый окуляр бинокля. Коллиматор этого типа неудобен и малопроизводителен в работе. Основная его поверка — параллельности осей коллиматоров — затруднительна, так как расстояние между осями превышает 135 мм (база обычного бинокля).

В коллиматоре с эталонной плоскостью (рис 100, а) параллельность осей его труб  $K_1$  и  $K_2$  можно поверить с помощью подставной трубки  $T$ , которая устанавливается на плоской плите  $\Pi$  то под одной, то под другой трубой. Визирная ось самой трубки должна быть перпендикулярна ее опорной плоскости с точностью не ниже  $10''$ , что легко проверяется поворотом трубки на плите на пол-оборота. Благодаря эталонной плоскости  $\Pi$  устраняется недостаток — затруднительность поверки, имеющийся в многотрубных коллиматорах, однако неудобства в работе остаются и здесь.

Коллиматор проекционного типа системы Захарьевского, изображенный на рис. 100, б, отличается многими важными преимуществами. Схема его очень проста. Он состоит из двух линз: коллиматорной  $O_k$ , диаметр которой должен быть больше 160 мм, и проекционной  $O_n$  диаметром не менее 80 мм и с фокусным расстоянием около метра. В фокусе линзы  $O_k$  находится светящаяся точка  $S$ , например круглая ярко освещенная диафрагма малого размера, а в фокальной плоскости линзы  $O_n$  — матовый экран  $\mathcal{E}$ , на котором получается резкое уменьшенное изображение  $S'$  диафрагмы. Это изображение при работе не используется. Испытуемый бинокль помещается в параллельный ход лучей между линзами  $O_k$  и  $O_n$ , и каждая из его труб дает на экране увеличенное изображение  $S'_{лев}$  и  $S'_{пр}$  той же диафрагмы. Эти два блика совпадают друг с другом в случае, когда оси пучков лучей, выходящих из труб, взаимно параллельны. Если оси пучков не параллельны друг другу, на экране видны два блика. Требуется, чтобы расстояние между ними не превосходило заданного допуска. Если, например, фокусное расстояние проекционной линзы  $O_n$  равно 1 м, то допустимое расхождение бликов можно ограничить прямо-

угольником со сторонами  $4 \times 6$  мм при дивергенции осей пучков или со сторонами  $4 \times 12$  мм — при конвергенции. Меньшая сторона прямоугольника перпендикулярна в обоих случаях окулярной базе бинокля и соответствует угловому допуску  $15'$ . Стороны 6 и 12 мм соответствуют допускам 20 и  $40'$ .

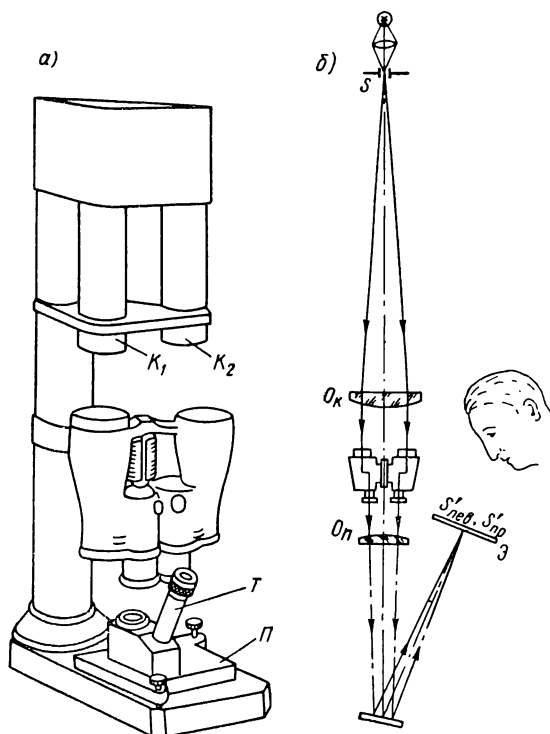


Рис. 100. Схема двухтрубного коллиматора (а) и проекционного коллиматора системы Захарьевского (б) для контроля биноклей

При юстировке бинокля наблюдают блик от поворотной трубки; в общем случае он описывает дугу окружности вокруг некоторого центра  $Ц$  (рис. 96, б), так как оптическая ось этой трубки не параллельна оси шарнира. Эксцентриками при объективе (а если необходимо, то и подвижками его призм  $П_1$  и  $П_2$ ) устраняют непараллельность осей — блик приходит в центр  $Ц$ . Затем эксцентриками объектива (а также при необходимости и призмами) приводят к центру  $Ц$  блик и от неподвижной трубки. Работа на коллиматоре очень удобна и производительна. Коллиматор практически не расстраивается и не нуждается в поверках. Это обеспечено тем, что ход лучей через все основные детали коллиматора является общим для обеих трубок бинокля. Поэтому сдвиги этих деталей

приводят лишь к совместному сдвигу бликов  $S'_{лев}$  и  $S'_{пр}$  по экрану без изменения их взаимоположения.

Коллиматор является универсальным: он пригоден для биноклей с любой предметной базой, любых конструкций и может быть применен для контроля почти всех основных требований к биноклю. Кроме параллельности оптических осей на коллиматоре легко проверить разность увеличений  $\Delta\Gamma/\Gamma$  и перекос изображений  $\alpha'_n$  в трубках, установку нуля диоптрийных шкал окуляров, наличие зазоров в шарнире и в окулярах.

После устранения непараллельности оптических осей труб блики  $S'_{лев}$  и  $S'_{пр}$  будут совмещены друг с другом. Если при наклоне бинокля блики не только переместятся по экрану, например вертикально вниз или вверх на расстояние  $a$ , но еще и разойдутся по высоте на  $\Delta a_{прод}$  и в сторону на  $\Delta a_{попер}$ , то значит, имеется разность увеличений в трубках  $\Delta\Gamma/\Gamma$  и перекос изображений  $\alpha_n$ . Величина  $\Delta a_{прод}$  является мерой разности увеличений, которая равна

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} = \frac{\Delta a_{прод}}{a} \cdot \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} 100\%, \quad (\text{VII.6})$$

а величина  $\Delta a_{попер}$  — мерой перекоса изображений, причем

$$\alpha'_n = \frac{\Delta a_{попер}}{a} \cdot \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} 3440. \quad (\text{VII.7})$$

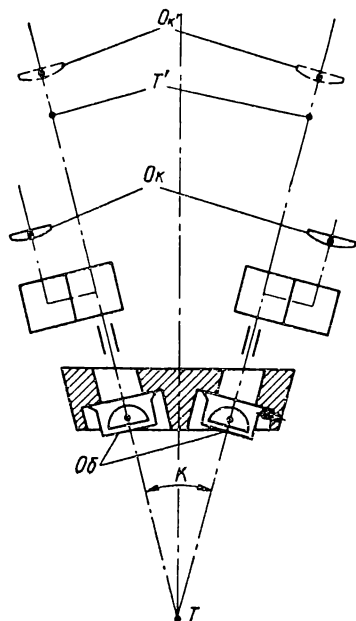


Рис. 101. Схема бинокулярного микроскопа

Конструктивно еще более удобна автоколлимационная схема проекционного коллиматора Захарьевского [18]. По аналогичной схеме устроен коллиматор французской фирмы «Клявэ» для контроля биноклей<sup>1</sup>.

Юстировка стереотруб выполняется аналогично юстировке биноклей: оптическая ось каждой трубы устанавливается параллельно оси шарнира и оси спаренной трубы. Устранение непараллельности осей производится наклонами и разворотами головных призм. Контроль параллельности выполняется на многотрубных коллиматорах.

Юстировка бинокулярных и стереоскопических микроскопов аналогична юстировке теле-

<sup>1</sup> L a c h e n a n d M. Appareil Clavé de vérification des conditions optiques imposées aux jumelles. — «Rev. d'optique», 1955, 34, N 9.

скопических систем. Рассмотрим юстировку стереомикроскопа типа Грену, схема которого дана на рис. 101. Оптические оси микроскопа, образующие угол конвергенции  $K$ , пересекаются в общей точке предмета  $T$ . Изображения этой точки  $T'$  за окулярами должны пересекаться также в общей точке. Это условие и обеспечивается юстировкой микроскопа. Прежде всего необходимо устранить биение изображения, наблюдаемое при повороте левой и правой окулярных коробок вокруг их осей вращения. Для этого необходимо совместить узловую точку каждого окуляра, точнее, их изображений  $Ok'$  за призмами, со своей осью вращения. Этого можно добиться сдвигом призмённого блока в коробке.

Далее надо добиться совмещения обоих изображений точки предмета поперечными сдвигами объективов  $Об$ . Оправы каждого из объективов для этого имеют три регулировочных стопора.

## Глава VIII

### ЮСТИРОВКА УГЛОМЕРНЫХ ПРИБОРОВ

#### 26. Классификация угломерных приборов и требования к их юстировке

**Назначение и типы угломерных приборов.** Угломерные приборы предназначены для измерения углов между точками в пространстве как разностей направлений на эти точки. Направление на каждую точку обычно задается в системе сферических координат и может быть определено двумя углами; например, направление на точку  $T$  в системе сферических координат местности может быть задано горизонтальным углом  $\varphi$  и вертикальным углом  $i$  его следа  $B$  на сфере (рис. 102). Горизонтальные углы отсчитываются от начального меридиана по часовой стрелке, если смотреть сверху — со стороны оси  $z$ ; вертикальные углы отсчитываются от горизонта в данной точке Земли — от плоскости экватора — вверх.

Угломерные приборы используются для различных целей, например астрономические приборы — для измерения координат светил, геодезические приборы — для измерения углов на местности, прицелы — для установки углов, необходимых при стрельбе в цель. Соответственно с этим применяются и различные обозначения углов: горизонтальный угол, отсчитанный по часовой стрелке от плоскости магнитного меридиана, называют азимутом, а тот же угол, отсчитанный от произвольной неподвижной точки (репера), — целиком; вертикальный угол, отсчитанный от горизонта, называют углом местности или углом места цели (чаще применяется в артиллерии), а угол, отсчитанный от зенита, — зенитным расстоянием (применяется в астрономии).

Угломерные приборы перед использованием должны быть определенным образом выверены и ориентированы на местности. Чтобы результаты измерения были правильны, визирная ось прибора при наведении по высоте должна описывать плоскости меридианов (дуги меридианов на сфере), а при наведении по горизонту в общем

Все угломерные приборы по конструктивной схеме можно подразделить на две большие группы.

Рис. 102. Задание направления на точку в системе сферических координат

тип I — приборы с поворотным визиром;

тип II — приборы с качающимся головным зеркалом (или измой).

В приборах второго типа при измерении углов поворачивают только головное зеркало (призму) вокруг одной из осей: горизонтальной (танковый орудийный прицел ТОПЧ) или вертикальной (пулеметный прицел ПП-1 [46]) или вокруг двух осей (панорамические приборы). Визирная труба при этом всегда остается неподвижной.

Перископы занимают промежуточное положение: в них для измерения вертикальных углов поворачивают головное зеркало или призму на горизонтальной оси, а при измерении горизонтальных углов вращают весь прибор вокруг вертикальной оси.

<sup>1</sup> Справочник по военной оптике. Под ред. С. И. Вавилова и М. В. Севостьяновой. М.—Л., ГИТТЛ, 1945, стр. 146.

Приборы первой группы отличаются простотой конструкции. В них, как правило, отсутствуют точные измерительные механизмы, так как измерение углов чаще всего производится непосредственно по угломерной шкале в поле зрения визира. Пределы измерения углов определяются величиной угла поля зрения объектива. Большие возможности здесь открывает широкоугольная оптика.

Приборы второй группы имеют более сложную конструктивную схему за счет введения отсчетных механизмов. Юстировка этих приборов несравненно сложнее, чем приборов первой группы.

В данной главе рассматривается теория юстировки угломерных приборов с поворотным визиром и качающимся головным зеркалом, т. е. приборов второй группы.

**Требования к юстировке угломерных приборов.** Визирная ось угломерного прибора в пространстве предметов при обратном ходе лучей, как уже говорилось, должна перемещаться:

при измерении вертикальных углов — строго по дуге меридиана;

при измерении горизонтальных углов — строго по дуге широтного круга, в частном случае наводки на горизонт — по дуге экватора.

Вследствие неизбежных ошибок изготовления и ориентирования угломерного прибора на местности наблюдается отступление действительной траектории визирной оси от названных номинальных траекторий. Отклонение визирной оси от плоскости меридиана называется уводом по вертикали или уводом от отвеса (по цеховому выражению — «нерезание») и обозначается  $\delta$ , а отступление визирной оси от линии горизонта называется уводом по горизонту и обозначается  $\eta$ .

Обе эти ошибки могут привести к погрешностям измерения углов, причем увод от отвеса может вызвать ошибку измерения горизонтального угла  $\Delta\varphi$  между точками, лежащими под различными углами места, а увод от горизонта может вызвать ошибку при измерении вертикального угла  $\Delta i$  между точками, расположенными в разных меридианах.

Чтобы избежать уводов в обоих направлениях — по вертикали и по горизонту, необходимо выполнить указанные выше два условия. Из этих условий вытекают следующие требования к юстировке приборов:

1) вертикальная ось вращения угломерного прибора должна быть установлена строго отвесно; отклонение оси от отвеса обозначается как **наклон вертикальной оси  $m$** ;

2) горизонтальная ось поворота визира или головного зеркала должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения; отклонение оси от указанного направления обозначается как **наклон горизонтальной оси  $l$** ;

3) визирная ось прибора в пространстве предметов должна быть перпендикулярна оси вращения, с которой непосредственно связаны поворотный визир или поворотное головное зеркало; неперпендикулярность оси визира или нормали головного зеркала к собственной оси поворота обозначается как *к о л л и м а ц и о н - н а я о ш и б к а k*.

В приборах с качающимся головным зеркалом, расположенным перед визиром, для выполнения последнего — третьего требования еще недостаточно устранения коллимационной ошибки *k* нормали зеркала, так как направление визирной оси в пространстве предметов зависит также и от направления оси визира относительно оси поворота головного зеркала. Поэтому в приборах второго типа для правильной работы требуется, чтобы ось визира (или ее изображение в обратном ходе лучей непосредственно перед головным зеркалом) была перпендикулярна оси поворота зеркала; отступление от этого требования обозначается как *н а к л о н о с и в и з и р а q*.

Все эти ошибки при юстировке угломерных приборов должны быть устранены так, чтобы уводы визирной оси от отвеса ( $\delta$ ) и от горизонта ( $\eta$ ) или ошибки измерения горизонтальных ( $\Delta\phi$ ) и вертикальных ( $\Delta i$ ) углов не превышали установленных допусков. Для полевых приборов эти допуски составляют менее одной тысячной дистанции (00-01) или 3,6'; для геодезических приборов они значительно строже. Поэтому и остаточные ошибки юстировки *k*, *l*, *m*, *q* имеют также небольшую величину.

Конструктора и технолога, а также эксплуатационников угломерных приборов интересует количественная связь между ошибками юстировки прибора *k*, *l*, *m*, *q* и погрешностями измерения  $\delta$ ,  $\eta$ ,  $\Delta\phi$ ,  $\Delta i$ . Такие задачи решались для разных угломерных приборов, например для перископа с качающимся головным зеркалом [19; 28; 41; 48], для панорамических приборов [41; 48]. Почти в любом руководстве и учебном пособии по геодезическим приборам дается теория и описывается процесс поверки и выверки этих приборов [11]. В настоящей главе рассмотрены совместно юстировку всех перечисленных выше угломерных приборов.

При исследовании и выполнении юстировки угломерных приборов необходимо:

найти влияние каждой из первичных ошибок прибора на точность измерения горизонтальных и вертикальных углов;

решить вопрос о возможности и степени взаимокompенсации отдельных ошибок при юстировке;

определить необходимое и достаточное число регулировочных компенсаторов;

указать способы выявления отдельных ошибок юстировки и их устранения, а также наметить наиболее рациональную последовательность процесса контроля и регулировки прибора.



С целью упрощения решения задачи каждая ошибка рассматривается отдельно с точностью до величин первого порядка малости и без учета ошибок изготовления оптических и механических деталей. Чаще всего так же раздельно устраняют их при регулировке прибора.

**Связь между уводами и ошибками углов.** При контроле угломерных приборов обнаруживаются, как было сказано, следующие ошибки.

Траектория визирной оси (*ТВО*) при наведении по высоте отклоняется от отвеса, причем в общем случае угол отклонения

визирной оси от начального меридиана равен  $a_0$  — на горизонте и  $a_i$  — при визировании точки *B*, расположенной под углом места *i* (рис. 103, *a*).

Траектория визирной оси при наведении по горизонту также отклоняется от линии горизонта. Увод от горизонта равен разности погрешностей вертикальных углов при визировании точек 1 и 2, расположенных под различными азимутальными углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , т. е.

Рис. 103. Связь между уводом от отвеса и накопленной ошибкой горизонтального угла  $\eta = \Delta i_{\varphi_2} - \Delta i_{\varphi_1}$ , (VIII.1)

где  $\Delta i_{\varphi_1}$  — ошибка вертикального угла при наведении на точку 1 под углом  $\varphi_1$ ;

$\Delta i_{\varphi_2}$  — то же при наведении на точку 2 под углом  $\varphi_2$ .

Рассмотрим более подробно влияние увода визирной оси от отвеса.

На рис. 103, *a* на сфере условно нанесена в виде жирной извилистой линии траектория визирной оси (*ТВО*) угломерного прибора, описываемая при визировании в пространстве предметов в вертикальном направлении без изменения отсчета на лимбе горизонтальных углов. Для выявления увода от вертикали делают первую наводку на горизонтальную точку отвеса (вид поля изображен на рис. 103, *б*), а затем, не изменяя горизонтальной наводки, визируют на точку *B* под углом места *i*. Как видно из рис. 103, *б*, центр перекрестия при этом сместится с отвеса на угол  $\delta_i$ , величиной которого и оценивается увод от вертикали. В данном случае увод положительный, так как перекрестие сместилось в сторону положительных горизонтальных углов.

Проведя через точку  $B$  меридиан, найдем величину ошибки горизонтального угла —  $\Delta\varphi_{0i}$ , накопленную при визировании от горизонта ( $i = 0$ ) до угла места  $i$ . Эта ошибка угла заключена между меридианом точки  $B$  и плоскостью отвеса. На рис. 103,  $a$  ошибка  $\Delta\varphi_{0i}$  имеет отрицательный знак, так как

$$\Delta\varphi_{0i} = \varphi_0 - \varphi_u < 0,$$

где  $\varphi_0$  — отсчет по горизонтальному лимбу при наводке в точку отвеса на горизонте;

$\varphi_u$  — истинный угол точки визирования  $B$ , величина которого больше величины отсчета  $\varphi_0$ .

Увод  $\delta_i$  как расстояние от центра перекрестия до отвеса измеряется по перпендикуляру к отвесу, т. е. по дуге большого круга, проведенной через точку визирования  $B$  перпендикулярно плоскости отвеса. Прямые углы на рис. 103,  $a$  отмечены дугами с точкой.

Из верхнего прямоугольного сферического треугольника  $I$  по формуле синусов получится

$$\frac{-\sin \Delta\varphi_{0i}}{\sin \delta_i} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin (90^\circ - i)}$$

или после преобразования

$$\sin \Delta\varphi_{0i} = -\frac{\sin \delta_i}{\cos i}. \quad (\text{VIII.2})$$

Для углов места, не очень близких  $90^\circ$ , например условно до  $\arcsin i < 0,1$  ( $i < 84^\circ$ ), и при условии, что в приборах обычно допустимы уводы лишь малой величины, ошибка горизонтального угла будет также малой величиной первого порядка, и тогда формула (VIII.2) упростится к виду

$$\Delta\varphi_{0i} = -\frac{\delta_i}{\cos i}. \quad (\text{VIII.2a})$$

Для точек, близких к зениту, когда угол  $i \rightarrow 90^\circ$ , например для точки  $TBO$ , совпадающей с плоскостью рис. 103,  $a$ , будет

$$i = 90^\circ - \delta_{90^\circ},$$

где  $\delta_{90^\circ}$  — малая угловая величина.

По формуле (VIII.2) получится

$$\sin \Delta\varphi_{0i} = -\frac{\sin \delta_{90^\circ}}{\cos (90^\circ - \delta_{90^\circ})} = -1; \quad \Delta\varphi_{0i} = -90^\circ.$$

В этом случае ошибка горизонтального угла за счет увода по вертикали достигает величины  $90^\circ$ . Отсюда получается вывод о том, что азимут точек, расположенных вблизи зенита, не может быть измерен точно, так как ошибка достигает огромной величины — вплоть до  $90^\circ$ .

Найдем связь между уводом  $\delta_i$  и угловыми расстояниями  $a_0$  и  $a_i$  до точек траектории визирной оси. Из сферического треугольника, составленного из двух смежных треугольников *I* и *II*, по формуле синусов напишем

$$\sin a_i = \sin(a_0 - \Delta\varphi_{0i}) \frac{\cos i}{\sin \omega}.$$

Для угла  $\omega$  из большого прямоугольного треугольника *III* получим

$$\sin \omega = \frac{\cos a_0}{\cos(a_i - \delta_i)}.$$

Подстановка и преобразования дают

$$\sin a_i = (\operatorname{tg} a_0 \cos \Delta\varphi_{0i} - \sin \Delta\varphi_{0i}) \cos i \cos(a_i - \delta_i).$$

Учтя формулу (VIII.2), напишем

$$\sin a_i = (\operatorname{tg} a_0 \cos \Delta\varphi_{0i} \cos i + \sin \delta_i) \cos(a_i - \delta_i). \quad (\text{VIII.3})$$

Для углов места, не очень близких  $90^\circ$ , и для малых величин  $a_0$ ,  $a_i$ ,  $\delta_i$  можно написать

$$a_i = a_0 \cos i + \delta_i, \quad (\text{VIII.3a})$$

откуда окончательно получится

$$\delta_i = a_i - a_0 \cos i. \quad (\text{VIII.4})$$

Как видно из рис. 103,  $a$  и из формулы (VIII.4), при угле места, близком  $90^\circ$ , увод  $\delta_i$  становится равным расстоянию от начального меридиана до точки визирования.

С помощью формулы (VIII.4) преобразуем формулу (VIII.2) к виду

$$\Delta\varphi_{0i} = a_0 - \frac{a_i}{\cos i}. \quad (\text{VIII.26})$$

Полученные формулы (VIII.2a), (VIII.26) и (VIII.4), связывающие уводы визирной оси от отвеса с накопленной погрешностью горизонтального угла, пригодны для любых угломерных приборов.

## 27. Юстировка угломерных приборов с поворотным визиром типа теодолита

**Основные ошибки угломерного прибора с поворотным визиром.** Рассмотрим влияние основных ошибок выверки теодолита:

- 1) коллимационной ошибки  $k$ ;
- 2) наклона горизонтальной оси  $l$ ;
- 3) наклона вертикальной оси  $m$ .

К о л л и м а ц и о н н о й о ш и б к о й в данном случае называется неперпендикулярность оси визира по отношению к его горизонтальной оси поворота на малый угол  $k$  (рис. 104).

жирной линией), точки которой равно удалены от начального меридиана на угол  $k$ , измеряемый также малой дугой  $k$ ; иначе говоря,

По формуле (VIII.2б) для накопленной ошибки горизонтального угла произвольной точки визирования  $B$ , расположенной под углом места  $i$  (не очень близком  $90^\circ$ ), имеем

При малых углах местности формула упростится к виду

При очень больших углах места по формуле (VIII.2) или из рис. 104 получится

что было уже показано и ранее.

Величину ошибки вертикального угла найдем из прямоугольного сферического треугольника  $I$ , откуда

243

где  $i$  — истинный угол места точки визирования  $B$ , измеренный по дуге меридиана через эту точку;

$i'$  — угол места этой же точки визирования, отсчитанный по вертикальному лимбу и измеренный по дуге начального меридиана до плоскости визирования, которая проходит через точку  $B$  и опирается на ось поворота трубы.

Ошибка вертикального угла равна разности этих углов, т. е.  $\Delta i = i' - i$ .

Преобразуя предыдущую формулу, получим

$$\sin i' = \frac{\sin i}{\cos k} = \sin(i + \Delta i) = \sin i \cos \Delta i + \cos i \sin \Delta i \approx \sin i + \Delta i \cos i.$$

Отсюда

$$\Delta i_k = \left( \frac{1}{\cos k} - 1 \right) \operatorname{tg} i \approx \left( \frac{1}{1 - 0,5k^2} - 1 \right) \operatorname{tg} i$$

или окончательно

$$\Delta i_k \approx \frac{k^2}{2} \operatorname{tg} i. \quad (\text{VIII.6})$$

При  $i' = 90^\circ$   $i = 90^\circ - k$ , значит,  $\Delta i_k = k$ .

Таким образом, накопленная ошибка вертикального угла изменяется в пределах

$$0 \leq \Delta i_k \leq k.$$

Для не очень больших углов места (условно до  $\operatorname{arctg} i < 10$ ) ошибкой вертикального угла  $\Delta i_k$  можно пренебречь как малой величиной второго порядка. На рис. 104 ошибка вертикального угла  $\Delta i_k$  изображается отрезком дуги начального меридиана, отсекаемым широтным кругом через точку визирования  $B$  и плоскостью визирования.

Величину увода от отвеса  $\delta_{ki}$  можно найти, если провести плоскость отвеса, проходящего через горизонтальную точку траектории визирной оси; в данном случае отвес не пересекает, а касается траектории визирной оси  $TBO$ .

Наклон горизонтальной оси здесь выражается углом  $l$ , который горизонтальная ось поворота визирной трубы составляет с перпендикуляром к вертикальной оси вращения прибора (рис. 105, б). Поскольку не имеется никаких других ошибок, то визирная ось перпендикулярна оси поворота; поэтому при наклоне этой последней оси на угол  $l$  визирная ось опишет наклонную плоскость и ее траектория  $TBO$  изобразится в виде дуги большого круга (на рис. 105, а показана жирной линией), которая на горизонте пересекается с начальным меридианом и составляет с ним тот же угол  $l$ .

Выбрав на траектории визирной оси произвольную точку  $B$ , проведем через эту точку меридиан. Истинные углы точки наводки  $B$  будут: горизонтальный ( $-\Delta \varphi_{li}$ ), вертикальный  $-i$ . Отсчитанные же по лимбам углы (если предположить, что при наведении

на горизонтальную точку начального меридиана отсчеты по обоим лимбам были нулевые) равны: горизонтальный — нулю, вертикальный —  $i'$ . Угол  $i'$  изображается дугой траектории визирной оси от горизонта до точки  $B$ .

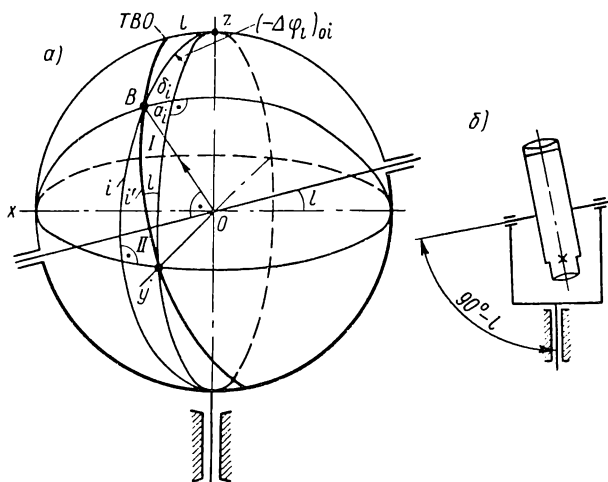


Рис. 105. Наклон горизонтальной оси вращения трубы теодолита

Проведя через визирную точку  $B$  дугу большого круга перпендикулярно начальному меридиану, получим прямоугольный сферический треугольник  $I$ , из которого следует

$$\sin a_i = \sin l \sin i'.$$

Из прилежащего прямоугольного треугольника  $II$  получится

$$\sin i' = \frac{\sin i}{\cos l}. \quad (*)$$

Подстановкой и после преобразований найдем

$$\sin a_i = \operatorname{tg} l \sin i.$$

Поскольку горизонтальная точка траектории визирной оси совпадает с начальным меридианом, то  $a_0 = 0$  и поэтому  $a_i = \delta_i$ .

По формуле (VIII.2) после преобразований найдем

$$\sin (\Delta\varphi_l)_{oi} = -\operatorname{tg} l \operatorname{tg} i \approx -l \operatorname{tg} i. \quad (\text{VIII.7})$$

При  $i' = 90^\circ$ , как видно из рис. 105,  $a$ ,  $i = 90^\circ - l$ ; поэтому  $\sin (\Delta\varphi_l)_{oi} = -1$ ;  $(\Delta\varphi_l)_{oi} = -90^\circ$ .

Используя формулу (\*), для ошибки вертикального угла аналогично выводу формулы (VIII.6) получим

$$\Delta i_l = \frac{l^2}{2} \operatorname{tg} i. \quad (\text{VIII.8})$$

Величина этой ошибки изменяется в пределах

$$0 \leq \Delta i_t \leq l,$$

т. е. для точек, не очень близких к зениту, ошибкой вертикального угла можно пренебречь как малой величиной второго порядка.

Наклон вертикальной оси в данном случае возникает вследствие неточной установки (выверки) угломерного прибора перед измерением (рис. 106, а).

При номинальной установке прибора его вертикальная ось вращения должна быть направлена в зенит — параллельно оси  $z$ . Предположим, что из этого положения весь прибор наклонен

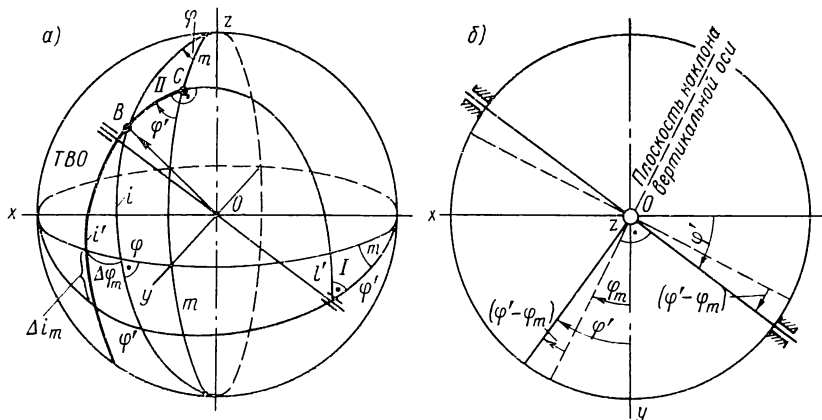


Рис. 106. Неотвесность вертикальной оси вращения угломерного прибора

вперед в плоскости начального меридиана  $yz$  на небольшой угол  $m$  так, что след вертикальной оси вращения переместился из точки зенита в точку  $C$ . На такой же угол  $m$  наклонится и плоскость горизонтального лимба.

Пусть в начальный момент горизонтальная ось поворота визирной трубы располагалась по оси  $x$ ; тогда наклон прибора в плоскости  $yz$  никак не скажется на положении горизонтальной оси. Если же навести трубу на произвольную точку  $B$ , расположенную под углами  $\varphi$  и  $i$ , то появятся ошибки в измерении обоих углов, так как отсчитанные по лимбам углы поворота — горизонтальный  $\varphi'$  и вертикальный  $i'$  — будут отличаться от указанных истинных значений углов.

Найдем накопленную ошибку горизонтального угла  $\Delta\varphi_m$ . Заметим, что при развороте прибора вокруг вертикальной оси появляется наклон горизонтальной оси переменной величины: при развороте от начального положения (когда ось поворота трубы была горизонтальна) левый конец оси поворота опустится на угол  $l'$ . Таким образом, рассматриваемый здесь слу-

чай привелся к предыдущему. Из прямоугольного треугольника  $I$  по формуле тангенсов напишем [19, формула (9\*)]

$$\operatorname{tg} l' = \operatorname{tg} m \sin \varphi'.$$

Подстановкой в формулу (VIII.7) сразу же получим

$$\begin{aligned} \sin (\Delta \varphi_m)_{oi} &= \operatorname{tg} l' \operatorname{tg} i = \operatorname{tg} m \sin \varphi' \operatorname{tg} i \approx \\ &\approx m \sin \varphi' \operatorname{tg} i. \end{aligned} \quad (\text{VIII.9})$$

Ошибка горизонтального угла является малой величиной первого порядка, пока углы места  $i$  не очень велики, например до  $\operatorname{arctg} i < 10$ . При этом условии можно написать

$$(\Delta \varphi_m)_{oi} = m \sin \varphi \operatorname{tg} i. \quad (\text{VIII.9a})$$

Определим ошибку вертикального угла. При наводке на точку  $B$  истинный угол места измеряется дугой меридиана  $i$  от горизонта до этой точки, тогда как отсчитанный по вертикальному лимбу угол  $i'$  измеряется от наклоненной плоскости горизонтального лимба до точки  $B$  по траектории визирной оси  $TBO$  (показана жирной кривой).

Из треугольника  $II$  по формуле синусов напишем

$$\cos i' = \cos i \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi'}.$$

Поскольку  $i' = i + \Delta i_m$ ;  $\varphi' = \varphi + \Delta \varphi_m$ , то полученную формулу преобразуем к виду

$$\cos i \cos \Delta i_m - \sin i \sin \Delta i_m = \frac{\cos i \sin \varphi}{\sin \varphi \cos (\Delta \varphi_m)_{oi} + \cos \varphi \sin (\Delta \varphi_m)_{oi}}.$$

Для не очень больших углов местности (до  $i < 80^\circ$ ) ошибка вертикального угла  $\Delta i_m$  и ошибка горизонтального угла  $\Delta \varphi_m$  являются малыми величинами первого порядка. С учетом этого из предыдущей формулы получим

$$\Delta i_m \approx \left( 1 - \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi + (\Delta \varphi_m)_{oi} \cos \varphi} \right) \operatorname{ctg} i \approx (\Delta \varphi_m)_{oi} \operatorname{ctg} \varphi \operatorname{ctg} i.$$

Подставляя из формулы (VIII.9a) величину накопленной ошибки горизонтального угла, для ошибки вертикального угла найдем окончательно

$$\Delta i_m = m \cos \varphi. \quad (\text{VIII.10})$$

В отличие от предыдущих ошибок юстировки наклон вертикальной оси вызывает погрешности первого порядка при измерении обоих углов — как горизонтального, так и вертикального.

В общем случае вертикальная ось вращения прибора будет наклонена не в плоскости начального меридиана, а под любым углом  $\varphi_m$  к этой плоскости (рис. 106, б); при этом формулы для накопленных ошибок углов изменятся к виду

$$(\Delta \varphi_m)_{oi} = m \sin (\varphi - \varphi_m) \operatorname{tg} i \quad (\text{VIII.11})$$



и аналогично

$$\Delta i_m = m \cos (\varphi - \varphi_m). \quad (\text{VIII.12})$$

**Полевая выверка теодолита.** Полученные выше формулы позволяют вычислить суммарную ошибку измерения углов между точками.

Пусть измеряется угол между двумя точками с угловыми координатами  $\varphi_1, i_1$  и  $\varphi_2, i_2$  при условии, что теодолит имеет все три ошибки выверки; тогда суммарная погрешность измерения угла

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{12} = \Delta \varphi_k + \Delta \varphi_l + \Delta \varphi_m = & k (\sec i_2 - \sec i_1) + \\ & + l (\operatorname{tg} i_2 - \operatorname{tg} i_1) + m [\sin (\varphi_1 - \varphi_m) \operatorname{tg} i_1 - \\ & - \sin (\varphi_2 - \varphi_m) \operatorname{tg} i_2] \end{aligned} \quad (\text{VIII.13})$$

и соответственно

$$\Delta i_{12} = \Delta i_m = m [\cos (\varphi_1 - \varphi_m) - \cos (\varphi_2 - \varphi_m)]. \quad (\text{VIII.14})$$

Эти погрешности  $\Delta \varphi_{12}$  и  $\Delta i_{12}$  не должны превосходить установленных допусков, величины которых определяются точностью прибора. Например, суммарная ошибка технического теодолита ТТ-30" не должна превосходить 30".

Очень важен вопрос о возможности взаимной компенсации ошибок выверки. Из формулы (VIII.13) видно, что третья ошибка  $\Delta \varphi_m$  — от наклона  $m$  вертикальной оси вращения — не может быть скомпенсирована ни первой  $\Delta \varphi_k$ , ни второй ошибкой  $\Delta \varphi_l$ , так как величина  $\Delta \varphi_m$  зависит не только от угла места, но также и от горизонтального угла; кроме того, наклон вертикальной оси дает погрешность первого порядка при измерении и вертикальных углов, тогда как ни коллимационная ошибка, ни наклон горизонтальной оси такой ошибки не вызывают.

Можно показать, что первая  $k$  и вторая  $l$  ошибки взаимно также почти не компенсируются. Рассмотрим это для частного случая, когда одна из точек, например первая, лежит на горизонте ( $\varphi_1, i_1 = 0$ ), а вторая имеет угловые координаты  $\varphi_2, i_2$ ; в этом случае получится

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{12} = & k (\sec i_2 - 1) + l \operatorname{tg} i_2 - \\ & - m \sin (\varphi_2 - \varphi_m) \operatorname{tg} i_2. \end{aligned} \quad (\text{VIII.13a})$$

В табл. 13 в первой и второй строках приводятся значения переменных коэффициентов для ошибок  $k$  и  $l$  в зависимости от угла места  $i_2$  второй точки, а в нижней строке — их разности. Видно, что удовлетворительной взаимокомпенсации ошибок не получить, так как разности коэффициентов имеют тот же порядок величин, что и сами коэффициенты.

Таким образом, приходим к следующим выводам:

1) ошибки юстировки теодолита  $k, l, m$  взаимно не компенсируются и должны устраняться каждая отдельно, если их величины превосходят допустимые значения;

**Передаточные коэффициенты  
для первичных ошибок  $k$  и  $l$  теодолита**

Коэффициенты $\frac{\Delta\varphi_k}{k}$ ; $\frac{\Delta\varphi_l}{l}$	Величина угла $i_2$ в град								
	—30	—15	0	15	30	45	60	75	90
$\sec i_2 - 1$	0,16	0,04	0	0,04	0,16	0,41	1,00	2,87	$k^{-1}$
$\operatorname{tg} i_2$	—0,58	—0,27	0	0,27	0,58	1,00	1,73	3,73	$l^{-1}$
$\operatorname{tg} i_2 -$ $(\sec i_2 - 1)$	—0,74	—0,31	0	0,23	0,42	0,59	0,73	0,86	$\frac{k-l}{kl}$

2) наиболее опасной ошибкой является наклон вертикальной оси  $m$ , так как он вызывает погрешности первого порядка при измерениях как горизонтальных, так и вертикальных углов;

3) ошибки юстировки — коллимационная  $k$  и наклон горизонтальной оси  $l$  — вызывают погрешности лишь при измерении горизонтальных углов между разновысокими точками.

Рассмотрим рациональную последовательность выявления и раздельного устранения ошибок угломерных приборов типа теодолита, имеющих перевод визирной трубы через зенит в процессе их выверки в полевых условиях. Целесообразно вначале устранить наклон вертикальной оси вращения инструмента, затем коллимационную ошибку и, наконец, наклон горизонтальной оси поворота трубы.

**Устранение наклона вертикальной оси вращения.** Эта выверка выполняется с помощью уровня, связанного с поворотной частью прибора, например с алидадой горизонтального лимба. Уровень должен обладать чувствительностью, которая выше точности самого угломерного прибора.

Пусть вертикальная ось прибора наклонена относительно отвеса на угол  $m$  (рис. 107, *a*). Перечислим операции, необходимые для установки оси вращения отвесно.

1. Винтами при уровне устанавливают его ось горизонтально, выводя пузырек на середину (положение  $I$ ).

2. Повернув лимб вокруг вертикальной оси на  $180^\circ$ , отсчитывают величину смещения пузырька уровня, которое равно удвоенному углу наклона  $2m$  вертикальной оси в плоскости рис. 107, *a* и происходит в сторону, противоположную наклону: при наклоне оси влево пузырек смещается вправо (положение  $II$ ).

3. Выявив таким образом величину и направление наклона вертикальной оси, устраняют эту ошибку. Для этого винтами

треножника наклоняют инструмент так, чтобы устранить половину смещения пузырька уровня; вторую половину смещения пузырька устраняют винтами при уровне.

Затем уточняют выверку повторным выполнением всех трех операций.

Устранив ошибку  $m$  в одной плоскости, поворачивают алидаду с уровнем на  $90^\circ$  и производят выверку в перпендикулярном направлении. Для ускорения выверки, а главное для непрерывного контроля за отвесностью вертикальной оси обычно применяют

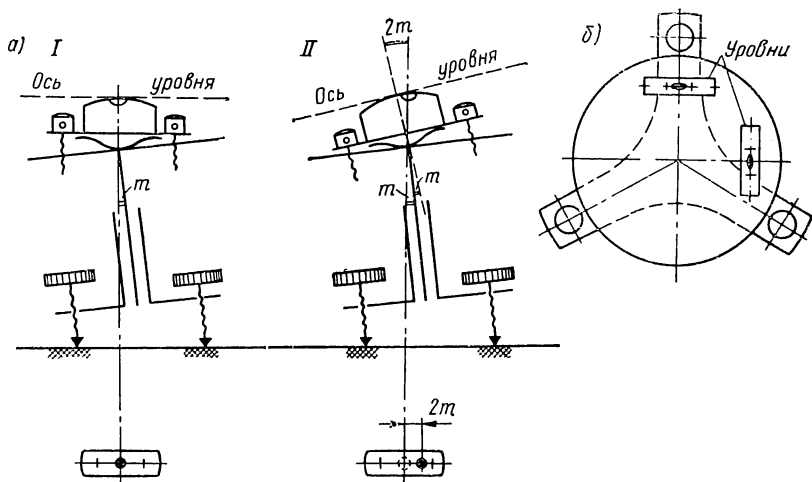


Рис. 107. Устранение неотвесности вертикальной оси вращения угломерного прибора при помощи уровня

два одинаковых уровня, закрепленных взаимно перпендикулярно, на алидаде горизонтального лимба (рис. 107, б).

Заметим, что любой угломерный прибор, применяемый для измерения углов на местности, обязательно должен быть снабжен уровнем для установки вертикальной оси вращения в отвесное положение. Иногда прибор не имеет собственного уровня; тогда на его корпусе делается точно обработанная плоская площадка, которая строго перпендикулярна вертикальной оси вращения инструмента и горизонтируется наклонами всего прибора с помощью накладного квадранта или уровня.

После произведенной выверки можно считать ошибку  $m$  равной или близкой нулю; тогда в формуле (VIII.13а) остаются только два первых слагаемых, а формула (VIII.14) становится равной нулю.

**Устранение коллимационной ошибки.** Характер влияния ошибок  $k$  и  $l$  при изменении вертикальной наводки в пределах от нуля до  $i = 90^\circ$  примерно одинаков: с увеличением угла  $i$  влияние обеих

ошибок на точность измерения горизонтальных углов возрастает. Эти ошибки проще всего отделить друг от друга, если перевести визирную трубу через зенит; при этом разность тангенса при ошибке  $l$  в формуле (VIII.13) будет равна нулю, а коэффициент при ошибке  $k$  будет равен двум, т. е. коллимационная ошибка при переводе трубы через зенит удвоится.

На рис. 108 показан процесс проверки и устранения коллимационной ошибки, который заключается в следующем.

1. Трубу наводят в точку  $T$  вблизи горизонта; снимают отсчет  $\varphi_I$  по горизонтальному лимбу, когда круг вертикального

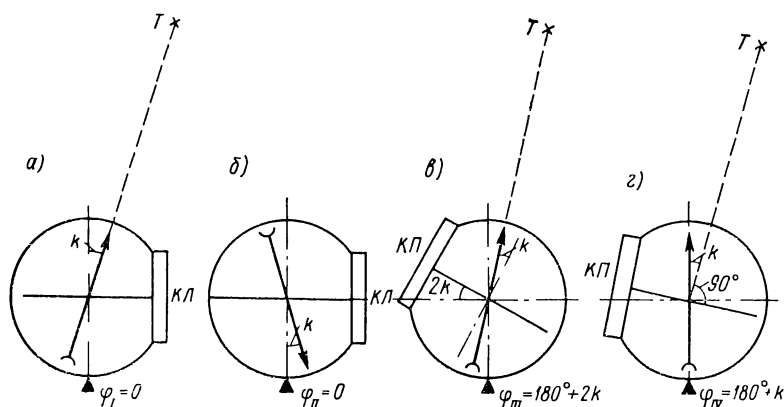


Рис. 108. Устранение коллимационной ошибки трубы теодолита

лимба находится слева (кратко  $КЛ$  — «круг лево»). Предположим, что отсчет  $\varphi_I = 0$  (рис. 108, а).

2. Трубу переводят через зенит, после чего визирная ось займет зеркальное положение при неизменном горизонтальном отсчете  $\varphi_{II} = \varphi_I = 0$  (рис. 108, б).

3. Трубу с алидадой горизонтального лимба поворачивают вокруг вертикальной оси и повторно наводят на ту же точку  $T$ , но уже при круге справа ( $КП$ ); отсчет  $\varphi_{III}$  по горизонтальному лимбу будет равен  $\varphi_{III} = 180^\circ + 2k$ . Таким образом выявится величина коллимационной ошибки (рис. 108, в).

4. Трубу устанавливают под углом  $k$  к направлению на точку  $T$ , получив отсчет  $\varphi_{IV} = 180^\circ + k$  (рис. 108, г).

5. Устраняют коллимационную ошибку, наводя визирную ось трубы на точку  $T$  поперечным смещением сетки с помощью боковых регулировочных винтов при ней.

После устранения коллимационной ошибки в формуле (VIII.13а) останется только второе слагаемое — погрешность от наклона горизонтальной оси.

**Устранение наклона горизонтальной оси поворота трубы.** Поскольку влияние этой ошибки на точность измерения горизон-

тальных углов возрастает пропорционально тангенсу вертикального угла, то при поверке теодолита в полевых условиях выбирают высокую точку наводки  $T$  (рис. 109).

Для устранения наклона горизонтальной оси необходимо выполнить три операции.

1. Навести трубу в точку  $T$ , например при  $KL$ ; опустить трубу и снять первый отсчет  $h_I$  по горизонтальной рейке (рис. 109, а).

2. Перевести трубу через зенит, повернуть алидаду горизонтального лимба на  $180^\circ$  (в положение  $K\Pi$ ), навести трубу в ту же точку  $T$ ; опустить трубу и снять второй отсчет  $h_{II}$  по рейке (рис. 109, б).

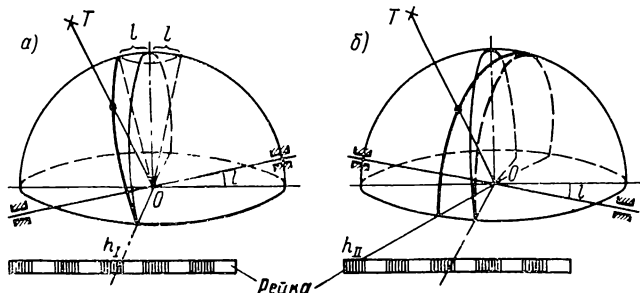


Рис. 109. Устранение наклона горизонтальной оси вращения трубы теодолита с помощью рейки

Если отсчеты  $h_{II}$  и  $h_I$  равны друг другу, то наклон горизонтальной оси отсутствует. При наличии наклона  $l$  поворот алидады на пол-оборота меняет знак ошибки на обратный. Если алидаду лимба повернуть точно на  $180^\circ$ , то отсчет по горизонтальной рейке при второй наводке трубы не изменился бы, т. е. было бы  $h_{II} = h_I$ ; но траектория визирной оси при вертикальном наведении трубы прошла бы не через высокую точку  $T$ , а левее. Направить трубу в точку  $T$  можно только дополнительным поворотом алидады горизонтального лимба на угол  $\Delta\varphi_l = 2l \operatorname{tg} i$ , где  $i$  — угол места точки  $T$ . Соответственно углу  $\Delta\varphi_l$  изменится и отсчет по горизонтальной рейке при второй наводке трубы.

3. Для устранения наклона горизонтальной оси поворотом алидады горизонтального лимба в обратном направлении установить трубу на средний отсчет  $h_{cp}$  по рейке, причем  $h_{cp} = \frac{1}{2} (h_I + h_{II})$ ; поднять трубу на высоту точки  $T$  и винтами при лагере наклонить горизонтальную ось поворота так, чтобы перекрестие трубы совместить с этой точкой  $T$ .

После этого будут устранены все три ошибки теодолита. Однако при выверке прибора каждая из трех ошибок не устраняется до нуля; поэтому важно уметь определять допуски на остаточные

ошибки выверки прибора. Частично такая задача решена А. Н. Захарьевским [19, стр. 29—31].

**О поверке угломерных приборов типа АСТ, ПАБ-2.** Описанный способ поверки пригоден только для угломерных приборов, имеющих перевод визирной трубы через зенит. Однако у многих приборов такой возможности нет; например, трубы артиллерийской стереотрубы АСТ, монокуляр перископической артиллерийской буссоли ПАБ-2 можно наклонять лишь в пределах ограниченного угла по вертикали. В этих случаях поверка делается с помощью отвеса, относительно которого и наблюдаются уводы визирной оси по вертикали.

Формулу (VIII.13а) с помощью формулы (VIII.2а) можно привести к виду

$$\delta_{12} = \delta_k + \delta_l + \delta_m = k \times (\cos i_2 - 1) - l \sin i_2 + m \sin (\varphi_2 - \varphi_m) \sin i_2. \quad (\text{VIII.15})$$

Для увода от горизонта из формулы (VIII.14) с помощью формулы (VIII.1) получим

$$\eta_{12} = m [\cos (\varphi_2 - \varphi_m) - \cos (\varphi_1 - \varphi_m)]. \quad (\text{VIII.14a})$$

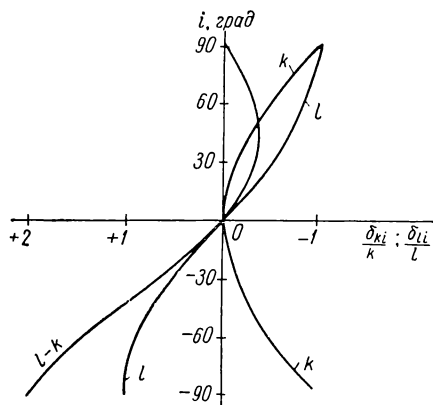


Рис. 110. График уводов от отвеса вследствие ошибок  $k$  и  $l$  приборов типа теодолита

Каждая из трех первичных ошибок вызывает различный по характеру увод по вертикали (рис. 110). Коллимационная ошибка  $k$  дает увод, величина которого не зависит от знака вертикального угла; в цеховой практике такой увод называют кривым. Наклон горизонтальной оси  $l$  дает знакопеременный увод, величина которого при равных по величине вертикальных углах одинакова; такой увод называют косым. Эти признаки и позволяют отличить ошибки  $k$  и  $l$  друг от друга. Из рис. 110 видно, что эти ошибки взаимно не компенсируются.

Заметим, что в приборах для относительно грубых измерений углов и при ограниченных пределах установок трубы по вертикали могут даже и не потребоваться регулировки для устранения ошибок  $k$  и  $l$ . При указанных условиях на эти ошибки получаются столь широкие допуски, что они легко выдерживаются технологически при изготовлении деталей.

В приборах для относительно грубых измерений углов, какими являются стереотруба АСТ и буссоль ПАБ-2, для установки вертикальной оси отвесно применяют сферический уровень, заменяющий два взаимно перпендикулярных цилиндрических уровня малой чувствительности.

## 28. Юстировка угломерных приборов с качающимся головным зеркалом типа перископа

**Ошибки регулировки угломерного прибора с качающимся головным зеркалом.** Для наведения визирной оси перископа по высоте используют поворотное на горизонтальной оси головное зеркало или головную прямоугольную призму, иногда призму с крышей, а при больших пределах визирования — куб-призму. Для горизонтального обзора вращают весь перископ вокруг вертикальной оси. На точность измерения углов влияет как юстировка визирной трубы, расположенной за головным зеркалом, так и юстировка самого головного зеркала, а также наклон вертикальной оси вращения перископа.

При юстировке прибора устраняют следующие ошибки:

1) коллимационную ошибку  $k$ , т. е. неперпендикулярность нормали головного зеркала к горизонтальной оси качания;

2) наклон оси визира  $q$ , под которым подразумевается угол, составляемый визирной осью трубы с плоскостью, перпендикулярной к горизонтальной оси качания головного зеркала, когда эта ось качания перпендикулярна вертикальной оси вращения прибора;

3) наклон  $l$  горизонтальной оси качания головного зеркала относительно плоскости, перпендикулярной вертикальной оси вращения прибора;

4) наклон  $m$  вертикальной оси вращения прибора, т. е. ее отклонение от отвеса в точке стояния.

Схема устройства перископа показана на рис. 111. Визирная труба, состоящая из объектива  $O$ , сетки  $C$  и окуляра, может вращаться вокруг вертикальной оси поворота. С трубой связана ось качания головного зеркала  $З$ . Горизонтальные и вертикальные углы считываются по соответствующим лимбам  $Л_2$  и  $Л_1$ .

Рассмотрим влияние перечисленных выше ошибок на точность измерения углов перископом.

**Коллимационная ошибка** показана на рис. 112. Когда нет этой ошибки, нормаль  $N$  головного зеркала описывает плоскость начального меридиана. При наличии коллимационной ошибки величины  $k$  (рис. 112, б) нормаль головного зеркала будет описывать поверхность конуса. Траектория  $ТН$  следа нормали на сфере изобразится малым кругом, точки которого отстоят от начального меридиана на постоянном расстоянии  $k$ . Эта траектория показана жирной штриховой линией (рис. 112, а).

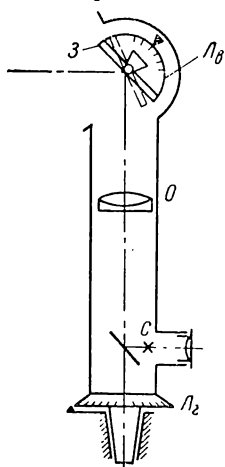


Рис. 111. Схема перископа для измерения углов

[illegible]

Рис. 112. Коллимационная ошибка головного зеркала перископа

Остановив головное зеркало в произвольном положении, когда след его нормали находится в точке  $N$  траектории нормали  $TH$ , найдем точку  $B$  — след визирной оси в пространстве предметов. Для этого построим плоскость, в которой отражается неподвижный луч  $\vec{B_0O}$  от поворотного зеркала, направление которого задано нормалью  $\vec{ON}$ . На сфере эта плоскость изобразится дугой меридиана, проходящего через след нормали  $N$ . Отложив дугу  $\widehat{NB}$ , равную дуге  $\widehat{NB_0}$ , найдем искомую точку визирования  $B$  на сфере. Положение этой точки определится углом места  $i$  и угловым расстоянием  $a_{ki}$  от начального меридиана. Для нахождения величины  $a_{ki}$  проведем через точку  $N$  траектории нормали еще одну дугу большого круга перпендикулярно начальному меридиану. Из прямоугольного сферического треугольника  $I$  напомним

$$\sin a_{ki} = \sin \alpha \cos i.$$



Из нижнего прямоугольного треугольника  $II$  найдем

$$\sin \alpha = \frac{\sin k}{\sin (\widehat{B_0 N})} = \frac{\sin k}{\sin \frac{1}{2} (90^\circ + i)},$$

так как дуга  $\widehat{B_0 N}$  равна половине дуги  $\widehat{B_0 N B}$ , а последняя, как видно из рис. 112, равна  $90^\circ + i$ .

Подстановка и преобразования дают

$$\sin a_{ki} = \sqrt{2} \sin k \left( \cos \frac{i}{2} - \sin \frac{i}{2} \right). \quad (\text{VIII.16})$$

Коллимационная ошибка  $k$  является малой величиной, поэтому можно написать

$$a_{ki} \approx \sqrt{2} k \left( \cos \frac{i}{2} - \sin \frac{i}{2} \right). \quad (\text{VIII.16a})$$

Для точки на горизонте будет

$$a_0 \approx \sqrt{2} k.$$

По формулам (VIII.16) или (VIII.16a) можно найти расстояния до точек траектории визирной оси  $TBO$ , которая показана на рис. 112 жирной кривой.

По формуле (VIII.4) для увода от отвеса получим

$$\delta_{ki} = \sqrt{2} k \left( \cos \frac{i}{2} - \sin \frac{i}{2} - \cos i \right). \quad (\text{VIII.17})$$

Из прямоугольного сферического треугольника  $III$  напишем

$$\sin i' = \frac{\sin i}{\cos a_{ki}},$$

где  $i'$  — отсчитанный по лимбу вертикальный угол, соответствующий углу места  $i$ .

Аналогично формуле (VIII.6) для накопленной ошибки вертикального угла найдем

$$\Delta i_k = \frac{a_{ki}^2}{2} \operatorname{tg} i, \quad (\text{VIII.18})$$

где  $a_{ki}$  дается формулой (VIII.16a).

Ошибка вертикального угла  $\Delta i_k$  при любых значениях угла местности  $i$  будет малой величиной второго порядка, поэтому при наших расчетах ею можно пренебречь.

Наклон оси визира возникает за счет бокового сдвига перекрестия или объектива трубы из их номинального положения (рис. 113). Заметим, что наклон оси визира в меридиональной плоскости изменяет лишь вертикальную наводку и не вызывает увода визирной оси от отвеса; влияние этого наклона автоматически компенсируется при установке нуля лимба вертикальных углов. На рис. 113 показан боковой наклон оси визира на угол  $q$ .

Нормаль  $\vec{ON}$  головного зеркала  $З$  перпендикулярна горизонтальной оси поворота, поэтому траектория нормали  $ТН$  совпадает с начальным меридианом (показана жирной штриховой линией). Зная направление оси визира  $B_0\vec{O}$  и направление нормали головного зеркала  $\vec{ON}$ , найдем на сфере положение следа  $B$  визирной оси  $\vec{OB}$ .

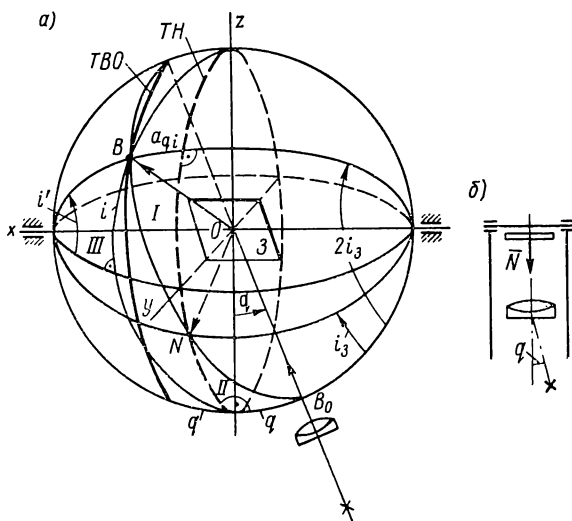


Рис. 113. Боковой наклон оси визира перископа

Проведя через точку  $B$  дугу большого круга перпендикулярно начальному меридиану, получим два прямоугольных сферических треугольника  $I$  и  $II$ . Они равны друг другу, так как равны их гипотенузы и острые углы при точке  $N$  (как вертикальные). Поэтому

$$a_{qi} = q = \text{const}, \quad (\text{VIII.19})$$

т. е. точки траектории визирной оси  $TBO$  от начального меридиана удалены на постоянное расстояние  $q$ . Эта траектория показана сплошной жирной кривой.

Для увода от отвеса по формуле (VIII.4) получим

$$\delta_{qi} = q (1 - \cos i). \quad (\text{VIII.20})$$

Для отсчитанного значения вертикального угла  $i'$  из прямоугольного сферического треугольника  $III$  найдем

$$\sin i' = \frac{\sin i}{\cos q}.$$

По аналогии с формулой (VIII.6) напомним

$$\Delta i_q = \frac{q^2}{2} \text{tg } i. \quad (\text{VIII.21})$$

Ошибка вертикального угла изменяется в пределах

$$0 \leq \Delta i_q \leq q,$$

а для точек, не очень близких к зениту, эту ошибку можно не учитывать как малую величину второго порядка.

Заметим, что из равенства сферических треугольников  $I$  и  $II$  следует также, что угол поворота визирной оси  $\vec{OB}$  вдвое больше угла поворота зеркала  $З$ . На рис. 113 эти углы отмечены соответственно  $2i_3$  и  $i_3$ .

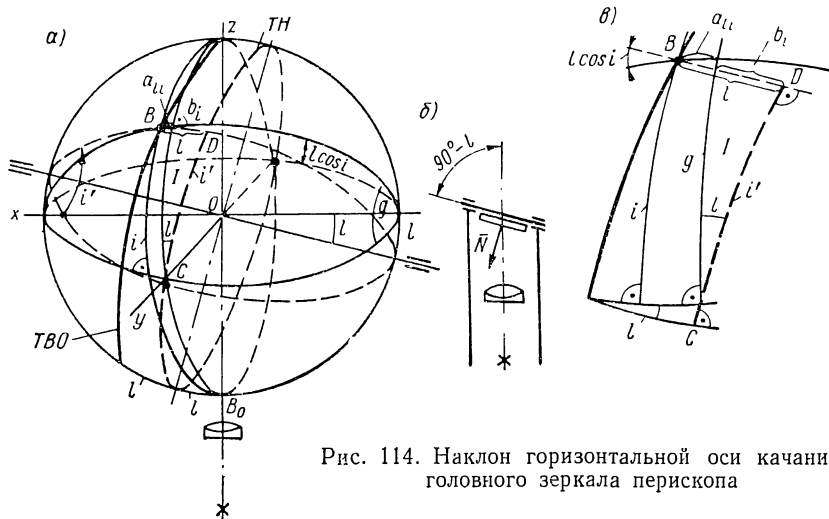


Рис. 114. Наклон горизонтальной оси качания головного зеркала перископа

Наклон горизонтальной оси качания головного зеркала приводит к тому, что траекторией его нормали (на рис. 114,  $a$  показана жирной штриховой кривой  $TH$ ) является дуга большого круга, который наклонен к начальному меридиану под углом  $l$  и пересекает этот меридиан на экваторе. Нетрудно видеть, что данный случай (рис. 114,  $b$ ) привелся к предыдущему (см. рис. 113). Легко построить траекторию визирной оси, которая на рис. 114,  $a$  изображена сплошной жирной кривой  $TBO$ . Точки ее отстоят от траектории нормали  $TH$  на постоянном расстоянии  $l$ .

Через произвольную точку  $B$  траектории визирной оси проведем две дуги большого круга. Одна из них перпендикулярна начальному меридиану, а другая — траектории нормали и опирается на наклоненную ось качания головного зеркала; первая дуга показана тонкой сплошной линией, вторая — тонкой штриховой линией. Проведем еще одну штриховую дугу большого круга, которая пересекает траекторию визирной оси на экваторе и также опирается на ось качания головного зеркала. Отсчитан-

ный по лимбу вертикальный угол  $i'$  измеряется дугой  $\overset{\frown}{CD}$  наклонного большого круга. Истинный угол места  $i$  точки  $B$  измеряется дугой меридиана, отложенной от горизонта. Угловое расстояние от начального меридиана до точки визирования  $B$  измеряется дугой  $a_{ii}$ , что яснее показано на рис. 114, в.

По формуле синусов найдем угол между сплошной и штриховой горизонтальными дугами, проведенными через точку  $B$ ; он равен  $l \cos i$ . Для малых по величине ошибок юстировки далее получим

$$a_{ii} = (l - b_i) \cos (l \cos i) \approx l - b_i.$$

Это равенство справедливо до малых величин второго порядка. Из прямоугольного треугольника  $I$  найдем

$$\sin b_i = \sin l \sin (g - a_{ii} l \cos i).$$

С точностью до малых величин второго порядка это же выражение можно записать в виде

$$b_i = l \sin i.$$

Подстановка дает

$$a_{ii} = l (1 - \sin i). \quad (\text{VIII.22})$$

Учитывая, что  $a_{i0} = l$ , по формуле (VIII.4) окончательно получим

$$\delta_{ii} = l (1 - \sin i - \cos i). \quad (\text{VIII.23})$$

Из этого же треугольника  $I$  напишем

$$\sin g = \frac{\sin i}{\cos a_{ii}}.$$

С точностью до малых величин второго порядка далее найдем

$$g - a_{ii} l \cos i = i' - l^2 = g - l^2 (1 - \sin i) \cos i,$$

откуда следует, что с той же степенью точности  $g = i'$ , поэтому

$$\sin i' = \frac{\sin i}{\cos a_{ii}}.$$

Для ошибки отсчета вертикального угла аналогично формуле (VIII.6) получим

$$\Delta i_l = \frac{a_{ii}^2}{2} \operatorname{tg} i. \quad (\text{VIII.24})$$

По мере увеличения угла места  $i$  до  $90^\circ$  величина  $a_{ii}$  в данном случае непрерывно уменьшается до нуля, и ошибка  $\Delta i_l$  всегда остается малой величиной второго порядка, которой при наших расчетах можно пренебречь.

Наклон вертикальной оси вращения перископа сказывается совершенно так же, как у теодолита. На этом

основании для увода по вертикали по формуле (VIII.11) с учетом формулы (VIII.2) получим

$$\delta_{mi} = -m \sin (\varphi - \varphi_m) \sin i. \quad (\text{VIII.25})$$

Ошибку вертикального угла можно вычислить по формуле (VIII.12), а увод по горизонту — по формуле (VIII.14а).

**О возможности взаимокompенсации ошибок юстировки перископа.** Влияния коллимационной ошибки  $l$  и наклона  $l$  горизонтальной оси качания головного зеркала в перископе могут быть

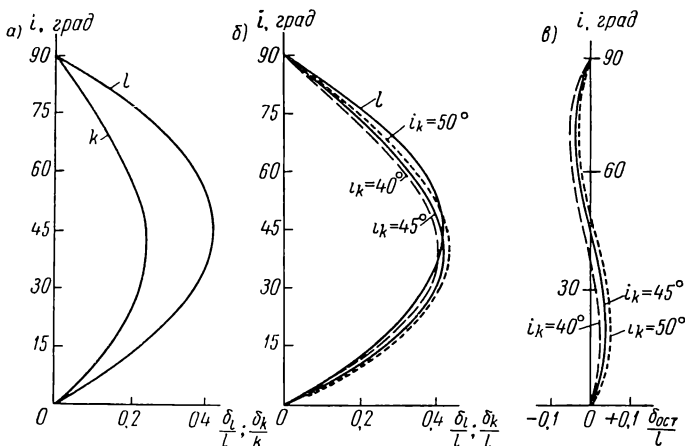


Рис. 115. Взаимокompенсация уводов от отвеса вследствие ошибок  $k$  и  $l$  перископа

хорошо взаимно скомпенсированы. Возможность такой взаимокompенсации видна из графиков уводов от отвеса (рис. 115), построенных по результатам расчетов, которые получены из формул (VIII.17) и (VIII.23) и приведены в табл. 14.

Из табл. 14 и рис. 115 видно, что можно получить хорошую взаимокompенсацию ошибок  $k$  и  $l$  для широких пределов изменения вертикальных углов. Графики построены для случая, когда вертикальные углы измеряются в пределах от  $i = 0$  до  $i = 90^\circ$ . На рис. 115, а дан график коэффициентов для коллимационной ошибки  $k$  и для наклона горизонтальной оси  $l$  в соответствии с числами первой и второй строки табл. 14. Видно, что характер изменения коэффициентов весьма схожий. На рис. 115, б дана та же кривая для ошибки  $l$ , а для ошибки  $k$  построены три кривых для трех величин угла местности  $i_k$ , при которых обе ошибки полностью компенсируют друг друга:

1) сплошная кривая для угла  $i_k = 45^\circ$ , когда взаимокompенсация ошибок получается при увеличении ошибки  $k$  в 1,76 раза (соответствующие расчеты даны в четвертой строке табл. 14);

Передаточные коэффициенты для первичных ошибок  $k$  и  $l$  перископа

Коэффициенты $\frac{\delta_k}{k}; \frac{\delta_l}{l}$	Величина угла $i$ в град										
	—90	—60	—45	—30	—15	—10	0	+30	+45	+60	+90
$\frac{\delta_k}{k}$	2,000	1,224	0,848	0,507	0,220	0,138	0	—0,224	—0,235	—0,189	0
$\frac{\delta_l}{l}$	2,000	1,336	1,000	0,634	0,293	0,189	0	—0,366	—0,413	—0,366	0
$\frac{\delta_l}{l} - \frac{\delta_k}{k}$	0	0,142	0,152	0,127	0,072	0,051	0	—0,142	—0,179	—0,177	0
$1,76 \frac{\delta_k}{k}$	3,52	2,153	1,492	0,892	0,388	0,246	0	—0,394	—0,413	—0,322	0
Остаточная ошибка $\frac{\delta_{ост}}{l} =$ $= \left( 1,76 \frac{\delta_k}{k} - \frac{\delta_l}{l} \right)$	—1,52	—0,787	—0,492	—0,258	—0,095	—0,057	0	—0,028	0	+0,034	0

2) штриховая кривая для угла  $i_k = 40^\circ$ , когда взаимокompенсация ошибок получается при увеличении ошибки  $k$  в 1,73 раза;

3) пунктирная кривая для угла  $i_k = 50^\circ$ , когда взаимокompенсация ошибок получается при увеличении ошибки  $k$  в 1,82 раза.

На рис. 115, в приведены кривые остаточных уводов от вертикали при взаимокompенсации ошибок  $k$  и  $l$  при  $i_k = 40^\circ$ ;  $i_k = 45^\circ$  и  $i_k = 50^\circ$ . Остаточные ошибки при этом перераспределяются; например, если взаимокompенсация получена при  $i_k = 40^\circ$ , остаточная ошибка для углов визирования от  $i = 0$  до  $i = 40^\circ$  уменьшается, а для углов визирования от  $i = 40^\circ$  до  $i = 90^\circ$  возрастает.

Из рис. 115, в и табл. 14 видно, что наибольшая остаточная ошибка при  $i_k = 45^\circ$  в диапазоне углов от  $i = 0$  до  $i = 90^\circ$  составляет менее 10% от наибольшей величины первичной ошибки  $l$ .

Из табл. 14 следует, что при переходе в сторону отрицательных углов места взаимокompенсации ошибок быстро ухудшается. Перископы обычно имеют небольшие пределы визирования вниз от горизонта (до  $i = -5^\circ$ , редко до  $i = -10^\circ$ ), поэтому всегда можно считать коллимационную ошибку  $k$  и наклон горизонтальной оси качания  $l$  головного зеркала за одну ошибку юстировки, для устранения которой в конструкцию перископа достаточно ввести только один компенсатор. Для этого предусматривают или наклон горизонтальной оси качания зеркала в вертикальной плоскости, например введением одинарного эксцентрика в одном

из подшипников этой оси, или наклон головного зеркала (головной призмы) относительно этой оси качания с помощью регулировочных винтов или пригонкой.

Остальные ошибки юстировки перископа — боковой наклон оси визира  $q$  и неотвесность вертикальной оси вращения  $m$  — взаимно не компенсируются, так как дают разные по характеру уводы по вертикали и от горизонта. Они должны устраняться самостоятельно, для чего следует предусмотреть соответствующие регулировочные компенсаторы. Например, наклон оси визира  $q$  можно устранить боковым сдвигом сетки  $C$  или сдвигом объектива  $O$

с помощью одинарного эксцентрика в его оправе (см. рис. 111). Об устранении наклона вертикальной оси вращения подробно говорилось выше, в п. 28.

**О цеховой юстировке угломерных приборов типа перископа.** Контроль и юстировка перископов в цеховых условиях осуществляется на специальных коллиматорах, которые бывают трех типов: планетарные коллиматоры, гониометры вертикальные, широкоугольные коллиматоры. Подробности об устройстве коллиматоров можно найти в работе [43].

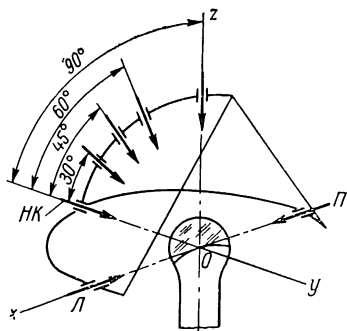


Рис. 116. Юстировка перископа на планетарном коллиматоре

Рассмотрим юстировку перископа на планетарном коллиматоре, схема которого приведена на рис. 116. Коллиматор состоит из жесткого сварного каркаса и служит для закрепления коллиматорных трубок с перекрестиями. В горизонтальной дуге под углом  $90^\circ$  друг к другу закреплено три коллиматора — нулевой коллиматор  $НК$  и два боковых — левый  $Л$  и правый  $П$ . Эти коллиматорные трубки имитируют плоскость горизонта. В вертикальной дуге закреплены, кроме нулевого, еще четыре коллиматорных трубки под углами местности  $30, 45, 60$  и  $90^\circ$ . Эти пять трубок имитируют плоскость начального меридиана. Оси всех коллиматорных трубок, вертикального и горизонтального ряда, должны пересекаться в общем центре  $O$ , где при работе на коллиматоре устанавливается центр качания головной призмы испытуемого перископа.

При проверке самого коллиматора с точкой  $O$  совмещают центр вращения трубы выверенного теодолита; с помощью теодолита проверяют:

параллельность визирных осей коллиматорных трубок данного ряда общей плоскости: для горизонтального ряда — горизонтальной, для вертикального ряда — вертикальной;

взаимную перпендикулярность указанных горизонтальной и вертикальной плоскостей друг другу;

соответствие углов наклона осей коллиматоров друг к другу их номинальным значением в каждом ряду трубок.

Для поверки планетарных коллиматоров применяют теодолиты с точностью измерения углов до  $10\text{--}20''$ . Для регулировки направления визирных осей коллиматорные трубки имеют боковые и вертикальные винты при сетке.

Целесообразно производить контроль и юстировку перископа на коллиматоре в следующем порядке.

1. Совместить центр перекрестия прибора с центром сетки нулевого коллиматора; по боковым коллиматорам — левому  $L$  и правому  $P$  — определить наличие увода по горизонту, который вызывает только одна ошибка — наклон вертикальной оси вращения на угол  $m$ . Наклонами испытуемого прибора относительно планетарного коллиматора устранить увод по горизонту.

2. Сделав повторную наводку на перекрестие нулевого коллиматора, визировать в зенит; увод сетки прибора относительно перекрестия отвесного коллиматора ( $i = 90^\circ$ ) целиком объясняется наличием только бокового наклона оси визира на угол  $q$ , так как ни коллимационная ошибка  $k$ , ни наклон  $l$  горизонтальной оси качания головного зеркала не вызывают увода от отвеса в зените. Выявленный увод от зенита устранить разворотом эксцентрика объектива или боковым сдвигом визирной трубы.

3. Повторив еще раз наводку сетки прибора на перекрестие нулевого коллиматора, вновь визировать в зенит и, если увод отсутствует, визировать на коллиматор под углом  $i = 45^\circ$ . Обнаруженный увод устранить целиком или наклоном горизонтальной оси качания, или введением коллимационной ошибки головного зеркала, смотря по тому, какой из компенсаторов предусмотрен конструкцией прибора; при этом автоматически получится  $l = 1,76k$ .

4. Остаточный увод от отвеса выявить наведением на промежуточные коллиматоры, расположенные в нашем случае под углами  $i = 30^\circ$  и  $i = 60^\circ$ . Если увод превосходит допуск, то следует уменьшить величину первичной ошибки  $k$  или  $l$ , компенсируемой при юстировке.

Необходимо заметить, что описанный процесс юстировки относится к перископам с пределами визирования по вертикали от  $i = 0$  до  $i = 90^\circ$ ; при других пределах визирования процесс юстировки будет несколько отличаться от рассмотренного, так как взаимокompенсация ошибок  $k$  и  $l$  должна быть сделана при другом угле места, не равном  $45^\circ$ .

## 29. О юстировке панорамических угломерных приборов

Панорамические приборы отличаются от непанорамических приборов тем, что для горизонтального обзора в них используется вращение только головной призмы, а не вращение всего прибора вокруг вертикальной оси, как, например, в перископах. При



вращении головной призмы вокруг вертикальной оси неизбежно появляется наклон изображения относительно неподвижной сетки. Для компенсации этого наклона нужно или выпрямлять изображение предметов, если перекрестие визира неподвижно, или вращать перекрестие визира синхронно с наклоном изображения предметов, а затем стабилизировать это вращающееся вместе с перекрестием изображение. На практике используют обе эти возможности.

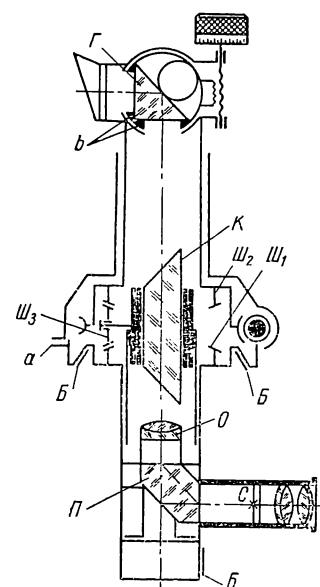


Рис. 117. Схема артиллерийской панорамы

Выпрямление изображения в панорамах достигается включением перед визиром вращающейся компенсационной призмы; чаще всего такой призмой служит призма Дове, иногда, когда призма включается в сходящийся ход лучей, — призма Пехана. Призма Дове применяется, например, в оптической системе артиллерийской панорамы (рис. 117). При вертикальном положении оси вращения головки панорамы полная компенсация наклона изображения получается при условии, если призма Дове  $K$  вращается в сторону вращения головной призмы  $\Gamma$ , но с вдвое меньшей угловой скоростью, так как призма Дове поворачивает изображение с удвоенной скоростью. Для осуществления необходимой кинематической связи между головкой панорамы и призмой Дове применяется известный планетарный механизм, состоящий из двух одинаковых

конических зубчатых шестерен  $\text{Ш}_1$  и  $\text{Ш}_2$ , между которыми включена малая шестеренка — спутник  $\text{Ш}_3$ , свободно сидящая на оси оправы призмы Дове. Шестерня  $\text{Ш}_1$  скреплена с неподвижной частью панорамы, и по ней обкатывается шестеренка  $\text{Ш}_3$  при вращении верхней шестерни  $\text{Ш}_2$ , связанной с головкой. Спутник обкатывается с угловой скоростью, вдвое меньшей угловой скорости вращения головки.

В связи с усложнением схемы панорамического прибора возрастает и число ошибок юстировки. Как и перископ, панорамический прибор при данной азимутальной установке имеет те же три ошибки юстировки:

1) коллимационную ошибку и наклон оси качания головного зеркала ( $k + l$ );

2) боковой наклон оси визира  $q$  (в панораме визир состоит из объектива  $O$ , призмы с крышей  $\Pi$ , сетки  $C$  и окуляра);

3) наклон вертикальной оси вращения  $m$ , в данном случае это — наклон оси вращения головной призмы  $\Gamma$ .

Узел призмы Дове внесет следующие три ошибки:

2) наклон оси визира относительно оси вращения призмы Дове; непараллельность этих осей обозначим через  $r$ ;

Рассмотрим влияние трех последних ошибок на измерение горизонтальных и вертикальных углов.

Введем коллимационную ошибку  $k_d$ ; теперь траектория нормали  $N_d$  изобразится в виде дуги малого круга, точки которой отстоят на постоянном угловом расстоянии  $k_d$  от экватора. Траектория нормали  $TH$  показана утолщенной штриховой линией. Построим траекторию следа визирной оси через вращающуюся призму Дове. Предположим, что в начальный момент визируют точку в плоскости начального меридиана  $yz$ . Видно, что изображение оси визира  $\overrightarrow{OB}$  через призму направлено не в зенит,

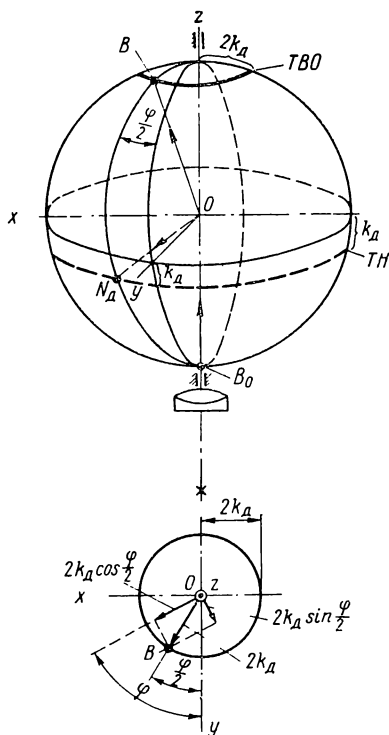


Рис. 118. Коллимационная ошибка призмы Дове

а отклонено на угол  $2k_D$  вниз. Нормаль головной призмы, предположим, также лежит в плоскости начального меридиана.

При повороте головной призмы от плоскости начального меридиана на угол  $\varphi$  вокруг вертикальной оси призма Дове повернется в ту же сторону на угол  $\varphi/2$ . Отражение произойдет в плоскости, которая повернута от начального меридиана вокруг

оси  $z$  на угол  $\varphi/2$ , а след изображения оси визира будет в точке  $B$  под углом  $2k_D$  от зенита. Следовательно, траекторией визирной оси будет окружность радиуса  $2k_D$ , concentричная оси  $z$ ; на рис. 118 она показана сплошной жирной кривой  $TBO$ .

На том же рисунке внизу показан вид сверху. Штриховой линией под углом  $\varphi$  к плоскости начального меридиана показана плоскость меридиана, в которой находится нормаль гипотенузы головной призмы после поворота головки панорамы на угол  $\varphi$  по часовой стрелке. В плоскости другого меридиана под углом  $\varphi/2$  к начальному находится изображение оси визира, след которой отмечен точкой  $B$ . Величина угла наклона визирной оси к зениту показана вектором длины  $2k_D$ . Видно, что при вращении головки панорамы плоскость меридиана, в которой изображается ось визира через призму Дове при обратном ходе лучей, отстоит от плоскости меридиана, в которой лежит нор-

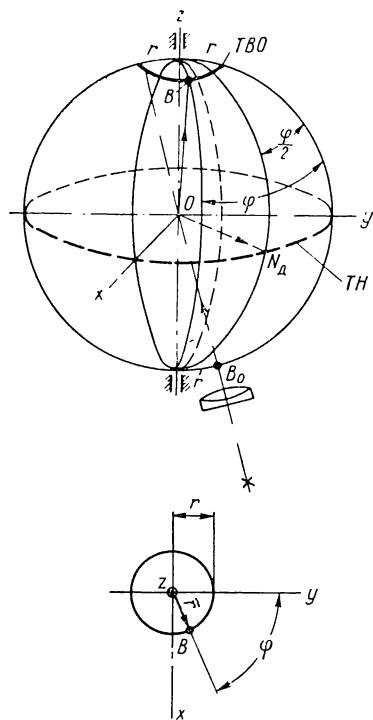


Рис. 119. Наклон оси визира к оси вращения призмы Дове

маль головной призмы. В свою очередь, изображение  $\vec{OB}$  оси визира  $\vec{B_0O}$  для головной призмы является осью визира, но в отличие от случая, приведенного на рис. 113, направление этой оси по отношению к головной призме не является неизменным. Это приведет к тому, что боковая и продольная составляющие угла наклона оси визира будут переменными величинами. Из рис. 118 (вид сверху) получится:

для боковой составляющей

$$q_{k_D} = 2k_D \sin \frac{\varphi}{2}; \quad (\text{VIII.26})$$

для продольной составляющей

$$\Delta i_{k_D} = 2k_D \cos \frac{\varphi}{2}. \quad (\text{VIII.27})$$

По формулам (VIII.20) и (VIII.1) получим:  
для увода от отвеса

$$\delta_{k_D} = 2k_D (1 - \cos i) \sin \frac{\varphi}{2}; \quad (\text{VIII.28})$$

для увода от горизонта

$$\eta_{k_D} = 2k_D \left( \cos \frac{\varphi_2}{2} - \cos \frac{\varphi_1}{2} \right). \quad (\text{VIII.29})$$

При визировании по горизонту расстояние до точки траектории визирной оси  $TBO$  от плоскости меридиана, в которой лежит нормаль головного зеркала, т. е. угол  $\alpha_0$  по прежнему обозначению (см. п. 26), также будет переменной величиной.

Из рис. 118 напишем

$$(a_{k_D})_0 = 2k_D \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (\text{VIII.30})$$

В результате этого появится переменной величины ошибка азимутального угла для точек на горизонте

$$(\Delta \varphi_{k_D})_0 = 2k_D \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (\text{VIII.31})$$

В общем случае формула для этой ошибки имеет вид

$$\Delta \varphi_0 = (a_0)_{\varphi_2} - (a_0)_{\varphi_1}, \quad (\text{VIII.32})$$

где  $(a_0)_{\varphi_2}$  и  $(a_0)_{\varphi_1}$  — расстояния до горизонтальных точек траектории визирной оси  $TBO$  при азимутальных углах  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  соответственно.

Таким образом, коллимационная ошибка  $k_D$  призмы Дове вызывает:

увод от отвеса величины  $\delta_{k_D}$  при визировании по вертикали при данной азимутальной установке — по формуле (VIII.28);

ошибку вертикального угла второго порядка малости — по формуле (VIII.21);

ошибку горизонтального угла  $(\Delta \varphi_{k_D})_0$  при визировании точек горизонта — по формуле (VIII.31);

увод от горизонта величины  $\eta_{k_D}$  — по формуле (VIII.29).

Наклон оси визира по отношению к оси вращения призмы Дове показан на рис. 119. Нормаль  $N_D$  гипотенузной грани призмы описывает плоскость экватора, так как считаем, что ось вращения призмы Дове параллельна оси  $z$  и коллимационной ошибки  $k_D$  нет. Предположим далее, что ось визира  $\vec{B_0O}$  лежит в плоскости начального

меридиана  $yz$  и направлена под малым углом  $r$  к оси вращения призмы Дове. Сравнив рис. 119 с рис. 113, замечаем, что имеем сходные случаи; разница состоит лишь в том, что оси вращения ориентированы по-разному (взаимно перпендикулярно) и что углы  $q$  и  $r$  являются углами, дополняющими друг друга до  $90^\circ$ . Поэтому сразу же можем изобразить траекторию визирной оси  $TBO$  (она показана сплошной жирной дугой малого круга радиуса  $r$ , концентричной оси вращения) и утверждать, что угловая скорость вращения следа  $B$  изображения визирной оси вдвое больше угловой скорости вращения призмы Дове (см. рис. 113).

Отсюда получается важный вывод о том, что наклон оси  $\vec{B}_0O$  визира по отношению к оси вращения призмы Дове, происшедший в плоскости  $yz$ , не вызывает никаких ошибок при измерении углов панорамой. Это происходит благодаря тому, что изображение  $\vec{OB}$  оси визира через призму Дове вращается с и н х р о н н о с головкой и наклон этой оси автоматически компенсируется при установке вертикального лимба. Если же наклон оси визира  $\vec{B}_0O$  произойдет в плоскости, развернутой под произвольным углом  $\varphi_r$  к плоскости  $yz$ , то перед призмой Дове изображение  $\vec{OB}$  оси визира даст две постоянные по величине составляющие наклона: продольную, компенсируемую при установке нуля вертикального лимба, и поперечную — величины

$$q_r = -r \sin \varphi_r. \quad (\text{VIII.33})$$

Эта составляющая даст постоянную при всех азимутальных углах ошибку, которая влияет аналогично боковому наклону оси визира на угол  $q_r$ . Ошибку  $q_r$  можно выявить и устранить так же, как в перископе (см. п. 28). В панораме ПГ, например, ее устраняют боковым сдвигом окулярной призмы с крышей  $\Pi$  (рис. 117).

Наклон оси вращения призмы Дове по отношению к вертикальной оси вращения головной призмы рассмотрен Г. Е. Скворцовым [48] и показан на рис. 120. Предположим, что наклон оси произошел в плоскости  $yz$  на угол  $s$ , который можно также показать неподвижным вектором  $\vec{s}$ , направленным вдоль оси  $y$  (рисунок внизу). Легко видеть, что при повороте головки панорамы из плоскости  $yz$  на угол  $\varphi$  вектор  $\vec{s}$  даст две составляющие переменной величины: боковую  $q = s \sin \varphi$  и продольную  $\Delta i_s = s \cos \varphi$ . Эти составляющие приведут к тем же ошибкам, какие были в результате действия коллимационной ошибки  $k_d$  призмы Дове. Таким образом, непараллельность осей вращения призм вызывает следующие ошибки

$$\text{вывод от отвеса} \quad \delta_s = s \sin \varphi (1 - \cos i); \quad (\text{VIII.34})$$

ошибку вертикального угла второго порядка малости — согласно формуле (VIII.21);

ошибку азимутального угла при наведении на горизонтальную точку

$$(\Delta\varphi_s)_0 = s \sin \varphi; \quad (\text{VIII.35})$$

ошибку вертикального угла из-за увода по горизонту

$$\eta_s = s (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1). \quad (\text{VIII.36})$$

Заметим, что в общем случае ось вращения призмы Дове может быть наклонена в плоскости, развернутой под любым углом  $\varphi_1$  к начальному меридиану. Тогда приведенные выше формулы несколько изменятся:

$$(\Delta\varphi_s)_0 = s \sin (\varphi - \varphi_s); \quad (\text{VIII.35a})$$

$$\eta_s = s [\cos (\varphi_2 - \varphi_s) - \cos (\varphi_1 - \varphi_s)]. \quad (\text{VIII.36a})$$

Из сравнения с формулами (VIII.31) и (VIII.29) легко видеть, что эти две ошибки ( $k_D$  и  $s$ ) не синхронны друг другу и поэтому не могут быть взаимно скомпенсированы.

Окончательно заключаем, что панорама имеет пять ошибок юстировки:  $(k + l)$ ,  $m$ ,  $k_D$ ,  $r$  (или  $q$ ) и  $s$ .

В панораме ПГ перечисленные ошибки можно устранить следующим образом.

1. Юстировкой узла призмы Дове на специальном контрольно-юстировочном приборе устраняют коллимационную ошибку  $k_D$  (см. задачу, стр. 97).

2. Отвесность оси вращения призмы Дове обеспечивается тем, что, во-первых, параллельно этой оси на нижнем корпусе угломера обрабатывается монтажная база  $B$  — коническая расточка и цилиндрический поясok (рис. 117) — и, во-вторых, этой базой панорама устанавливается в горизонтированной корзине. Таким образом устраняется возможность появления ошибки  $m$  при условии, что последующие части прибора не внесут этой ошибки.

3. Если при установке верхнего корпуса угломера вместе с головкой на нижний корпус угломера ошибка  $m$  оси вращения головной призмы появится, то она уже действует как ошибка  $s$ .

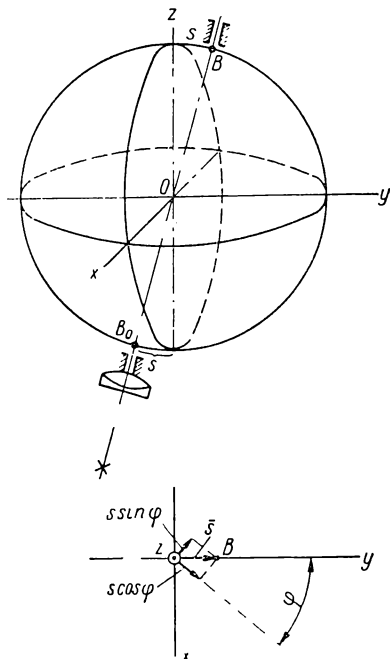


Рис. 120. Наклон оси вращения призмы Дове к вертикальной оси вращения

Устраняют эту ошибку наклонами коробки верхнего корпуса угломера путем подпиловки опорного торца  $a$  (рис. 117); выявляется ошибка по наличию увода от горизонта [формула (VIII.33)].

4. При наличии боковой составляющей наклона оси визира — ошибки  $q_r$  — наблюдается «кривой» увод от отвеса. Устраняют эту ошибку боковым сдвигом окулярной призмы с крышей  $\Pi$  (рис. 117).

5. При неполной взаимокompенсации коллимационной ошибки  $k$  головной призмы и наклона  $l$  ее горизонтальной оси качания наблюдается «косой» увод от отвеса. Устраняют эту ошибку изменением величины  $k$  или  $l$ . В панораме ПГ изменяют величину коллимационной ошибки  $k$  подпиловкой опорных выступов  $b$  у секторов под головную призму (рис. 117).

Подробности приводятся в специальном руководстве по ремонту панорамы ПГ [45]. Следует еще указать и на то, что на точность работы панорамы влияют также ошибки изготовления призмы Дове, в первую очередь клиновидность ее развертки. Влияние клиновидности развертки вследствие разности острых углов  $\delta 45^\circ$  автоматически компенсируется при устранении коллимационной ошибки призмы Дове. Пирамидальность же призмы Дове никакой юстировкой не компенсируется и должна ограничиваться строгим допуском при ее изготовлении (см. задачу 1, стр. 124).

Большие перспективы при юстировке сложных панорамических визиров открывает применение графического метода, разработанного Г. Е. Скворцовым и обоснованного в статье [48]. Выведенные в данном параграфе формулы позволяют подсчитать коэффициенты, которые связывают уводы и погрешности отсчетов с первичными ошибками юстировки прибора.

## **Г л а в а IX**

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ЮСТИРОВКИ И КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

#### **30. Основы разработки методик юстировки и контроля оптических приборов**

Перед запуском нового прибора в производство необходима соответствующая технологическая подготовка. Исходными данными при этом являются:

сборочные чертежи изделия или материальный образец прибора, а также его оптическая, кинематическая, электротехническая и прочие схемы;

технические условия на прибор и его описание;

планируемый выпуск приборов;

руководящие материалы на сборочные процессы и на технологическую сборочно-юстировочную оснастку (приспособления, коллиматоры).

Основными этапами технологической подготовки производства являются следующие.

1. В ы б о р о р г а н и з а ц и о н н о й ф о р м ы с б о р к и. Различают сборку стационарную и подвижную, по принципу концентрации и по принципу дифференциации операций. Стационарная сборка с концентрацией операций на одном рабочем месте применяется, например, для крупногабаритных изделий мелкосерийного выпуска. Для малогабаритных изделий крупносерийного и массового выпуска применяется подвижная сборка с дифференциацией сборочного процесса на большое число отдельных операций и переходов. Примером такой формы сборки может служить конвейерная сборка фотоаппаратов, микроскопов и других изделий массового производства.

2. С о с т а в л е н и е т е х н о л о г и ч е с к о й с х е м ы с б о р к и. Для наглядного изображения последовательности соединения деталей в узлы, а узлов в изделие составляют схему сборки каждого прибора. Различают схемы «веерного типа»

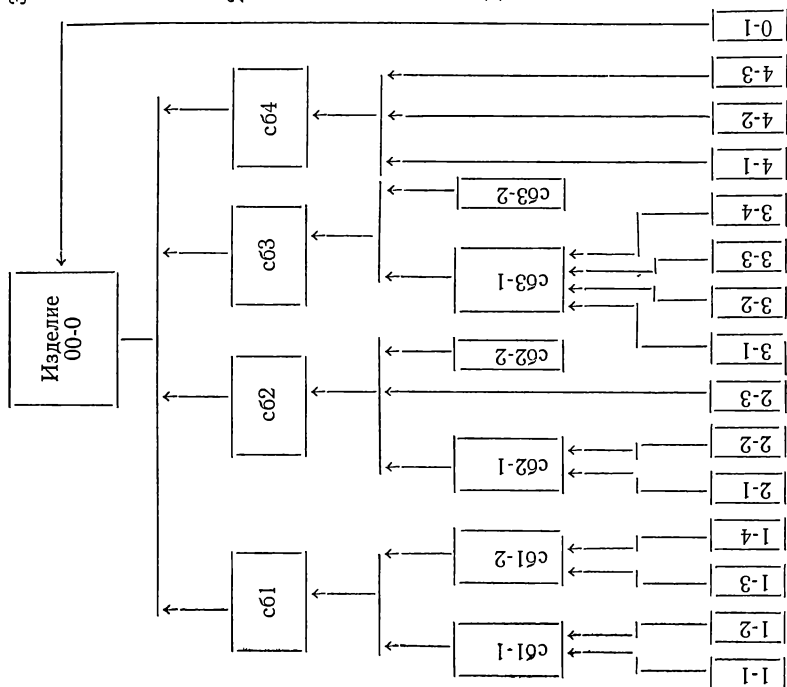
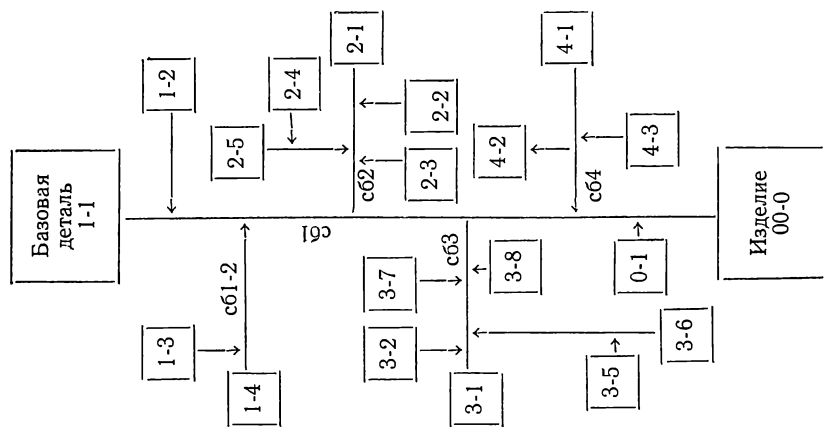


3-я ступень сборки —  
«изделие»

2-я ступень сборки —  
«часть изделия»  
(группа или меха-  
низм)

1-я ступень сборки —  
«сборка»

Детали



СХЕМА

и схемы с базовой деталью (см. схему). Для представления последовательности процесса сборки приборов нагляднее схемы второго вида — с базовой деталью.

3. Разработка всей технологической документации. Технологический процесс разрабатывается тем подробнее, чем больше планируемый выпуск приборов. В зависимости от этого используют следующую технологическую документацию:

методики юстировки прибора или основных его узлов — при опытном и единичном производстве;

маршрутные технологические карты — при мелкосерийном производстве;

карты укрупненного технологического процесса сборки — при серийном производстве;

операционно-технологические карты процесса сборки — при крупносерийном производстве;

инструкционно-операционные карты сборки — при массовом производстве.

Далее производится нормирование сборочных работ и, наконец, проектирование сборочной оснастки — различных механических и других приспособлений, а также контрольно-юстировочных приборов и устройств (коллиматоров), используемых при юстировке приборов.

В процессе разработки технологической документации производится анализ технологичности конструкции изделия с точки зрения сборки. С этой целью при необходимости выполняют размерные расчеты, анализ точности кинематических, оптических и других схем.

Для экспериментальной проверки технологичности изделия используется метод повторныхборок. Он заключается в том, что по разработанному технологическому процессу выполняется сборка прибора и фиксируется время  $T_1$ , затраченное на первичную сборку, включая все доделки и пригонки, которые были необходимы для получения законченного изделия. После этого прибор разбирают и повторно собирают. Фиксируется время  $T_2$ , затраченное на повторную сборку, которая уже не требует никаких доделок. Разность времени  $T_1 - T_2$ , очевидно, равна времени, затраченному при первичной сборке прибора на доделки и пригонки.

Анализируют целесообразность пригоночных работ и при необходимости вносят коррективы в процесс механической обработки деталей или даже в конструкцию изделия.

Большое значение имеет обоснованная методика юстировки прибора. Рассмотрим в качестве примера разработку методики юстировки коленчатой трубы ПО-1М.

Устройство трубы показано на рис. 121. Оптическая система ее включает узел с выверочным ахроматическим клином  $K$ , а также

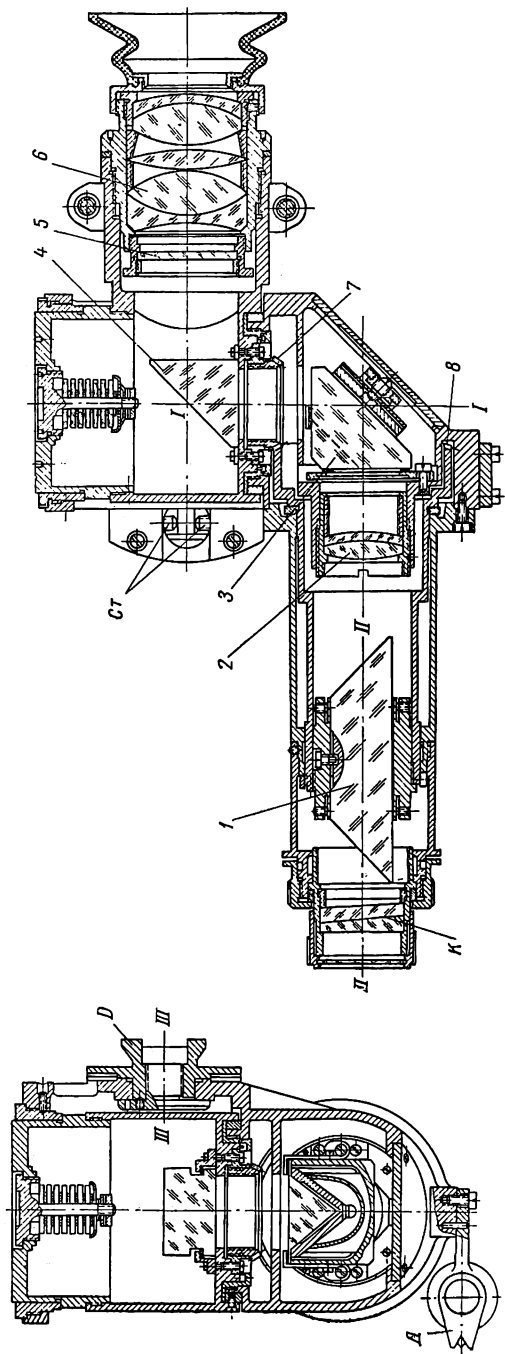


Рис. 121. Конструктивная схема коленчатой трубы ПО-1М

узлы призмы Дове 1, объектива 2, прямоугольной призмы с крышей 3, окулярной призмы 4, сетки 5 и окуляра 6. Механическую часть прибора составляют: узел основания  $O$  с салазками типа ласточкина хвоста, посредством которых прибор закрепляется на зенитном оружии, неподвижная труба и поворотное окулярное колено. Неподвижная труба связана с основанием, и в ней размещены узлы клина  $K$ , призмы Дове 1, объектива 2 и призмы 3. Окулярное колено, заключающее в себе призму 4, сетку 5 и окуляр 6, может вращаться вокруг горизонтальной оси  $I—I$  вверх на угол  $120^\circ$ . При этом малая коническая шестерня 7, связанная с окулярным коленом, вращает вокруг оси  $II—II$  большую коническую шестерню 8 узла призмы Дове 1 с передаточным отношением  $1 : 2$ . Для согласования визирной оси трубы с осью канала ствола орудия в боковом направлении используется пара встречающихся стопоров  $C_T$ , которые позволяют поворачивать всю трубу на малый угол вокруг оси  $III—III$ , имеющейся в основании. Для согласования визирной оси трубы с осью орудия по высоте используется разворот выверочного клина  $K$ .

Ось механического диоптрового визира  $D$  должна быть параллельна визирной оси трубы с точностью до  $0,5^\circ$  угла.

Оптическая труба ПО-1М служит для наводки зенитного орудия в цель. Для исправной работы трубы необходимо выполнить следующие требования.

1. Устранить параллакс сетки, который допускается не более  $2'$ .
2. Устранить наклон изображения, который допускается не более  $30'$ .

3. Устранить разворот штрихов сетки. Допускается отклонение вертикального штриха сетки от отвеса не более  $30'$ .

4. Устранить смещение изображения в поле зрения трубы, которое возникает при вращении окулярного колена вокруг оси  $I—I$ . Этот дефект приводит к ошибкам наводки на цель. При вращении окулярного колена в вертикальной плоскости в пределах от  $0$  до  $120^\circ$  изображение неподвижной точки предмета не должно смещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях больше чем на  $0,001 \text{ рад}$  ( $3,6'$ ).

Первые три требования выполняются обычными приемами. Для устранения параллакса смещают объектив 2 вдоль оси, ввинчивая или вывинчивая его оправу. В правильном положении оправы стопорится.

Наклон изображения появляется из-за неправильной установки призм 1, 3 и 4. Наклон изображения большой величины устраняют разворотом призмы Дове 1. Для этого выводят конические шестерни 7 и 8 из зацепления, переставляют большую шестерню 8 в нужном направлении на один или больше зубьев и вновь сцепляют шестерни. Окончательно наклон изображения устраняют взаимным разворотом призм 3 и 4.

Наклон штрихов сетки 5 устраняется ее разворотом.

Требование об отсутствии смещения изображения при повороте окулярного колена является основным. Это требование будет выполнено, если обеспечить неизменность направления визирной оси по отношению к неподвижной части трубы в пределах указанного допуска  $0,001 \text{ рад}$  при повороте окулярного колена на угол  $120^\circ$ .

На рис. 122 дана упрощенная оптико-кинематическая схема коленчатой трубы ПО-1М, на которой сохранены прежние обозначения узлов.

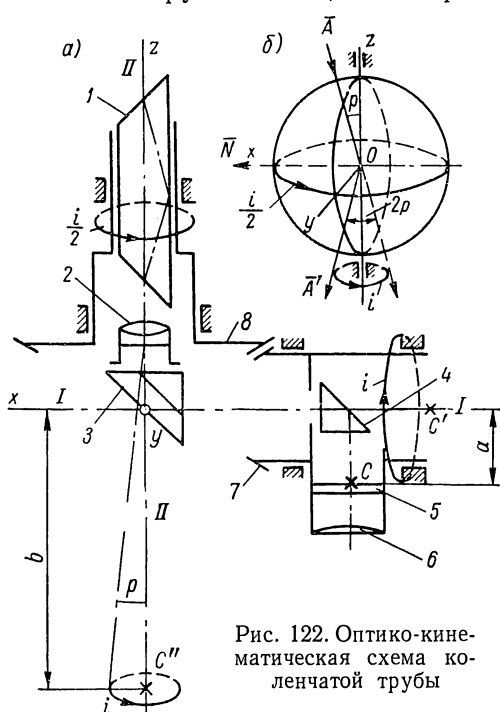


Рис. 122. Оптико-кинематическая схема коленчатой трубы

Рассмотрим влияние малых подвижек оптических узлов на нарушение указанного основного требования о неизменности направления визирной оси.

Для этого построим систему неподвижных координатных осей  $xyz$ , направив ось  $z$  по оси вращения  $II-II$  призмы Дове 1, а ось  $x$  — по оси поворота  $I-I$  окулярного колена. Результаты рассмотрения сведем в таблицу. В табл. 15 указана действительность каждой из шести возможных подвижек — трех малых сдвигов  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$  вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и трех поворотов на малые углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  вокруг тех же осей. Прочерком отмечены недействительные подвижки. В пер-

вых четырех строках рассмотрена действительность подвижек основных схемных деталей оптической системы для того случая, когда узел призмы Дове отделен от трубы. Видно, что подвижки разных деталей влияют различно. Поперечные сдвиги сетки 5, а также сдвиги и повороты окулярной призмы 4 вызывают биение визирной оси при повороте окулярного колена, так как указанные подвижки приводят к тому, что изображение  $C'$  сетки 5 за окулярной призмой 4 при обратном ходе лучей сдвигается с оси вращения  $I-I$  окулярного колена. Иначе действуют сдвиги и повороты призмы с крышкой 3. Они приводят лишь к наклону визирной оси, но не вызывают ее биения. Это объясняется тем, что при любых действительных подвижках призмы с крышкой 3 изображение  $C''$  сетки 5 в обратном ходе лучей будет смещаться вместе с изображением оси поворота  $I-I$  окулярного колена.

**Влияние малых по величине сдвигов и поворотов основных оптических узлов  
на биение и наклон визирной оси коленчатой трубы  
при отделенной призме Дове**

Наименование деталей и узлов	Возможные подвижки оптических узлов					
	Смещения вдоль осей			Повороты вокруг осей		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
Сетка 5	Биение визирной оси $\frac{\Delta x}{f'_{об}}$   $\frac{\Delta y}{f'_{об}}$		—	—	—	—
Окулярная призма 4	—	$\frac{\Delta y}{f'_{об}}$	$\frac{\Delta z}{f'_{об}}$	$\alpha \frac{a}{f'_{об}}$	$2\beta \frac{a}{f'_{об}}$	$\gamma \frac{a}{f'_{об}}$
Призма с кры- шей 3	$\frac{\Delta x}{f'_{об}}$	$\frac{2\Delta y}{f'_{об}}$	$\frac{\Delta z}{f'_{об}}$	$\alpha \frac{b}{f'_{об}}$	$2\beta \frac{b}{f'_{об}}$	$\gamma \frac{b}{f'_{об}}$
Объектив 2	Наклон визирной оси $\frac{\Delta x}{f'_{об}}$   $\frac{\Delta y}{f'_{об}}$		—	—	—	—
Призма До- ве 1 отдельно	—	—	—	Биение визирной оси $2k$	—	—
Призма До- ве 1 совме- стно с осью вра- щения	—	—	—	Биение визирной оси $\alpha$   $\beta$		—

В пятой строке отдельно указана действенность коллимацион-  
ной ошибки призмы Дове 1 (см. задачу на стр. 97), а в шестой  
строке — действенность наклонов узла этой призмы совместно  
с ее осью вращения. Коллимационная ошибка вызывает биение  
визирной оси, так как эта ось будет вращаться синхронно с при-  
змой Дове, описывая поверхность конуса с углом раствора  $4k$ .  
Наклон оси вращения узла призмы Дове на угол  $p$  приведет  
к тому, что визирная ось тоже будет вращаться по конусу с углом  
раствора  $2p$ , но с удвоенной скоростью по отношению к скорости

вращения призмы Дове или, что то же самое, синхронно с вращением окулярного колена. Следовательно, визирная ось в пространстве предметов будет вращаться синхронно с вращением изображения  $C''$  сетки 5, если последняя сдвинута с оси поворота  $I—I$  окулярного колена.

На рис. 122, б в системе сферических координат показано, что если призма Дове не имеет коллимационной ошибки (нормаль  $\bar{N}$  ее отражающей грани описывает экваториальную плоскость  $xy$ ), то наклонный луч, направленный по орту  $\bar{A}$  и отраженный от призмы, будет вращаться с удвоенной скоростью в сторону вращения призмы Дове.

Наоборот, если падающий луч  $\bar{A}'$  вращается с удвоенной угловой скоростью в направлении вращения призмы, то отраженный луч  $\bar{A}$  в пространстве предметов будет сохранять свое направление неизменным.

На этом основана возможность полной компенсации биения визирной оси, которое вызывают подвижки сетки 5 и окулярной призмы 4. Если в трубе без призмы Дове имеется такое биение визирной оси, то его можно устранить юстировкой, установив направление главного луча, на котором лежит центр вращения изображения  $C''$  сетки  $C$ , параллельно оси вращения призмы Дове. Это и есть основное условие юстировки прибора.

Можно заметить, что при соединении узла призмы Дове с прибором наклон визирной оси, который вызывают подвижки призмы с крышей 3 и подвижки объектива 2, превращается в такое же биение визирной оси в пространстве предметов, какое вызывалось наклоном оси вращения призмы Дове (табл. 15).

В конструкции трубы ПО-1 следует предусмотреть два юстировочных компенсатора: один — для устранения коллимационной ошибки призмы Дове с точностью примерно до  $0,0005 \text{ рад}$ , так как эта ошибка вызывает удвоенной величины биение визирной оси; другой — для устранения непараллельности главного луча, вокруг которого происходит биение изображения сетки  $C''$ , по отношению к оси вращения призмы Дове с точностью до  $0,001 \text{ рад}$ .

Последняя юстировка может быть выполнена несколькими способами, что видно из табл. 15, так как призма с крышей 3 имеет действительные сдвиги и повороты и, кроме того, объектив 2 имеет действительные сдвиги. Конструктивно удобными оказались поперечные сдвиги объектива с помощью двойной эксцентриковой оправы и наклоны призмы с крышей вокруг осей  $x$  и  $y$ . В руководстве [45] приведены схемы приборов ПО-1 и ПО-1М, в которых использованы оба эти варианта. На рис. 121 основная юстировка выполняется наклонами только призмы с крышей 3 вместе с мостиком, на котором она закреплена.

Чувствительность юстировочных устройств подсчитывается по формулам, которые приведены в табл 15 и легко выводятся.

Юстировка коленчатой трубы производится на коллиматорной установке, которая состоит из неподвижно закрепленной отсчетной трубы, установленной на бесконечность, и зажимного устройства с направляющей формы ласточкина хвоста и закрепительным винтом. Сетку трубы коллиматора можно сдвигать регулировочными винтами по высоте и в боковом направлении. На сетке награвированы взаимно перпендикулярные, равномерно расположенные прямые штрихи, которые при пересечении образуют равные квадраты, как на шахматной доске (рис. 123). В центре сетки нанесена маленькая окружность, угловой диаметр которой равен  $3,6'$  (00-01). В пределах этой окружности допустимо биение визирной оси в отъюстированном приборе при повороте окулярного колена при повороте окулярного колена в пределах  $i = 120^\circ$ .

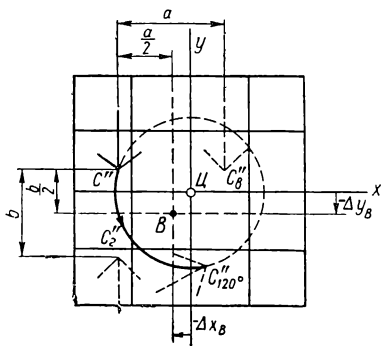


Рис. 123. Определение взаимоположения центра вращения  $\mathcal{C}$  сетки и следа оси вращения  $B$  призмы Дове

Для юстировки необходимо последовательно выполнить следующие операции.

1. Закрепить прибор в зажимном устройстве коллиматора посредством призматических салазок формы ласточкина хвоста, имеющих у основания прибора.

2. Отделить от визира узел с выверочным клином  $K$  и узел призмы Дове  $I$  (рис. 121).

3. Проверить узел призмы Дове на специальном коллиматоре и убедиться, что коллимационная ошибка не превосходит установленного допуска.

4. Установив в среднее положение стопоры  $C_T$  для согласования визирной оси трубы с осью канала ствола, регулировочными винтами сетки трубы коллиматора привести в середину поля зрения изображение сетки коленчатой трубы, имеющей форму стрелки. Через острие стрелки и проходит визирная ось трубы. Убедиться, что параллакс сетки, разворот ее вертикального штриха и наклон изображения находятся в пределах соответствующих допусков.

5. Поворачивая окулярное колено трубы от горизонтального положения вверх на  $120^\circ$ , по сетке в отсчетной трубе наблюдать биение сетки прибора. Изображение сетки  $C''$  (рис. 122) опишет дугу окружности, если ось поворота окулярного колена не имеет зазоров. В зависимости от направления сдвига изображения  $C'$  сетки 5 она опишет дугу в  $120^\circ$ , расположенную на любом участке окружности, которая показана штриховой линией (рис. 123).



Изображение сетки прибора в виде стрелки  $C''_{120^\circ}$  при повороте окулярного колена, кроме того, будет синхронно с ним наклоняться, так как выключена выпрямляющая призма Дове.

Регулировочными винтами при сетке трубы коллиматорной установки следует совместить центр  $Ц$  дуги, описываемой сеткой прибора, с центром шкалы, разделенной на квадраты, т. е. с центром маленькой окружности.

6. Далее необходимо найти на той же шкале местоположение следа оси вращения призмы Дове. Для этого надо установить призму на место (осторожно сцепляя конические шестерни 7 и 8) при горизонтальном положении окулярного колена. При первой установке отражающую грань призмы Дове следует расположить горизонтально. Стрелка  $C''$  изобразится через призму в виде стрелки  $C''_z$ , расположенной по вертикали зеркально симметрично на расстоянии  $b$ . Поделив пополам это расстояние между кончиками стрелок  $C''$  и  $C''_z$ , найдем след отражающей плоскости призмы при ее горизонтальном расположении. На рис. 123 этот след показан штриховой горизонтальной прямой. Поскольку нет коллимационной ошибки призмы Дове, то с этой горизонтальной прямой совпадает и след оси вращения призмы.

При второй установке призмы Дове ее отражающую грань следует расположить вертикально. Стрелка  $C''$  изобразится через призму в виде стрелки  $C''_v$ , сдвинутой в горизонтальном направлении на расстояние  $a$ . Поделив это расстояние пополам, найдем след отражающей плоскости призмы; он показан штриховой вертикальной прямой. В точке пересечения обеих штриховых прямых находится след оси вращения призмы Дове, который обозначен точкой  $B$ .

7. Наконец, требуется совместить центр вращения  $Ц$  изображения сетки  $C''$  со следом  $B$  оси вращения призмы Дове. Для этого определяют координаты следа этой оси  $\Delta x_B$  и  $\Delta y_B$ . Поскольку центр  $Ц$  вращения сетки  $C''$  совпадает с центром шкалы, то на эти расстояния и необходимо сдвинуть острие стрелки  $C''$ . Зная координаты кончика стрелки сетки  $C''$  до юстировки ( $x_c$  и  $y_c$ ), вычисляют значения координат  $x'_c$  и  $y'_c$  этой же точки, которые она должна иметь после совмещения центра  $Ц$  со следом  $B$ . Новые координаты связаны со старыми соотношениями

$$x'_c = x_c + \Delta x_B; \quad y'_c = y_c + \Delta y_B.$$

Сдвигают сетку в точку с этими предвычисленными координатами, используя юстировочные подвижки, предусмотренные в конструкции прибора. Для этого с помощью регулировочных винтов наклоняют мостик с крышеобразной призмой 3, который по окончании юстировки закрепляют зажимными винтами (рис. 121).

Если все предыдущие операции были выполнены правильно и достаточно тщательно, то центр  $Ц$  окажется точно совмещенным

со следом  $B$  и тогда наступит полная взаимокompенсация ошибок. При вращении окулярного колена не будет замечаться биения визирной оси, превышающего допустимое. При необходимости уточняют юстировку повторно, выполняя все семь операций.

### **31. Пути повышения производительности труда на сборке оптических приборов**

Основными направлениями увеличения производительности труда и снижения себестоимости на сборке приборов являются следующие.

1. Систематическая работа на всех этапах проектирования приборов по повышению технологичности конструкций, особенно с точки зрения сборки приборов.

2. Совершенствование технологии сборки, применение научно обоснованной методики юстировки, модернизация сборочно-юстировочной оснастки, контрольных приспособлений и устройств.

3. Научная экономическая и техническая организация труда на сборке приборов.

4. Повышение квалификации рабочих и ИТР, обмен передовым производственным опытом.

Остановимся подробнее на первых двух направлениях повышения производительности труда.

При любой серийности выпуска приборов наибольшие выгоды дает использование преимуществ массового производства, отличающегося наиболее высокой производительностью труда, наименьшей себестоимостью приборов при наибольшей стабильности их качества.

Повышение технологичности приборов наиболее эффективно на первых стадиях их проектирования и разработки конструкций, начиная с выбора принципиальной схемы.

Технологичной следует считать такую конструкцию, которая позволяет изготавливать приборы с предписанными характеристиками и обусловленного качества при наименьшей себестоимости в условиях данного производства и при заданном выпуске.

Из этого определения следует, что конструкция, технологичная при изготовлении в условиях данного производства и при заданном выпуске, может оказаться нетехнологичной при организации ее изготовления на другом предприятии или при резком изменении серийности выпуска приборов на том же производстве. В обоих случаях необходимо сделать анализ технологичности конструкции и соответственно ее переработать.

Технологичные приборы должны быть просты и дешевы в изготовлении, точны и производительны в работе, надежны и долговечны в условиях эксплуатации.

Технологичность приборов характеризуется такими показателями, как общее количество деталей, сложность их изготовления,

стоимость и дефицитность применяемых материалов и т. д. Для повышения технологичности вновь разрабатываемых конструкций необходимо широко применять типизацию, унификацию, нормализацию и стандартизацию деталей и узлов, а также заимствование деталей и узлов из базовых, хорошо освоенных в производстве конструкций.

Весьма важное значение имеет технологичность конструкций приборов с точки зрения их сборки и юстировки, так как последние коренным образом влияют на трудоемкость всего изделия и на возможность быстрого освоения его серийного выпуска.

Технологичной с точки зрения сборки можно считать такую конструкцию, которая отличается следующими свойствами.

1. Имеет наименьшее возможное число дорогих и сложных, ответственных и оригинальных деталей, а также наименьшее абсолютное число деталей и узлов, из которых наибольшее относительное количество заимствовано из хорошо освоенных приборов серийного или массового производства.

2. Разделяется на самостоятельные (автономные) сборочные узлы, которые возможно собирать и контролировать параллельно, т. е. независимо друг от друга.

3. В местах разделения прибора на автономные узлы имеет наименьшее число оптических, механических, электрических и других связей, которые к тому же не требуют точного взаимориентирования присоединяемых узлов и деталей.

4. Сборочные базы обеспечивают вполне определенное и достаточно точное взаимоположение соединяемых узлов и деталей.

5. Если сборочные базы не вполне или недостаточно точно определяют взаимоположение соединяемых узлов и деталей, то предусмотрена простая и быстрая компенсация погрешностей при сборке, и возможен удобный контроль правильности выполнения сборки и юстировки. По возможности исключены случаи зависимой юстировки, а при их неизбежности обеспечен комплексный контроль при сборке и юстировке.

6. Общая сборка прибора является удобной, может выполняться непрерывно и с использованием производительных процессов.

7. Обеспечена высокая надежность сохранения рабочего состояния прибора в условиях эксплуатации, а при расстройстве прибора — быстрое восстановление его рабочего состояния. Предусмотрена также простота и быстрота выполнения ремонта прибора при износе или порче его некоторых частей в процессе эксплуатации.

Рассмотрим некоторые практические примеры повышения технологичности конструкций с точки зрения сборки.

На рис. 124, а приведена схема осветителя, который изображает световое тело ртутной лампы  $L$  сверхвысокого давления СВДШ-250 яркостью в 13 000  $сб$  в плоскости апертурной диа-

фрагмы  $D$  в единичном масштабе. Оптическая система состоит из двух одинаковых вогнутых сферических зеркал  $1$  и  $2$  с отражающим покрытием и плоского зеркала  $3$  с полупрозрачным покрытием. В центрах  $O_1$  и  $O_2$  обоих сферических зеркал справа расположено световое тело лампы  $\mathcal{L}$ , а сверху — апертурная диафрагма  $D$ . Благодаря такой системе примерно половина светового потока, падающего от лампы на сферические зеркала, попадает в апертурную диафрагму. Поскольку центр сферического зеркала является анаберрационной точкой, то в плоскости апертурной диафрагмы получится хорошее по качеству изображение светового тела лампы. Все эти меры при проектировании осветителя предприняты

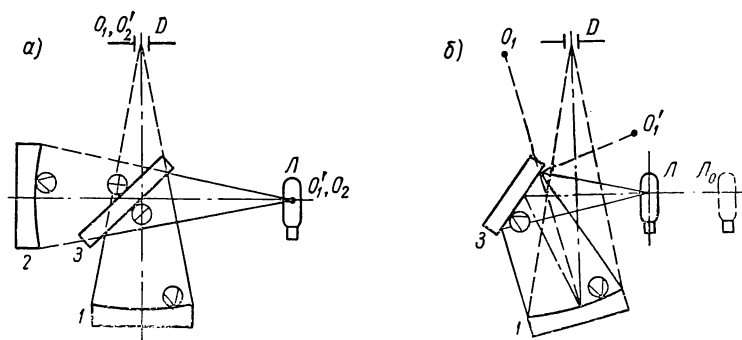


Рис. 124. Схема микрообъектива нетехнологичной (а) и технологичной (б) конструкций

для того, чтобы получить наибольшую освещенность в пределах апертурной диафрагмы  $D$  малого размера. Зеркала являются сравнительно дорогими оригинальными деталями системы. Однако небольшими изменениями схемы можно уменьшить число зеркал в осветителе не только без ущерба для дела, но даже получить бóльшую освещенность в плоскости апертурной диафрагмы.

На рис. 124, б показан один из возможных вариантов измененной схемы. Вместо полупрозрачной разделительной пластинки  $3$  используется плоское зеркало  $3$  с отражающим покрытием. Это зеркало следует сместить влево, как показано сплошными линиями. Лампу  $\mathcal{L}$  надо сместить в ту же сторону, что и зеркало  $3$ . В осветителе используется только одно нижнее сферическое зеркало  $1$ , которое следует наклонить на некоторый угол. Второе зеркало  $2$  становится лишним. В апертурную диафрагму  $D$  теперь попадает почти целиком весь световой поток, падающий от лампы  $\mathcal{L}$  на сферическое зеркало  $1$ , благодаря чему освещенность повышается вдвое. Правда, наклонное сферическое зеркало  $1$  дает несколько пониженное качество изображения светового тела лампы—

появится кома (так как центр  $O_1$  зеркала  $1$  и его изображение  $O'$  не совпадают с осью пучков лучей), но для осветительных систем этот дефект допустим. Вариант измененной схемы по рис. 124, б дешевле и проще в изготовлении, т. е. технологичнее исходного варианта по рис. 124, а.

Далее показан пример, когда сборочные базы не обеспечивают правильного взаимоположения соединяемых узлов и деталей. Обычная конструкция микрообъективов насыпного типа (рис. 125, а) технологична в сборке, так как внутренняя расточка корпуса вполне обеспечивает центрировку линз, если последние центрированы в оправках.

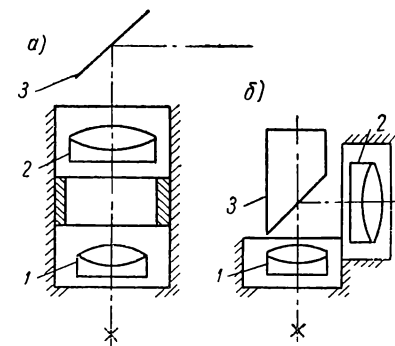
На рис. 125, б приведена схема микрообъектива, между линзами которого конструктор ввел плоское зеркало в виде детали призматической формы. После такого изменения конструкция стала совершенно нетехнологичной в сборке. Это объясняется тем, что плоское зеркало в сходящемся ходе лучей между линзами необходимо установить в правильное положение с очень высокой точностью, а прямого способа контроля выполнения этой установки не имеется.

Правильным и здесь следует считать такое положение зеркала,

Рис. 125. Схема микрообъектива технологичной (а) и нетехнологичной (б) конструкций

при котором выполнены три условия, сформулированные ранее для установки зеркала окулярного патрубка перископа (см. стр. 215). Нужное положение зеркала  $3$  задается оптическими осями линз  $1$  и  $2$  микрообъектива. Отражающая плоскость зеркала  $3$  должна проходить через точку пересечения оптических осей обеих линз, должна быть перпендикулярна плоскости, задаваемой этими осями, и должна составлять равные углы с каждой из оптических осей.

Плоское зеркало в сходящемся ходе лучей имеет три действительные подвижки — два поворота и одно смещение вдоль нормали. Повороты зеркала вызывают децентрировку 1-го рода частей системы, а смещение вдоль нормали — децентрировку 2-го рода. Допуски на эти подвижки в микрообъективе значительно строже, чем в системе окулярного патрубка перископа, и составляют десять — двадцать секунд угла на децентрировку 1-го рода и несколько микрометров на децентрировку 2-го рода. Поскольку не имеется способа непосредственного контроля с такой точностью правильности установки зеркала между линзами микрообъектива, то об ошибках положения зеркала можно судить лишь по качеству изображения точки через микрообъектив. Связать же наблюдае-



мые дефекты качества изображения с погрешностями положения зеркала весьма трудно. При сборке опытного объектива, построенного по схеме рис. 125, б, даже весьма квалифицированному оптику-механику не удалось достичь хотя бы удовлетворительного результата. Поэтому пришлось отказаться от переделки конструкции микрообъектива, а зеркало, ломающее ход лучей, перенести за микрообъектив, как показано на рис. 125, а. Требования к точности установки зеркала сразу же резко понизились, так как допуски на децентрировки системы, состоящей из микрообъектива и окуляра, значительно шире. Для контроля установки зеркала в схеме по рис. 125, а можно воспользоваться центрировочными диоптровыми трубками (см. п. 23).

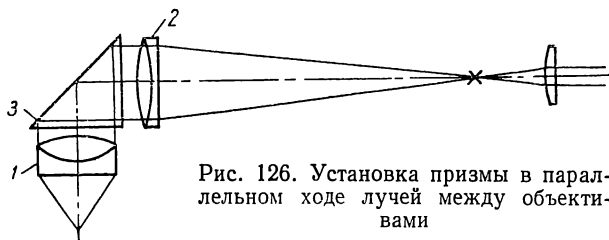


Рис. 126. Установка призмы в параллельном ходе лучей между объективами

Для удобства и быстроты сборки число связей между автономными узлами должно быть наименьшее, что проиллюстрируем на примере, изображенном на рис. 126. Здесь плоское зеркало помещено между линзами микрообъектива, но не в сходящемся ходе лучей, как на рис. 125, б, а в параллельном. Число действенных подвижек у зеркала уменьшилось — его параллельное смещение стало недейственным. Повороты зеркала влияют здесь на качество изображения системы значительно слабее. Таким образом, в варианте схемы по рис. 126 число оптических связей между узлами меньше, чем было в варианте по рис. 125, б, и эти связи требуется осуществлять при сборке значительно грубее. Поэтому разделять сложные оптические системы на автономные узлы всегда желательно только в тех местах, где световые лучи или главные лучи имеют параллельный или близкий к такому ход. При этом условии число оптических связей между узлами будет наименьшим, и их можно выполнять с меньшей точностью.

Плоскости раздела в светоделительных зеркально-призменных системах желательно располагать перпендикулярно оптической оси или по возможности под наименьшим углом наклона к этой оси. Это связано с тем, что чем больше угол наклона плоскости раздела, тем строже требования к равенству показателей преломления оптических материалов составных частей [37]. Пример призмы нетехнологичной конструкции — с наклонной плоскостью раздела — приведен на рис. 127, а. Более технологичные конструкции призм показаны на рис. 127, б, в.

Призмённые системы, расположенные в пучке лучей, сечение которого резко меняется в пределах длины призмы, следует делать симметричной конструкции. Это позволяет ставить призму в одно из возможных положений в зависимости от имеющихся дефектов материала или обработки.

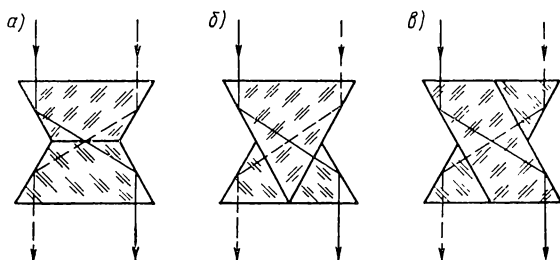


Рис. 127. Составные призмы нетехнологичной (а) и технологичной (б, в) конструкций

Пример ромб-призмы несимметричной конструкции приведен на рис. 128. Призма имеет два выступа  $B$ , с помощью которых она закрепляется в оправе. Эти выступы образуются фрезеровкой боковых поверхностей призмы еще на заготовительных операциях.

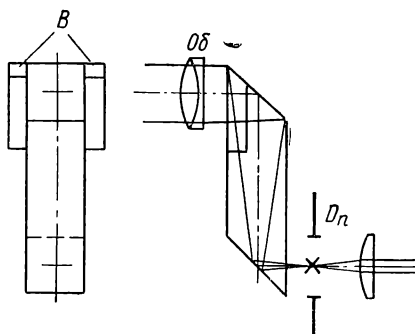


Рис. 128. Ромб-призма несимметричной конструкции

Выходная грань ромб-призмы располагается в приборе вблизи плоскости изображения  $D_n$ , в узких пучках лучей, а входная грань — вблизи объектива  $Об$ , в широком пучке. Требования к призме резко различаются; например, требования к беспыльности стекла со стороны выходной грани значительно строже, чем со стороны входной грани. Если же после полировки призмы обнаружится пузырь, недопустимый вблизи выходной грани, но вполне допустимый, если бы он был вблизи входной грани, то использовать призму будет невозможно: в силу несимметричности конструкции ее нельзя будет перевернуть в ходе лучей. Таким образом, положение призмы в ходе лучей уже predetermined расположением выступов  $B$  у заготовки. Трудоемкость изготовления этих выступов, их непрочность еще более снижают технологичность призмы.

После того как отказались от выступов, конструкция призмы стала симметричной и более технологичной в изготовлении и сборке. Для крепления призмы в оправе стали использовать боковые нерабочие поверхности.

Для соединения линз и призм в оптических цехах с давних пор применяется склеивание. Склеивают также призмённые системы, например оборачивающие призмы Малафеева 2-го рода, разделительные куб-призмы. Соединяют склейкой половинки головных куб-призм угломерных приборов.

В последнее время, в связи с появлением прочных клеев на эпоксидной основе, стали все шире применять склеивание оптических деталей с механическими в процессе сборки узлов и приборов. Это позволяет отказаться от крепежных механических деталей, повышает надежность соединения деталей, что удешевляет изготовление приборов и делает их более технологичными. Однако соединение деталей склеиванием несколько затрудняет ремонт приборов и исправление дефектов в процессе сборки.

Совершенствование технологии сборки, применение научно обоснованной методики юстировки, модернизация сборочных и контрольно-юстировочных приборов и приспособлений также позволяют значительно повысить производительность труда и качество приборов при одновременном снижении их себестоимости.

Трудоемкость сборки в большой мере зависит от удельного веса доделочных работ, поэтому нужно стремиться к тому, чтобы исключить все неоправданные пригонки и обработку деталей в процессе сборки, которая должна превратиться в простое соединение деталей в узлы, а узлов в приборы.

Научно обоснованная методика юстировки приборов позволяет в отдельных случаях в несколько раз повысить производительность труда на завершающей стадии сборки. Примерами могут служить внедрение графо-аналитического метода юстировки сложных панорамических визиров типа МО-1, разработанного Г. Е. Скворцовым [48], использование методики юстировки четырехпластинчатых интерферометров типа Цендера—Маха, разработанной А. А. Забелиным [16].

Большое значение имеет также надежность и удобство в работе контрольно-юстировочных приборов — коллиматоров. Примером может служить проекционный коллиматор системы А. Н. Захарьевского для биноклей, который отличается нерасстраиваемостью и позволяет выполнять контроль и юстировку быстро и производительно (см. п. 25).

При большой номенклатуре выпускаемых приборов, экономически выгодным и технически целесообразным оказалось использование универсально-сборных контрольно-юстировочных приборов и приспособлений (УСКЮ), собираемых по мере надобности из комплекта заранее изготовленных унифицированных узлов — труб, микрометров, окуляров, осветителей и пр.



## ЛИТЕРАТУРА

1. А р т а м о н о в П. П. Юстировка оптических измерительных приборов. М., Оборонгиз, 1939.
2. А р х и п о в Г. О. Исследование универсального измерительного микроскопа. Автореф. канд. дисс. ЛИТМО, 1947.
3. Б а р д и н А. Н. Сборка и юстировка оптических приборов. М., изд-во «Высшая школа», 1968.
4. Б у л о в с к и й П. И. Основы построения технологического процесса сборки приборов. М., Оборонгиз, 1959.
5. В е д м и д с к и й А. М. Технология производства измерительных приборов. М., Машгиз, 1953.
6. Г е р ц б е р г е р М. Современная геометрическая оптика. М., Изд. иностр. лит., 1962.
7. Г р е й м И. А. Оптические отсчетные системы в приборостроении и машиностроении. М.—Л., Машгиз, 1963.
8. Г р е й м И. А. Анализ ошибок и теория юстировки дальномера с внутриинструментальной базой, применяющегося для съемки недоступных мест. — Исследования по вопросам горного и маркшейдерского дела. М., Углетехиздат, 1950 (ВНИМИ, № 23).
9. Г р и ш и н Б. С. Юстировка геодезических инструментов. М., Геодезиздат, 1962.
10. Г у к а й л о М. Я. Основные принципы конструирования оптических контрольно-юстировочных приборов. Москва—Киев, Машгиз, 1959.
11. Г у с е в Н. А. Маркшейдерско-геодезические приборы и инструментование. М., Углетехиздат, 1958.
12. Д е р е в е н к о Н. К. Расчет ошибок угловых зеркал. — Оптико-механическое приборостроение. М., Оборонгиз, 1955 (МВТУ. Вып. 57).
13. Д н е п р о в с к и й Н. И., К а в р а й с к и й В. В. и М у с с е л и у с М. М. Введение в практическую астрономию. М.—Л., ОНТИ, 1936.
14. Д о л и н с к и й И. М. и С к в о р ц о в Г. Е. Условия взаимозаменяемости объективов микроскопов. — ОМП, 1963, № 7.
15. Е л и с е е в С. В. Геодезические инструменты и приборы. М., Геодезиздат, 1959.
16. З а б е л и н А. А. Методика юстировки больших интерферометров типа Цендера. Автореф. канд. дисс. ГОИ, 1956.
17. З а х а р ь е в с к и й А. Н. Контроль оптических систем и приборов. Вып. 2. ЛИТМО, 1946.
18. З а х а р ь е в с к и й А. Н. Новый прибор для регулировки биноклей при сборке. — Приборостроение. М.—Л., Машгиз, 1947 (ЛИТМО. Вып. 1).
19. З а х а р ь е в с к и й А. Н. Конспект сферической тригонометрии (с примерами из оплотехники). ЛИТМО, 1948.
20. З а х а р ь е в с к и й А. Н. Несколько задач по оплотехнике. ЛИТМО, 1949.

21. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М., Оборонгиз, 1952.
22. Знаменский А. П. Базы в приборостроении. М.—Л., Оборонгиз, 1939 (ЛИТМО. Т. 1, Вып. 1).
23. Иванов А. Г. Основные принципы юстировки измерительных приборов. — Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. М., Машгиз, 1961 (Межвузовский сборник № 3).
24. Кальберг И. В. Элементы теории и практики расчетной юстировки кварцевых спектрографов. Автореф. канд. дисс. 1952.
25. Кривовяз Л. М. Новый метод контроля качества оптических деталей с плоскими поверхностями. Расчет оптических систем. М., Оборонгиз, 1961 (МВТУ. Вып. 102).
26. Кроль Н. Г. Погрешности дальномера в зависимости от начальной установки отражателей, угла прогиба наружной трубы и угла места цели. — Приборостроение. М.—Л., Машгиз, 1947 (ЛИТМО. Вып. 1).
27. Кругер М. Я., Панов В. А., Кулагин В. В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Изд. 2-е. М.—Л., изд-во «Машиностроение», 1967.
28. Лебедев И. В. О влиянии установки отражательных призм и систем плоских зеркал на смещение и поворот изображения в оптических приборах. Автореф. канд. дисс. ГОИ, 1951.
29. Лебедев И. В. О некоторых свойствах систем плоских зеркал. Минск, АН БССР, 1956 (Труды института физики и математики АН БССР. Вып. 1).
30. Любатов Ю. В. К исследованию методических ошибок в визирных системах с подвижными зеркалами — Семинар по точности в машиностроении и приборостроении. М., АН СССР, 1959 (Труды института машиноведения АН СССР. Вып. 13).
31. Максutow Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.—Л., ГИТТЛ, 1948.
32. Мальцев М. Д. О требованиях к защитным стеклам аэрофотоаппаратов. — Изв. вузов СССР. Геодезия и аэрофотосъемка, 1959, № 5.
33. Маталин А. А. Конструкторские и технологические базы. Изд. 3-е. М.—Л., изд-во «Машиностроение», 1965.
34. Мещеряков А. В. Метод юстировки и выверки оптического отвеса теодолита МГТ-30. — Научные труды Харьковского Горного института. Т. IV. Харьков, 1958.
35. Михайлов Е. А. Основные направления совершенствования технологий сборки точных приборов. — Совершенствование технологии производства приборов. М., Машгиз, 1953 (Прогрессивная технология приборостроения. Вып. 2).
36. Михайлов Е. А. О повышении точности счетно-решающих приборов методом регулировки. М., Оборонгиз, 1958.
37. Нефедов Б. Л. Методы решения задач по вычислительной оптике. М.—Л., изд-во «Машиностроение», 1966.
38. Пер А. Г. Производство оптико-механических приборов. М., Оборонгиз, 1959.
39. Проверка оптико-механических приборов для измерения длин и углов. Сб. инструкций. М., Стандартгиз, 1961.
40. Погарев Г. В. О визирных осях зрительных труб. — Теория и расчет оптико-механических приборов. М.—Л., Машгиз, 1949 (ЛИТМО. Вып. 4).
41. Погарев Г. В. Исследование методов решения оптических юстировочных задач. Автореф. докт. дисс. ЛИТМО, 1966.
42. Пошеонов Б. Л. Графо-аналитическая геометрия в применении к оптическим задачам. М.—Л., изд-во «Машиностроение», 1967.
43. Приборостроение и средства автоматизации. Справочник в пяти томах. Под ред. А. Н. Гаврилова. Т. 3, кн. 2. М., изд-во «Машиностроение», 1964.
44. Пузанова В. П. Размерный анализ и простановка размеров в рабочих чертежах. М.—Л., Машгиз, 1958.

45. Руководство по ремонту командирской трубы БИ и оптической трубы ПО-1. М., Воениздат, 1946.
46. Руководство по ремонту панорамы ПГ и оптических прицелов ПП-1 и ПП-9. М., Воениздат, 1946.
47. Русинов М. М. Габаритные расчеты оптических систем. М., Госгеолтехиздат, 1963.
48. Скворцов Г. Е. О влиянии некоторых ошибок юстировки панорамических систем на точность измерения углов. ЛГУ, 1956 (ЛИТМО. Вып. 19).
49. Слюсарев Г. Г. Геометрическая оптика. М.—Л., АН СССР, 1946.
50. Соьер Р. Э. Экспериментальная спектроскопия. М., Изд. иностр. лит., 1953.
51. Соколова Т. И. Объективы микроскопа, их сборка и испытание. Автореф. канд. дисс. ГОИ, 1950.
52. Справочная книга оптико-механика. М.—Л., ОНТИ. Ч. 1, 1936. Ч. 2, 1937.
53. Сухопаров С. А. Сборка и юстировка морских оптических дальномеров. М., Оборонгиз, 1961.
54. Технологичность конструкций. Под ред. С. Л. Ананьева и В. И. Купровича. М., Дом техники, 1959.
55. Тищенко О. Ф. Средства и методы поверки, юстировки и наладки измерительных приборов и автоматов. Справочник контролера машиностроительных заводов по допускам, посадкам и линейным измерениям. М., Машгиз, 1963.
56. Топорец А. С. Монохроматоры. М., ГИТТЛ, 1955.
57. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. Ч. 1. М.—Л., АН СССР, 1948.
58. Тудоровский А. И. Система из четырех плоских зеркал. — ОМП, 1956, № 1.
59. Турыгин И. А. Прикладная оптика. М., изд-во «Машиностроение». Ч. 1, 1965. Ч. 2, 1966.
60. Федосеев Д. Н. Проектирование технологических процессов сборки приборов. М.—Л., Машгиз, 1963.
61. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.—Л., изд-во «Машиностроение», 1966.
62. Шахвердов А. Ш. Связь между положением главной точки аэроснимка и величиной фотограмметрической дисторсии. М.—Л., АН СССР, 1950 (Труды лаборатории аэрометодов. Т. 2).
63. Эрвайс А. В. Юстировка и ремонт оптико-механических измерительных приборов. М., Машгиз, 1958.
64. Яриновская А. Л. Кинофотообъективы и качество изображения. М., изд-во «Искусство», 1965.
65. Applied optics a. optical engineering. V. III. New York—London, Academic press, 1965.
66. Emsley H. H. Reflecting prisms. — «The Optician», 1962, v. 143.
67. Erfle H. Über die durch ein Drehkeilpaar erzeugte Ablenkung und über eine als Kennzeichen für die Beibehaltung des «Hauptschnittes» dienende Sinusbedingung: — «Zeitschrift für Physik», 1920, B. I.
68. Hansen F. Justierung. Berlin, V. T., 1964.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

**ЧАСТЬ ПЕРВАЯ****ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СБОРКИ И ЮСТИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

<b>Глава I. Требования к оптическим приборам. Назначение и методы юстировки оптических систем . . . . .</b>	<b>5</b>
1. Типы современных оптических приборов и требования к ним . . . . .	—
2. Виды сборки оптических приборов . . . . .	11
3. Назначение юстировки, способы выполнения и типы юстировок . . . . .	22
4. Основные юстировочные задачи и методы их аналитического решения . . . . .	32
<b>Глава II. Фокусировка оптических систем . . . . .</b>	<b>42</b>
5. Типовые задачи, решаемые при фокусировке оптических систем . . . . .	—
6. Фокусировка изображения . . . . .	48
7. Параллакс в оптических приборах. Допуски на параллакс, способы его контроля и устранения . . . . .	63
8. Юстировка масштаба изображения и увеличения оптических систем . . . . .	73
<b>Глава III. Юстировка зеркально-призмennых систем . . . . .</b>	<b>87</b>
9. Аналитические способы решения пространственных задач, возникающих в связи с юстировкой зеркально-призмennых систем . . . . .	—
10. Плоское зеркало в параллельном ходе лучей . . . . .	95
11. Угловое зеркало в параллельном ходе лучей . . . . .	101
12. Зеркально-призмennые системы с тремя и большим числом отражений в параллельном ходе лучей . . . . .	107
13. Преломляющий клин в параллельном ходе лучей . . . . .	115
14. Системы плоских зеркал и отражательные призмы в сходящемся ходе лучей . . . . .	127
15. Классификация зеркально-призмennых систем . . . . .	147
<b>Глава IV. Центрирование узлов оптических систем к основным базам . . . . .</b>	<b>163</b>
16. Основные базы оптических узлов и систем . . . . .	—
17. Центрирование оптических узлов и систем . . . . .	168
	291

<b>Глава V. Обеспечение качества изображения оптических систем . . . . .</b>	<b>175</b>
18. Основные требования к качеству изображения оптических систем . . . . .	—
19. Требования к оптическим деталям . . . . .	178
20. Решение типовых задач по расчету допусков на оптические детали и узлы . . . . .	192

## ЧАСТЬ ВТОРАЯ

### СБОРКА И ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ УЗЛОВ И ПРИБОРОВ

<b>Глава VI. Юстировка типовых узлов оптических приборов . . . . .</b>	<b>201</b>
21. Сборка объективов зрительных труб, микроскопов и фотоаппаратов . . . . .	—
22. Сборка зрительных и визирных труб . . . . .	211
23. Сборка и юстировка неподвижных зеркально-призмennых систем в сходящемся ходе лучей . . . . .	212
<b>Глава VII. Юстировка наблюдательных приборов . . . . .</b>	<b>219</b>
24. Сборка и юстировка монокулярных труб . . . . .	—
25. Сборка и юстировка бинокулярных приборов . . . . .	221
<b>Глава VIII. Юстировка угломерных приборов . . . . .</b>	<b>236</b>
26. Классификация угломерных приборов и требования к их юстировке . . . . .	—
27. Юстировка угломерных приборов с поворотным визиром типа теодолита . . . . .	242
28. Юстировка угломерных приборов с качающимся головным зеркалом типа перископа . . . . .	254
29. О юстировке панорамических угломерных приборов . . . . .	263
<b>Глава IX. Разработка методик юстировки и контроля оптических приборов . . . . .</b>	<b>271</b>
30. Основы разработки методик юстировки и контроля оптических приборов . . . . .	—
31. Пути повышения производительности труда на сборке оптических приборов . . . . .	281
<b>Л и т е р а т у р а . . . . .</b>	<b>288</b>

Георгий Васильевич ПОГАРЕВ

### ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Редактор издательства *Т. С. Васильева*

Переплет художника *Б. Л. Жадановского*

Технический редактор *Т. П. Малашкина*

Корректор *Р. М. Беликова*

Сдано в производство 6/X 1967 г.

Подписано к печати 22/II 1968 г. М-16114

Формат бумаги 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага типографская № 2. Печ. л. 18,25 Уч.-изд. л. 18,3

Тираж 6000 экз.

Заказ 1771.

Цена 1 р. 11 к.

Ленинградское отделение издательства «Машиностроение»

Ленинград Д-65, ул. Дзержинского, 10

Ленинградская типография № 6

Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР

Ленинград, ул. Монсеенко, 10.



